

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний авіаційний університет

ДУДАР ТАМАРА ВІКТОРІВНА

УДК 504.05:553.495

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ТЕРИТОРІЙ З ТЕХНОГЕННО-ПІДСИЛЕНИМИ
ДЖЕРЕЛАМИ ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі екології Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор біологічних наук, професор
Ісаєнко Володимир Миколайович,
Національний авіаційний
університет, ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Волошкіна Олена Семенівна,
Київський національний
університет будівництва і архітектури,
завідувачка кафедри охорони праці
та навколишнього середовища

доктор геологічних наук, доцент
Улицький Олег Андрійович,
Державна екологічна академія
післядипломної освіти та управління,
директор Навчально-наукового інституту
екологічної безпеки та управління

доктор технічних наук, старший
науковий співробітник
Барбашев Сергій Вікторович,
Одеський національний політехнічний
університет, професор кафедри атомних
електричних станцій

Захист відбудеться «29» жовтня 2020 р. об 11⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, корпус 5, ауд. 611, м. Київ, Україна, 03058.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058 і на сайті: www.nau.edu.ua.

Автореферат розіслано «25» вересня 2020 року

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.09, к.т.н.,
доцент



Л.М. Черняк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У контексті національної безпеки держави вивчення екологічної обстановки території, пов'язаної з радононебезпечними проявами, є одним із дієвих інструментів обґрунтування ступеня відповідності наявних або прогнозованих екологічних умов завданням збереження здоров'я людини й відновлення навколишнього середовища. Розроблення родовищ корисних копалин, які містять радіоактивні елементи, може призвести до радіоактивного забруднення території й утворення техногенно-підсилених джерел природного походження, що генерують альфа-, бета-, та гамма випромінювання. Питання щодо поводження з низько радіоактивними матеріалами геологорозвідувального, видобувного і збагачувального комплексів уранових родовищ та родовищ, збагачених радіоактивними елементами, широко обговорюються у світі, про що свідчать матеріали міжнародних симпозіумів (починаючи з 1997 р.) з радіоактивних матеріалів природного походження (*NORM/TENORM – Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*), останній з яких відбувся у 2019 р. у Денвері, США. Міжнародні стандарти безпеки (BSS – Директива ЄС 59/2013) регламентують захист населення та довкілля від радону та природних джерел радіації. У статті 103 § 3 цього документа вказано, що в кожній країні-члені ЄС має бути розроблений і затверджений національний план дій щодо захисту населення від радону з визначенням зон потенційно радононебезпечних територій. На сьогодні в Україні не існує національного плану дій щодо зниження радіаційних ризиків для населення від радону та прийнятої методики визначення зон потенційно радононебезпечної території. Виходячи з вищенаведеного вкрай актуальним є створення методологічних засад оцінювання екологічної безпеки територій з високим рівнем природної радіоактивності, враховуючи радононебезпечні прояви та техногенно-підсилені джерела природного походження.

На сьогодні в Україні триває видобування різними способами та перероблення уранової руди, що призводить до погіршення екологічної обстановки на регіональному, локальному та об'єктовому рівнях. Тому, зниження негативних наслідків впливу радононебезпечних проявів на екологічну обстановку навколо урановидобувних та прилеглих територій шляхом створення методологічних основ оцінювання й обґрунтування моделі контролю екологічного стану територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження є актуальною науково-прикладною проблемою для досягнення цілей зменшення негативного впливу на довкілля і обов'язковою передумовою подальшого розвитку дистанційного екологічного моніторингу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Базовими для підготовки дисертаційних досліджень є договори про науково-технічне співробітництво між Національним авіаційним університетом (НАУ) та Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ № 24-нт-17

від 10.04.2017 та № 30-нт-18 від 04.12.2018, а також науково-дослідницькі роботи у рамках цільових комплексних програм наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки» та «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій» відповідно до планів науково-дослідних робіт Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» за темою «Створення експертно-аналітичної системи паспортизації і контролю виробничих об'єктів початкової стадії ядерно-паливного циклу (рудопрояви, родовища, гірничодобувні об'єкти, гірничо-збагачувальні комбінати)» (номер держреєстрації 0109U005728); за темою «Розробка та випробування нових технічних засобів та методик комплексного радіогеохімічного моніторингу типових об'єктів видобування та переробки уранової сировини» (номер держреєстрації 0113U005188); за темою «Відбір представницьких зразків уранових руд та руд-концентратів з родовищ України та їх комплексне дослідження» (проект Р 464 2011-2012 рр., УНТЦ). Крім того, в дисертаційній роботі використані результати, отримані автором під час роботи у складі групи міжнародних експертів за програмою МАГАТЕ «Уранова геологія: видобування та довілля в галузі розвідки, видобування та перероблення ядерних матеріалів» (червень–жовтень 1995 р.), а також в період 2013–2019 рр. за участю в роботі над Європейським атласом природної радіації в рамках наукової співпраці з *EU JRC (Joint Research Center of the EU)*. В усіх перелічених НДР здобувачка була виконавцем.

Ідея роботи полягає у створенні інформаційно-аналітичної бази, яка може слугувати основою для прийняття управлінських рішень щодо зниження негативних наслідків впливу радонової небезпеки на загальну екологічну обстановку навколо урановидобувних та прилеглих територій шляхом вдосконалення методологічних основ оцінювання екологічної небезпеки територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження та обґрунтування системи контролю їх екологічного стану.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у визначенні методологічних основ оцінювання екологічної небезпеки територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження та обґрунтуванні системи контролю їх екологічного стану.

Для досягнення вказаної мети визначено наступні **завдання досліджень**:

- проаналізувати теоретичні та практичні підходи до визначення чинників екологічної небезпеки урановидобувних та прилеглих територій як найбільш потенційно небезпечних з погляду поширення техногенно-підсилених джерел природного походження;
- розробити методологію та обґрунтувати принципи, методи і засоби проведення досліджень;
- обґрунтувати заходи щодо визначення території уранової спадщини країни за ознаками потенційно небезпечних об'єктів (*post-uranium legacy sites*);

- розробити метод ідентифікації радононебезпечних зон у межах територій суб'єктів господарювання на локальному рівні;
- виконати математичне моделювання рівня радонової небезпеки;
- визначити комплексні індикатори небезпеки локацій об'єктів уранової спадщини та прилеглих територій із застосуванням дистанційних методів картування;
- оцінити вплив породних відвалів урановидобувних виробництв на величину дозових навантажень на людину.

Об'єкт дослідження – процеси формування радононебезпеки територій з високим рівнем природної радіоактивності, враховуючи техногенно-підсилені джерела природного походження.

Предмет дослідження – методи, моделі, засоби оцінювання екологічної небезпеки територій з високим рівнем природної радіоактивності, враховуючи техногенно-підсилені джерела природного походження.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає аналіз та узагальнення світового досвіду і власних досліджень із питань довготривалого впливу на довкілля внаслідок урановидобування, аналіз даних геологопошукових робіт на радіоактивні елементи, мінералого-петрографічний аналіз визначення речовинного складу уранових руд та родовмісних порід, методи дистанційного зондування Землі під час вивчення просторових особливостей трансформації довкілля; методи геопросторового аналізу для картування чинників радононебезпеки територій; метод дискримінантних функцій для визначення рівня радононебезпеки території; методи теорії ймовірностей та математичної статистики для обробки результатів вимірювань та моделювання, комп'ютерні методи оцінювання дозових навантажень та радіаційних ризиків.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні нових методологічних підходів до оцінювання екологічної небезпеки території, де є потенційна загроза впливу на довкілля від низькоактивних техногенно-підсилених джерел природного походження. При цьому *уперше*:

- обґрунтовано методологію оцінювання екологічної небезпеки територій шляхом виділення і окреслення локацій видобування та перероблення уранової сировини у форматі уранової спадщини «*post-uranium legacy sites*» на регіональному (260 км × 125 км) і локальному (40 км × 25 км) рівнях за такими класами (разом дев'ять локацій – *sites*): території відпрацьованих уранових родовищ шахтним способом та методом підземного свердловинного вилуговування; території діючих урановидобувних підприємств та території переробних підприємств. Це території, радіоактивно забруднені внаслідок антропогенної діяльності в минулому – «*affected by past practices*», де рівень радіоактивності помітно перевищує фоновий і значення потужності еквівалентної дози досягають 350 мкЗв/год, а компоненти довкілля характеризуються підвищеним вмістом урану (породи – до 40–53 г/т; ґрунти

– до $0,5-1,9 \cdot 10^{-4}\%$; вода – $5 \cdot 10^{-6}$ г/л – $9 \cdot 10^{-2}$ г/л), продуктів його розпаду та супутніх елементів;

- розроблено метод ідентифікації радононебезпечних зон у межах територій суб'єктів господарювання на локальному рівні, який враховує природну радіоактивність компонентів доквілля, просторову щільність розломів (від $0,11-0,26$ км до $0,57-0,71$ км на 25 км²) та лінеаментів $3-4$ порядків (від $1,53-3,65$ до $5,79-7,9$ км на 1 км²), та дозволяє у $97,50 \pm 0,94$ % випадків коректно класифікувати рівень потенційної радонової небезпеки;

- доведено доцільність і перспективність використання даних радарної інтерферометрії для виявлення динаміки процесів деформування земної поверхні та даних дистанційної термометрії для виявлення довготривалих змін температури земної поверхні як індикаторів екологічної небезпеки в межах важкодоступних територій на об'єктовому рівні;

удосконалено:

- модель визначення рівня радононебезпеки на основі методу лінійних дискримінантних функцій, яка враховує природну радіоактивність, пов'язану з вмістом урану в компонентах доквілля в умовах утворення зон тріщинуватості;

- модель визначення рівня потенційної загрози запиленості повітря на базі методу лінійних дискримінантних функцій, яка враховує основні кліматичні та техногенно-антропогенні чинники в межах території, що аналізується;

- формування оперативної бази, що є підґрунтям для прийняття управлінських рішень щодо першочерговості радонової зйомки території з метою розроблення природоохоронних заходів;

набули подальшого розвитку:

- методи дистанційного картування деградації земель на основі обробки багатоспектральних космічних знімків та геопросторового моделювання для територій навколо потенційно небезпечних об'єктів;

- методологія оцінювання впливу породних відвалів урановидобувного виробництва на величину дозових навантажень на людину від забруднення атмосферного повітря.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень за темами «Території, залишені внаслідок видобування та перероблення урану: аналіз ситуації в Україні», «Паспорт родовищ урану за вимогами МАГАТЕ», «Українсько-англійський словник з геології урану» та «Елементи-супутники урану у родовищах альбітитової формації Українського щита» впроваджено в діяльність казенного підприємства «Кіровгеологія» та ТОВ «Атомні енергетичні системи України». Методика ідентифікації радононебезпеки територій та алгоритм застосування методу радарної інтерферометрії використано під час виконання науково-дослідної роботи (2015–2019 рр. № ДР 0115U002048) – ЦАКДЗ ІГН НАНУ. Результати роботи також впроваджено у навчальний процес кафедри екології НАУ для викладання навчальних дисциплін (українською та англійською мовами) «Радіоекологія», «Моніторинг доквілля» тощо студентам спеціальності 101 «Екологія».

Матеріали дисертаційної роботи було використано для надання інформації по Україні до Європейського атласу природної радіації (2019) та у подальшому можуть бути корисними при розробленні національної Програми дій щодо зниження радіаційних ризиків від радону.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи забезпечуються всебічним глибоким аналізом проблеми екологічної безпеки територій, де є джерела радіації природного походження, за літературними та архівними матеріалами; відповідністю методів дослідження поставленим у роботі меті і завданням; коректним застосуванням комплексу сучасних взаємодоповнюючих принципів, методів та засобів проведення дослідження, включаючи геоінформаційні технології, методи дистанційного зондування Землі, геопросторовий аналіз та математичне моделювання радонебезпеки територій; залученням великого фактичного матеріалу; широкою апробацією, ґрунтовними науковими публікаціями і практичним впровадженням.

Особистий внесок здобувачки полягає у систематизації та аналізі наукових вітчизняних і закордонних джерел інформації, формулюванні наукової ідеї роботи, збиранні фактичного матеріалу і його аналізі, інтерпретації результатів оброблення багатоспектральних космічних знімків, узагальненні та інтерпретації результатів досліджень, формулюванні висновків дисертації. Здобувачка безпосередньо брала участь у відборі та дослідженнях зразків порід і мінералів на родовищах урану Канади, Північної Америки та України. Особистий внесок здобувачки у роботах, опублікованих у співавторстві: [1-4; 33-35] – мінералого-петрографічні дослідження радіоактивних матеріалів природного походження при видобуванні корисних копалин; [5-7; 11, 12, 19, 20] – обґрунтування, аналіз та узагальнення досліджень щодо різних аспектів потенційної небезпеки уранової галузі як початкової стадії ядерно-паливного циклу; [7-10; 13, 14, 21, 23, 25] – формулювання ідеї, обґрунтування та застосування дистанційних методів для задач дослідження різних аспектів екологічної безпеки територій урановидобування та інших радіаційно небезпечних об'єктів; [23, 26] – формулювання ідеї, обґрунтування використання безпілотних авіаційних комплексів для задач моніторингу радіаційно небезпечних об'єктів; [17, 28, 30] – аналіз та інтерпретація даних радарної інтерферометрії для визначення індикаторів екологічної небезпеки територій; [27, 28] – постановка завдання, комплексний аналіз та узагальнення геологічних даних щодо визначення радонебезпечних зон; [15, 18] – аналіз та інтерпретація даних щодо вмісту урану в компонентах довкілля; [31] – комплексний аналіз та добірка інформації по Україні до Європейського атласу природної радіації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати доповідались на конференціях: IAEA (МАГАТЕ: Уранова геологія та довкілля) Fellowship Training on Uranium Geology, Exploration and Environment in the field of Prospecting, Mining and Processing of Nuclear Materials (Реджайна, Оттава, Канада червень-жовтень, 1995); 4th International Symposium on the Environmental

Geochemistry (Колорадо, США, 1997); 5th International Symposium & Exhibition on Environmental Contamination in Europe (Пара, 2000); 31st International Geological Congress (Ріо-де-Жанейро, 2000); NATO Advanced Study Institution Risk Assessment Activities for the Cold War Facilities and Environmental Legacies (Бургас, Болгарія, 2000); Environmental Risks and Global Community, Annual Meeting of International Risk Assessment Network (Аргонн, США, 2001); International Conference «Ecological, economical and cultural methods of landscape assessment and evaluation in the light of the UN Climate Change Convention and the UN Convention on Biological Diversity» (Варшава, 2009); VII, VIII, XI, XIII та XV Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» (Алушта, 2006, 2012, 2013; Харків 2015; 2017; 2019); IV, VI, VII Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю – Екологія/Ecology-2013, 15, 17, 19 (Вінниця, 2013; 2015; 2017; 2019); II Міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2012); NATO Advanced Research Workshop «Engaging the Public to Fight the Consequences of Terrorism and Disasters» (Тбілісі, 2014); Міжнародна конференція «Хімічна і радіаційна безпека: проблеми і рішення» (Ужгород 2014; Київ 2013; 2015; 2017); 16th Ukrainian Conference on Space Research (Одеса, 2016); Joint Programming on Radioactive Wastes Disposal (JOPRAD) Workshop (Пара, 2016); JOPRAD Regional Meeting (Бухарест, 2016); 2nd International TIEMS Conference Disaster Control and Emergency Management (Київ, 2016); «Екогеофорум-2017. Актуальні проблеми та інновації» (Івано-Франківськ, 2017); XX International Scientific Conference dedicated to the 10th anniversary of the School of Ecology (Харків, 2017); 2nd International Workshop on the European Atlas of Natural Radiation (Вербанія, Італія, 2017); XI International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Київ, 2018); II Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій» (Київ-Краків, 2019); XVIIIth International conference “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects” (Київ, 2019); International Scientific Symposium SDEV'2020 “Sustainable Development – State and Prospects” (Львів–Славське, 2020); XVIII Конференція з фізики високих енергій та ядерної фізики (Харків, 2020).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано три монографії [1–3], 29 наукових статей, з них 15 [4–18] – у вітчизняних фахових виданнях, 14 [19–32] – у фахових іноземних виданнях та 6 статтях, внесених до науко-метричних баз *Scopus* [19, 20, 23, 29, 30, 32]. Деякі аспекти досліджень викладено у 2 главах монографій [38, 39], 6 наукових статтях, опублікованих в інших виданнях [33-37; 40], та 30 публікаціях матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація загальним обсягом 332 сторінки, основного тексту 280 сторінок, складається зі вступу, семи розділів і висновків; вміщує 25 таблиць, 64 рисунки, список використаних джерел із 307 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету і завдання, визначено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів та особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію, наукові публікації та впровадження результатів дослідження.

У **першому розділі** розглянуто літературні джерела та нормативно-законодавчі акти, де міститься аналіз небезпечного стану та шляхи вирішення проблеми поводження з радіоактивними матеріалами природного походження (РМП) та/або техногенно-підсиленими РМП у світі та Україні, основні моменти якого схематично відображено на рис. 1.

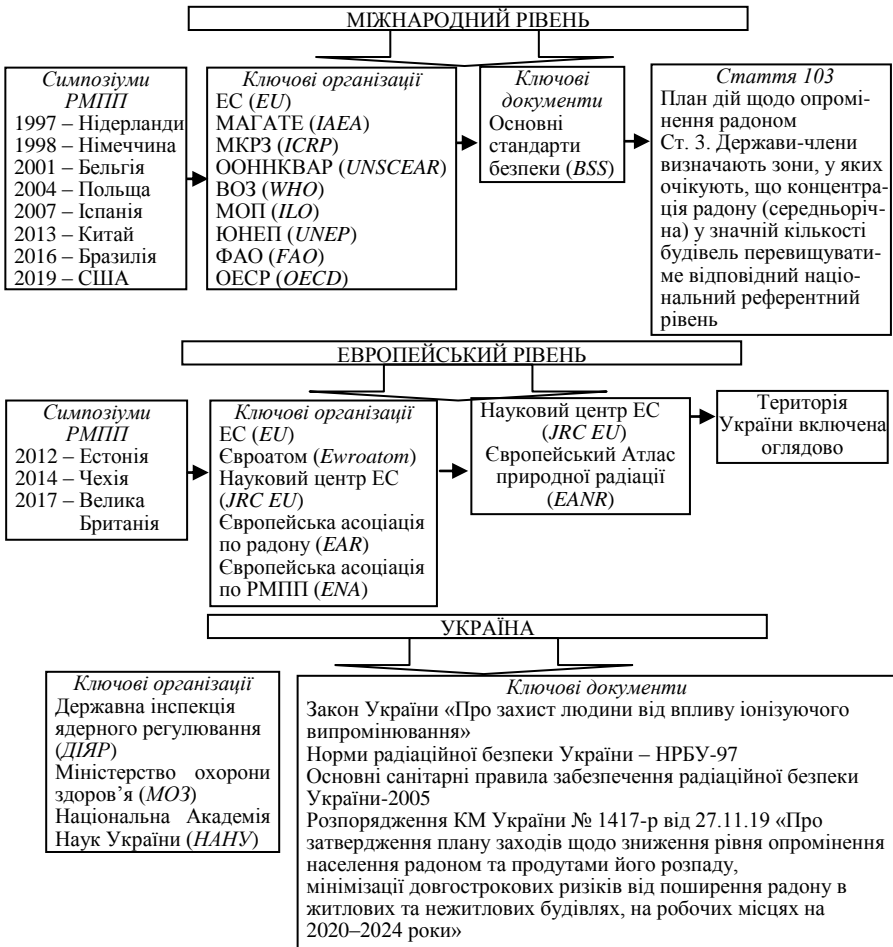


Рис. 1. Ієрархія базових складових щодо поводження з радіоактивними матеріалами природного походження у світі та Україні

В Україні накопичений великий науковий, практичний досвід та значна кількість архівного матеріалу щодо геології урану й супутніх елементів завдяки праці фахівців-уранщиків під керівництвом акад. Я. М. Белевцева та у співпраці з фахівцями відомого підприємства «Кіровгеологія», створеного у 1947 р. з цільовим призначенням пошуків та розвідки уранових родовищ.

Завдяки роботам таких науковців, як А. Х. Бакаржисв, В. О. Шумлянський, М. М. Макаренко, В. Б. Коваль, М. О. Ярошук, К. Г. Сушук, Ю.О. Фомін, О. О. Крамар, Д. М. Щербак та багато інших, є можливість вивчати природу і закономірності уранонакопичення в земній корі, а також потенційну радононебезпеку територій. Проте питання радіоекологічної безпеки внаслідок урановидобування до кінця минулого сторіччя, на жаль, не були актуальними, а всі матеріали щодо урану мали гриф таємності. У 2007 р. Україна вперше надала МАГАТЕ офіційні дані про розміщення і кількість уранових родовищ. Проблеми радононебезпеки як потенційного природного джерела радіаційного опромінення і захворюваності на рак висвітлюються, зокрема, в роботах фахівців Інституту громадського здоров'я імені О. М. Марзєєва НАМНУ – Т. О. Павленко, І. П. Лось, М. Г. Бузинного, М. В. Аксьонова, М. А. Фризюк та ін. Вагомий внесок у вирішення питань радіоекологічної безпеки зробили Г. Д. Коваленко, В. Г. Верховцев, Г. В. Лисиченко, В.І. Ляшенко, С.В. Барбашев, С.О., Яковлев, Ю.Л. Забулонов, Ю.О. Ольховик, Ю. Й. Кошик, Ю. М. Сорока, Шестопапов В.М. та ін. Серед європейських і світових публікацій відомі роботи Р. Bossew, М. De Cort, G. Cinelli, T. Tollefsen, V. Gruber, M. Garcia-Talavera, A. Garca-Perez, Emilie van Deventer та багато інших. У США та Канаді накопичено значний досвід щодо захисту населення і територій від опромінення радоном та продуктами його розпаду, починаючи ще з 1980-х років ХХ ст.

Всебічний аналіз наслідків функціонування урановидобувних підприємств показує, що цей вид антропогенної діяльності спричинює найпотужніший вплив на інші компоненти довкілля (В. Г. Верховцев, Г. В. Лисиченко, 2014, 2019).

Професор Г. І. Рудько (2019) стверджує, що продовження інтенсивного використання надр країни має супроводжуватись упровадженням природоохоронних заходів у частині вирішення екологічних проблем як важливої умови національної безпеки.

Світовий видобуток урану за останні більш ніж 10 років (включаючи Україну) досягнув максимуму в 2016 р. і становив більше 62 тис. т (рис. 2).

Вже у 2017–2018 рр. видобуток знизився приблизно до 59,3 тис. т і продовжує залишатись нестабільним завдяки мінливій ситуації в енергетиці країн-видобувачів урану.

Унаслідок планованої діяльності на підприємствах з видобутку урану були сконцентровані радіоактивні речовини в техногенно-підсиленних джерелах природного походження (ТПДПП), завдяки чому утворилось додаткове до природного радіаційного фону опромінення.

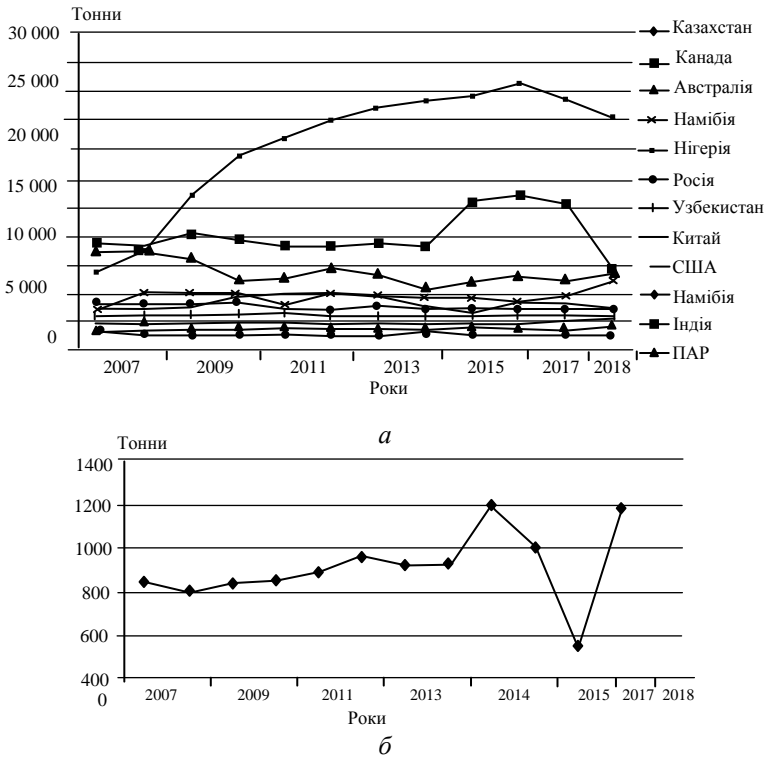


Рис. 2. Динаміка видобутку урану в світі (а) та в Україні (б)

Аналіз ситуації показує, що науково обґрунтовані принципи, пріоритети та механізми врахування чинників впливу радононебезпеки в системі екологічного моніторингу відсутні і потребують всебічного дослідження.

Виходячи з проведеного аналізу наукових та практичних досліджень за даним напрямом, сформульовані наведені вище мета та завдання досліджень.

У **другому розділі** описані об'єкти, методи дослідження, включно з методами дистанційного зондування Землі. Методологію проведення дисертаційного дослідження схематично показано на рис. 3.

Обґрунтовано методологію використання дистанційних даних для просторової оцінки екологічної безпеки території; методологію застосування аналізу часових серій дистанційних даних задля картування довготривалих трендів та періодичних складових території дослідження; методологію застосування геопросторового аналізу та математичного моделювання для визначення радононебезпеки територій. Охарактеризовано використання мінералого-петрографічних та спектрометричних досліджень для обґрунтування речовинного та хімічного складу породних відвалів та їх пилуватої фракції для дослідження пилового забруднення та оцінювання дозових навантажень від породних відвалів. Описано методи і засоби математичної обробки результатів.

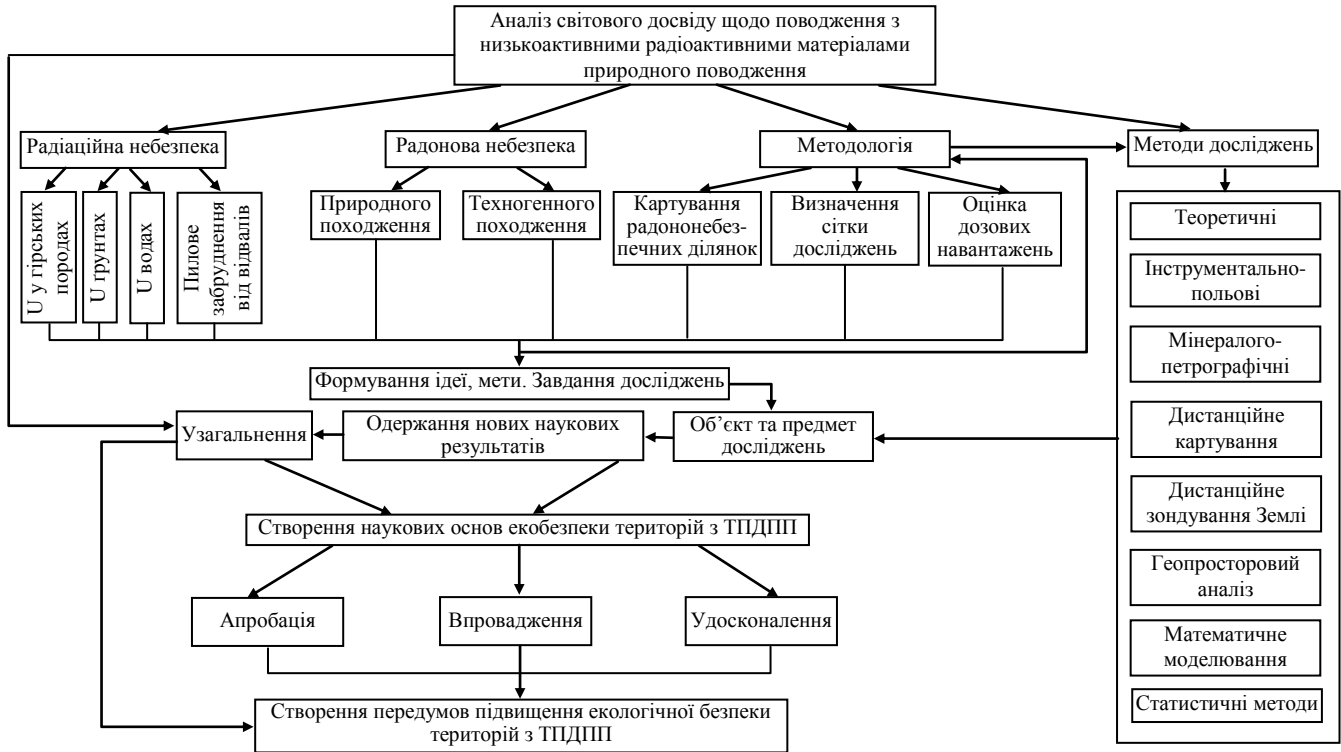


Рис. 3. Методологія проведення досліджень

У **третьому розділі** теоретично обґрунтовано визначення радононебезпечної території уранової спадщини України та запропоновано класифікацію об'єктів цієї спадщини за видами діяльності та ознаками потенційно небезпечних об'єктів.

Дослідження зосереджені на територіях урановидобування та прилеглих територіях на трьох рівнях – регіональному, локальному та об'єктовому, за порядком, відображеним на рис. 4. Район, що розглядається, є потенційно радононебезпечним, для якого районування території за рівнем радононебезпеки є питанням найближчого майбутнього, пріоритет якого вирішуватиметься в межах муніципалітетів, територіальних об'єднань. Визначення рівня радононебезпеки повинно стати основою для просвітницької діяльності та інформування населення про радоніві потенціали територій.

Визначенню територій уранової спадщини («*radiation legacy sites*» та/або «*uranium legacy sites*») передують два моменти: перший – антропогенна діяльність в минулому – «*affected by past practices*», де рівень радіоактивності перевищує фоновий (потужність еквівалентної дози на поверхні землі досягає 350 мкЗв/год); другий – об'єкти довкілля характеризуються підвищеним вмістом урану (породи – до 40–53 г/т; ґрунти – до $0,5\text{--}1,9 \cdot 10^{-4}\%$; вода – $5 \cdot 10^{-6}\text{г/л}$ – $9 \cdot 10^{-2}\text{г/л}$), продуктів його розпаду, та супутніми елементами, проте кожна окреслена локація відрізняється як рівнем потенційної безпеки для довкілля, включаючи джерела ТПДПП, так і підходами щодо екологічного моніторингу та подальшої рекультивації територій.

Дисертаційні дослідження надають можливість привернути увагу до екологічної безпеки територій уранової спадщини України. Всі визначені об'єкти експлуатувались і дотепер експлуатуються за стандартами, що не відповідають сучасному рівню захисту, та наразі потрапляють у сферу дії міжнародних стандартів безпеки (BSS – Директива ЄС 59/2013, МАГАТЕ) як радіаційно небезпечні і потребують рекультиваційних заходів (рис. 5).

За результатами досліджень обґрунтовано і окреслено території видобування та перероблення уранової сировини, що свідчить про доцільність розглядати їх з точки зору уранової спадщини країни.

У **четвертому розділі** на підставі аналізу відомих моделей та методів геопросторового аналізу, які були адаптовані до застосування під час вирішення завдань радонової зйомки території, створено базу даних потенційно радононебезпечних локацій за 13 чинниками радонової безпеки як основи для розроблення математичної моделі визначення рівня потенційної радонової безпеки.

В основу розробки методу ідентифікації потенційно радононебезпечних територій покладено ідею опрацювання матеріалів різночасових геологічних розвідувальних робіт 1975–1992 та 1992–2003 рр., а також ключових публікацій НАН України з геології урану, де міститься вихідна інформація про природну радіоактивність території України.

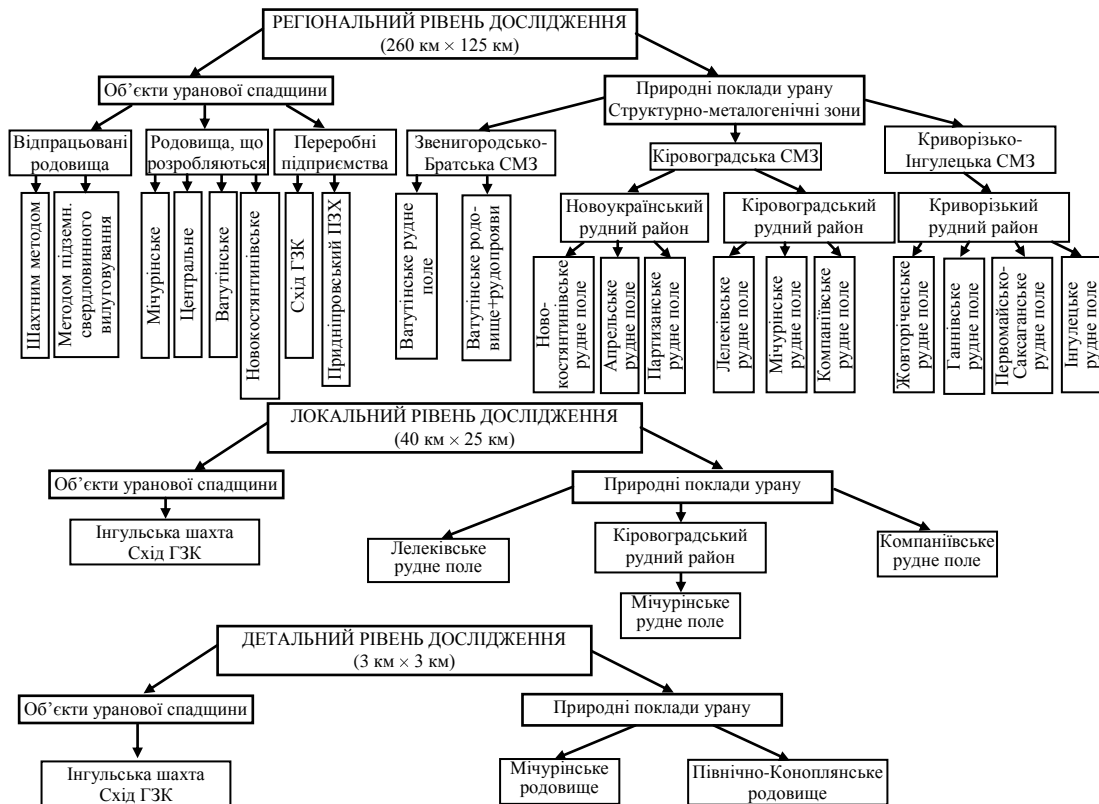


Рис. 4. Деталізована структура ієрархії досліджень

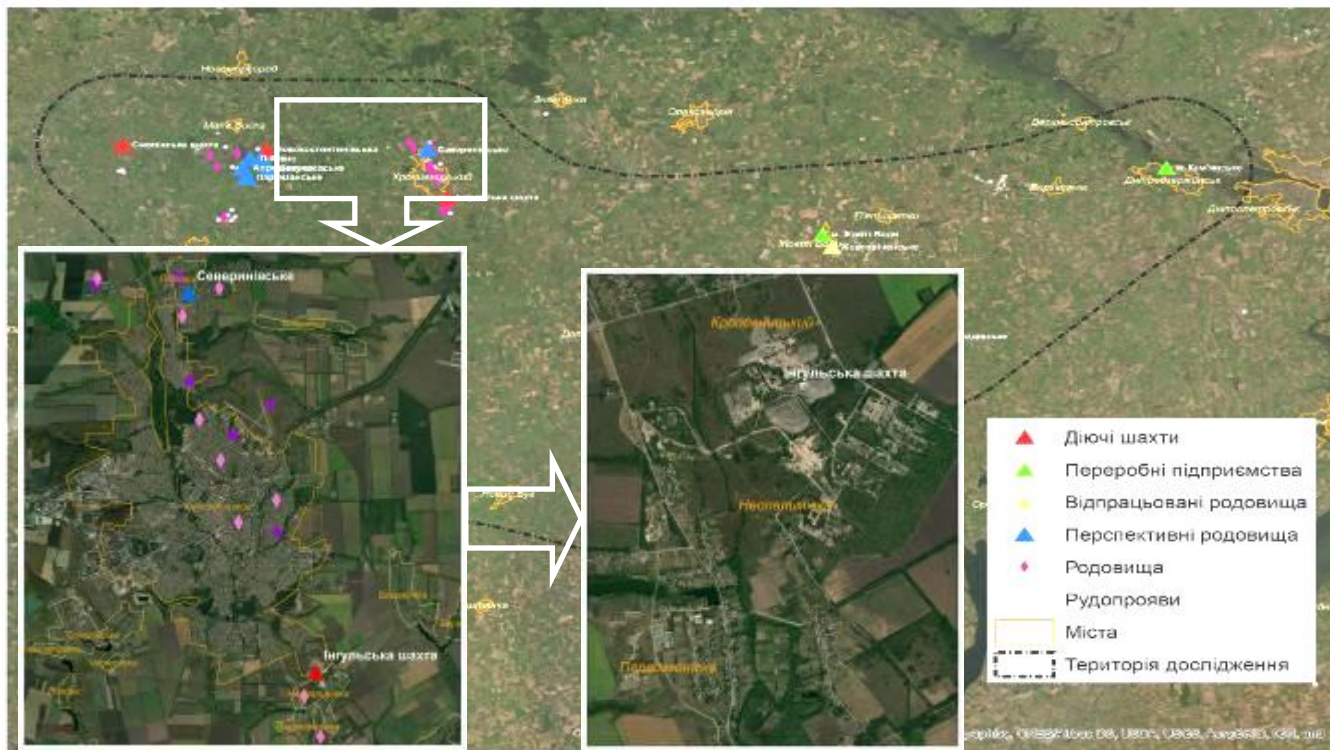


Рис. 5. Об'єкти уранової спадщини та природні поклади урану території уранової спадщини України на трьох територіальних рівнях: регіональному (загальний фон, територію дослідження виділено чорним штрих-пунктиром; локальному та об'єктовому – дві вкладки на загальному фоні)

Вихідні дані було використано з таких джерел: геологічних карт уранового і торієвого зруденіння докембрійських утворень УЩ масштабу 1:500 000; карти уранового і торієвого зруденіння докембрійських утворень центральної частини Інгульського мегаблоку масштабу 1:200 000; карти уранового і торієвого зруденіння докембрійських утворень Криворізько-Кременчуцької структурно-формаційної зони масштабу 1:200 000; а також бази даних покладів урану в межах центральної частини УЩ, узагальнених у матеріалах «Кіровгеології» за 2012–2018 рр.

Додатковими матеріалами слугували карта докайнозойських відкладів, карта неотектоніки, карта ґрунтів Кіровоградського рудного району, а також дані поверхні рельєфу територій (SRTM, ALOS). Для аналізу радонової небезпеки території уранової спадщини як території з високим рівнем природної радіоактивності авторкою запропоновано 13 чинників радонової небезпеки для геопросторового моделювання. Блок-схему вихідних даних та чинників моделювання зображено на рис. 6.

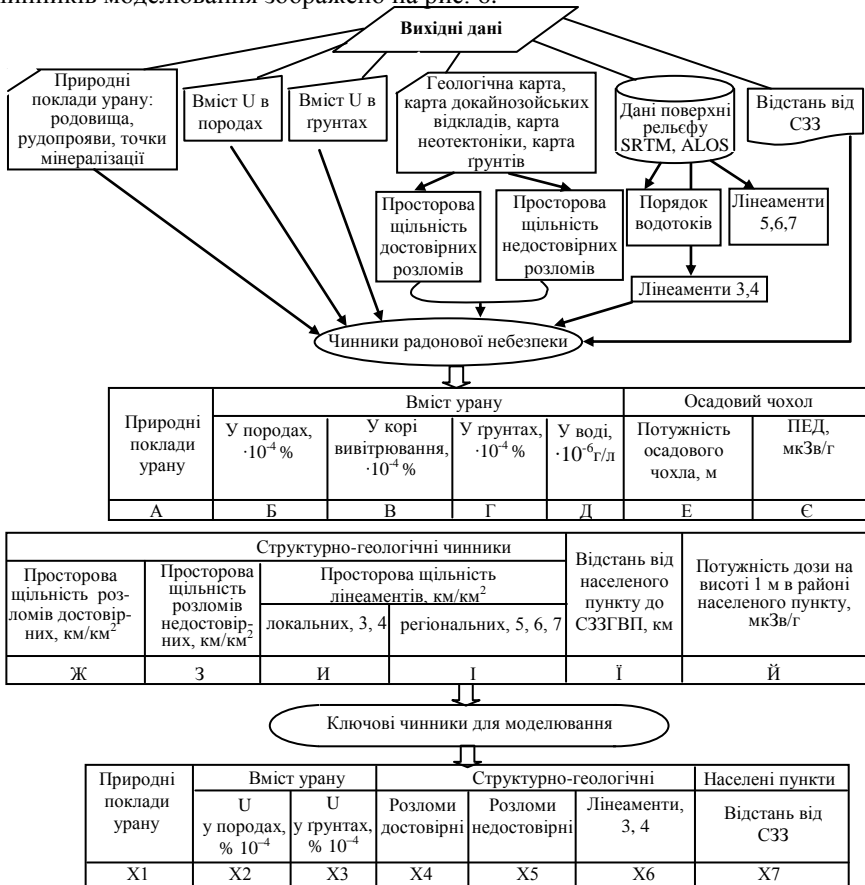


Рис. 6. Блок-схема вихідних даних для геопросторового моделювання

Визначено алгоритм геопросторового аналізу та побудовано карту просторової щільності достовірних і недостовірних розломів за сіткою 5×5 км на регіональному рівні (рис. 7). Отримана результуюча карта надала можливість встановити їх відповідність до кільцевих структур територій.

На наступному етапі виділено територію Кіровоградського рудного району для аналізу на локальному (40×25 км) рівні (рис. 7, e).

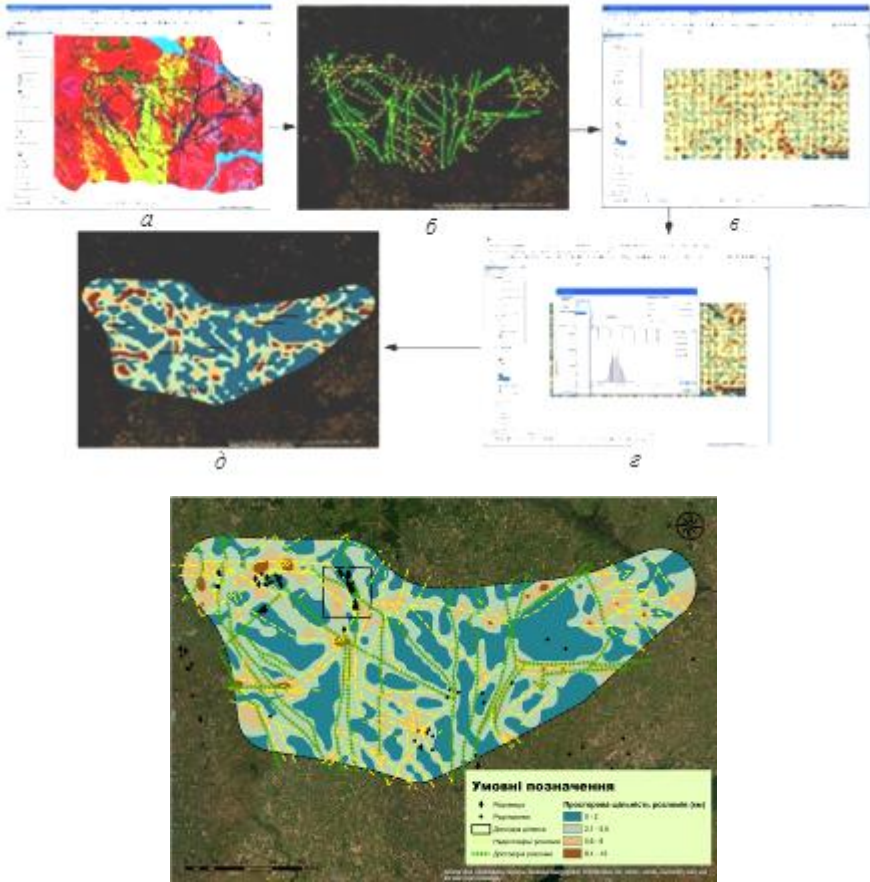


Рис. 7. Послідовність побудови карти просторової щільності розломів:
a — геопросторова прив'язка геологічної карти;
б — створення поверхні розломів; *в* — просторова щільність розломів;
г — перекласифікація геопросторової щільності розломів за рівнем потенційної радонової небезпеки; *д* — результуюча карта просторової щільності розломів; *е* — результуюча карта з виділеною ділянкою Кіровоградського рудного району для дослідження на локальному рівні

Вибір цього району зумовлений: наявністю в його межах агломерації обласного центру Кропивницький; розташуванням на південно-східній околиці цього міста найстарішої уранової шахти Інгульська; детальною вивченістю Мічуринського рудного поля, що розташоване на перетині субдовготної Кіровоградської тектонічної зони та Олександрівсько-Первозванівського субширотного розлому; об'єктивною відокремленістю чотирьох рівнів просторової щільності розломів.

Для локального рівня було також побудовано та проаналізовано карти просторової щільності достовірних і недостовірних розломів за визначеним алгоритмом (рис. 7) та карти просторової щільності лінеаментів (3–4 та 5–6–7 порядків) за алгоритмом, поданим на рис. 8, за сіткою 1×1 км.

Аналіз чинників радонової небезпеки та побудованих карт просторової щільності розломів і лінеаментів надав можливість розробити класифікацію рівня радонової небезпеки. Виділено чотири рівні радонової небезпеки: *перший* – локації, розташовані в зонах з найменшою просторовою щільністю розломів (0,11–0,26 км на 25 км^2) та лінеаментів 3–4 порядків (0,2–1,52 км на 1 км^2), часто з найпотужнішим осадовим чохлам; *другий* – з просторовою щільністю розломів 0,27–0,41 км на 25 км^2 та лінеаментів 1,53–3,65 км на 1 км^2 ; *третій* – з просторовою щільністю розломів 0,42–0,56 км на 25 км^2 та лінеаментів 3,66–5,78 км на 1 км^2 ; *четвертий* – локації найвищого рівня радонової небезпеки, зосереджені в зонах з найбільшою просторовою щільністю розломів (0,57–0,71 км на 25 км^2) та лінеаментів 3–4 порядків (5,79–7,9 км на 1 км^2), де компоненти довкілля характеризуються найвищим вмістом урану та продуктів його розпаду (рис. 8).

Виявлено асоціацію зон високої просторової щільності лінеаментів 3–4 порядків із зонами найбільш потенційно радононебезпечних ділянок (*темно-коричневого та коричневого кольорів*), де вимірюваннями встановлений високий вміст радону-222 у підвальних приміщеннях міста Кропивницький (за опублікованими даними) (рис. 9).

На підставі такого аналізу створено базу даних із 40 різних локацій (точок спостереження) так, щоб рівномірно охопити територію дослідження – по 10 локацій на кожний рівень просторової щільності розломів і лінеаментів.

Кожну локацію розглянуто за 13 фізично обґрунтованими чинниками радонової небезпеки. Кожний чинник оцінено в балах так, щоб результати можна було використати для технології математичного моделювання (табл. 1).

Чотири рівні потенційної радонової небезпеки (ПРН) було умовно поділено: від *першого* найнижчого рівня до *четвертого* найвищого рівня радонової небезпеки, куди увійшли локації, зосереджені в зонах з найбільшою просторовою щільністю лінеаментів та розломів.

У **п'ятому розділі** описано розроблену математичну модель визначення рівня радононебезпечності територій, що враховує природну радіоактивність, пов'язану з природними покладами урану та вмістом урану в об'єктах довкілля, просторову щільність лінеаментів та розломів, а також відстань від санітарно-захисної зони уранової шахти, та дозволяє у $97,50 \pm 0,94$ % правильно класифікувати рівень потенційної радонової небезпеки.

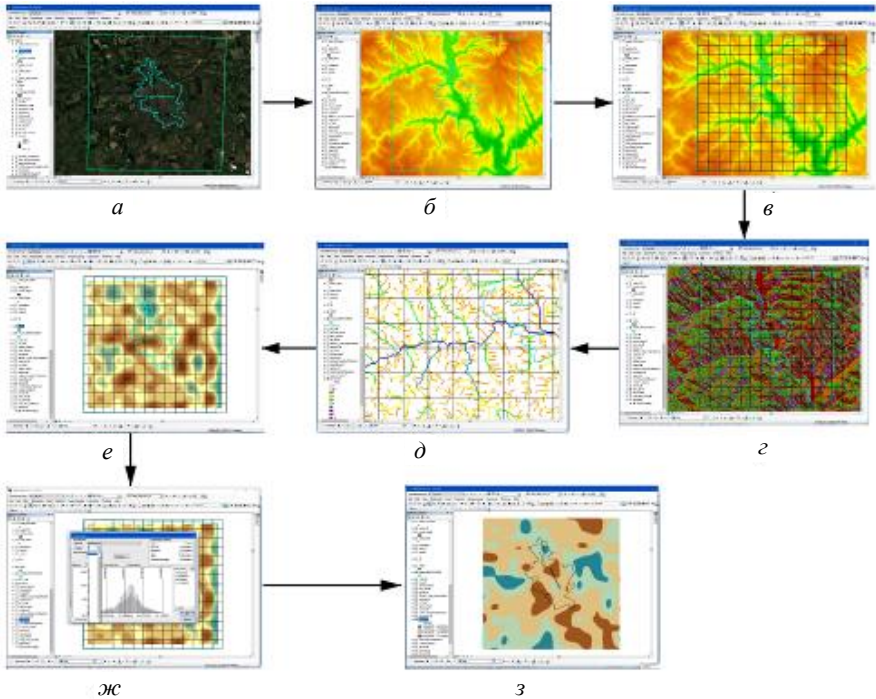


Рис. 8. Послідовність побудови карти просторової щільності лінементів: *a* — територія дослідження; *б* — дані поверхні рельєфу; *в* — створення полігональної сітки; *з* — відновлення поверхні стоків згідно з поверхнею даних рельєфу; *д* — виділення порядків водотоків (лінементів); *е* — побудова карти щільності лінементів; *ж* — перекласифікація геопросторової щільності лінементів за рівнем потенційної радonoвої небезпеки; *з* — результуюча карта щільності лінементів 3-4 порядків

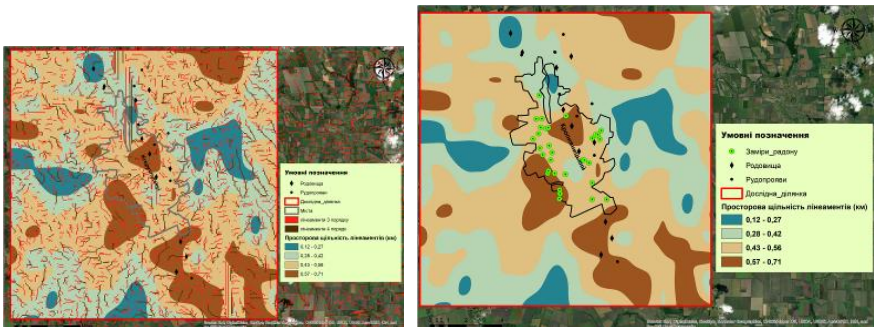
*a**б*

Рис. 9. Просторова щільність лінементів 3-4 порядків (*a*) з вимірами радону в приміщеннях (*б*)

Рівні радонової небезпеки

Рівні небезпеки	Родовища, рудопрояви, точки мінералізації		Вміст урану								Осадовий чохол			
			у породах, $\cdot 10^{-4} \%$		у корі вивітрянвання, $\cdot 10^{-4} \%$		у ґрунтах, $\cdot 10^{-4} \%$		у воді, $\cdot 10^{-6}$ г/л		Потужність осадового чохла, м		Потужність експозиційної дози, мкЗв/г	
	А	А ¹	Б	Б ¹	В	В ¹	Г	Г ¹	Д	Д ¹	Е	Е ¹	Є	Є ¹
1	Непроявлені	1	5–6	1	0,06–0,07	1	0,5–0,9	1	3–6,4	1	≥ 50	1	0,09–0,10	1
2	Мінералізація	2	7–8	2	0,08–0,10	2	1,0–1,4	2	6,5–9,5	2	25–49	2	0,11–0,14	2
3	Рудопрояви	3	9–10	3	0,11–0,12	3	1,5–2,1	3	9,6–12,8	3	10–24	3	0,15–0,20	3
4	Родовища	4	9–10		0,11–0,12	4	1,5–2,1	4	12,8	4	≤ 9	4	0,21–0,33	4
Структурно-геологічні чинники										Відстань від населеного пункту до СЗЗ, км			Потужність дози на висоті 1 м у районі населеного пункту, мкЗв/г	
Просторова щільність розломів достовірних, км/км ²		Просторова щільність розломів недостовірних, км/км ²		Просторова щільність лінеаментів, км/км ²										
				локальних 3, 4		регіональних 5, 6, 7								
Ж	Ж ¹	З	З ¹	И	И ¹	І	І ¹	Ї	Ї ¹	Й	Й ¹			
0–0,124	1	0,11–0,26	1	0,2–0,43	1	0,6–1,52	1	≥ 15 11–	1	0,08–0,09	1			
0,125–0,31	2	0,27–0,41	2	0,44–0,67	2	1,53–3,65	2	14 6–10	2	0,10–0,11	2			
0,32–0,5	3	0,42–0,56	3	0,68–0,9	3	3,66–5,78	3	1–5	3	0,12–0,13	3			
0,51–0,7	4	0,57–0,71	4	0,91–1,14	4	5,79–7,9	4		4	> 0,13	4			

Для побудови прогнозної моделі визначення рівня радононебезпеки територій використовувався метод лінійних дискримінантних функцій. Для цього дані про усі локації було розділено на навчальну та тестову вибірки. Кожна вибірка включала в себе дослідження локацій усіх чотирьох рівнів небезпеки, розділених відповідно на чотири групи. З математичного погляду всі групи розглядалися як сукупність об'єктів з якісними характеристиками, що варіюються.

На підставі цих характеристик визначалася група, до якої належить локація. У випадку класифікації приналежності до однієї з чотирьох груп необхідні три дискримінантні функції вигляду:

$$DF = b_1x_1 + \dots + b_ix_i + \dots + b_px_p + C, \quad (1)$$

де DF – значення дискримінантної функції; x_i – кількісне значення i -ї ознаки; b_i – i -й канонічний коефіцієнт дискримінантної функції (вклад i -ї ознаки в значення функції); p – кількість ознак; C – константа.

Визначення предикторів математичної моделі виконувалося за допомогою критерію Фішера послідовним їх включенням у дискримінантні рівняння. Серед розглянутих чинників радононебезпеки території сім з них виявились інформативними та для яких були розраховані канонічні коефіцієнти за допомогою методу найменших квадратів для поліномів першого і другого порядків.

Результати визначення предикторів математичної моделі та канонічних коефіцієнтів дискримінантних функцій наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти канонічної дискримінантної функції

Предиктори моделі	Функція		
	DF_1	DF_2	DF_3
X_1 – природні поклади урану	0,532	1,588	-0,053
X_2 – уран у породах	1,746	0,047	1,398
X_3 – уран у ґрунтах	1,485	1,352	-0,982
X_4 – розломи достовірні	0,851	-1,338	0,195
X_5 – розломи недостовірні	0,153	-0,845	-0,983
X_6 – лінеamenti локальні 3–4 порядку	0,900	-1,258	0,767
X_7 – відстань від СЗЗ	0,474	0,997	0,776
const C	-14,871	-2,208	-2,934

Отже, визначення рівня радононебезпеки території може бути описано трьома дискримінантними функціями вигляду (1) з коефіцієнтами, взятими з табл. 2:

$$DF_1(X) = 0,532X_1 + 1,746X_2 + 1,485X_3 + 0,851X_4 + 0,153X_5 + 0,900X_6 + 0,474X_7 - 14,871;$$

$$DF_2(X) = 1,588X_1 + 0,047X_2 + 1,352X_3 - 1,338X_4 - 0,845X_5 - 1,258X_6 + 0,997X_7 - 2,208;$$

$$DF_3(X) = -0,053X_1 + 1,398X_2 - 0,982X_3 + 0,195X_4 - 0,983X_5 + 0,776X_6 + 0,776X_7 - 2,934.$$

На підставі значень дискримінантних функцій було побудовано територіальну карту для віднесення нової (прогнозованої) локації до певного рівня радонОВОЇ небезпеки (рис. 10, табл. 3).

У просторі дискримінантних функцій визначено розподіл на області, які встановлюють належність до того чи іншого рівня ПРН. При цьому в межах відповідної області ймовірність відношення до даного рівня вища, ніж для інших. На межах областей ймовірність примежових рівнів однакова.

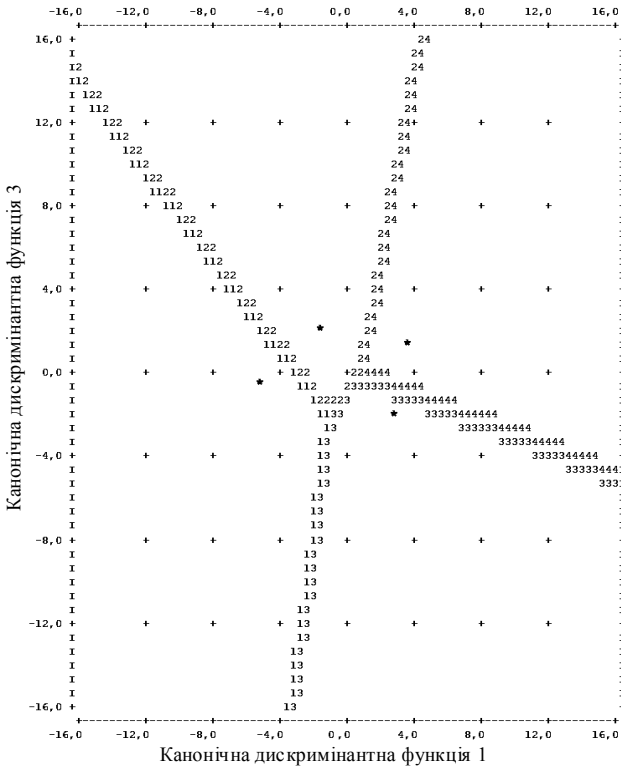


Рис. 10. Розподіл областей рівнів потенційної радононебезпеки в просторі дискримінантних функцій

Мірою вдалого розподілу було визначено канонічні кореляційні коефіцієнти r між розрахованими значеннями дискримінантних функцій і показниками належності до відповідних рівнів ПРН (табл. 4). Отримані власні значення кореляцій наведено в порядку зменшення їх величин.

Величина власного значення пов'язана з дискримінантними можливостями функції: що більше власне значення, то краща відмінність. Оцінку щільності зв'язку r було встановлено на основі шкали Чеддока.

Таблиця 3

Символи, що використовуються на територіальній карті

Символ	Група	Мітка
1	1	Перший (найнижчий) рівень ПРН
2	2	Другий рівень ПРН
3	3	Третій рівень ПРН
4	4	Четвертий (найвищий) рівень ПРН
*		Вказує на центр групи

Власні значення кореляцій дискримінантних функцій

Функція	Власне значення	Пояснена дисперсія, %	Канонічна кореляція r
DF_1	14,71	80,90	0,97
DF_2	3,23	17,70	0,87
DF_3	0,24	1,30	0,44

Результати класифікації для навчальної вибірки наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати класифікації об'єктів навчальної вибірки

Рівень потенційної радонової небезпеки		Передбачена належність до рівня ПРН				Разом
		Перший (найнижчий) рівень ПРН	Другий рівень ПРН	Третій рівень ПРН	Четвертий (найвищий) рівень ПРН	
Вихідні, %	Перший (найнижчий) рівень ПРН	10	0	0	0	10
	Другий рівень ПРН	0	9	0	0	9
	Третій рівень ПРН	0	0	9	1	10
	Четвертий (найвищий) рівень ПРН	0	0	0	11	11

Аналіз результатів класифікації за розробленою математичною моделлю показав, що всі об'єкти (локації) 1-ї, 2-ї та 4-ї груп класифіковано коректно. Під час класифікації об'єктів 3-ї групи коректно були визначені лише 90 % випадків, а 10 % – віднесені до іншої групи. Таким чином, точність визначення ступеня потенційної радононебезпеки за даними показників навчальної вибірки становила $97,50 \% \pm 0,94$. Отримані власні значення першої та третьої дискримінантних функцій, що дорівнюють 14,71 та 0,24, вказують на те, що класифікаційні можливості першої дискримінантної функції майже в 61 раз більші за третю. Аналізуючи значення коефіцієнтів канонічної кореляції для першої та третьої дискримінантних функцій (0,97 та 0,44 відповідно), можна зробити висновок, що існує досить високий зв'язок між рівнем потенційної радонової небезпеки території і значенням першої дискримінантної функції, що підтверджується відсотком дисперсії цієї функції – 80,9 %.

Під час проведення тесту λ -Уїлкса було визначено значущий результат між першою і третьою функціями ($p < 0.001$) та не значущий результат між останніми функціями. Відповідно можна зробити висновок, що для визначення ступеню потенційної радононебезпеки території достатньо використовувати першу DF_1 та третю DF_3 дискримінантні функції. Графік розмежування областей у скороченому просторі DF показано на рис. 11.

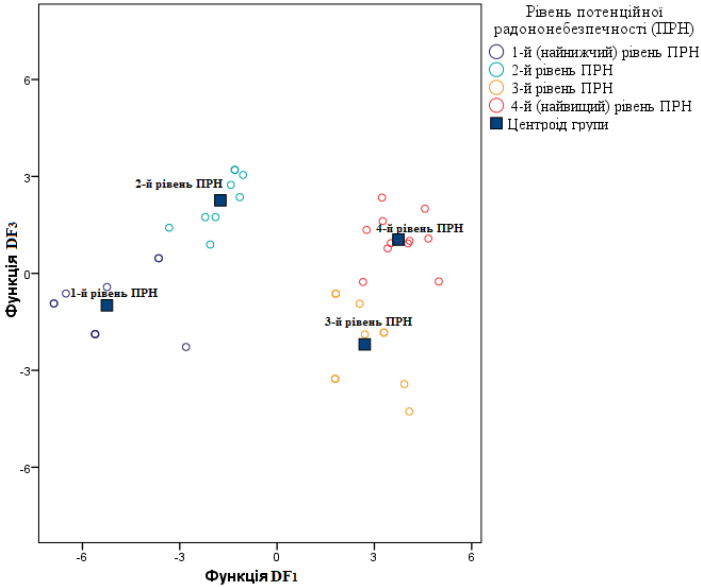


Рис. 11. Розподіл областей рівнів ПРН за дискримінантними функціями DF_1 та DF_3

Під час перевірки розробленої математичної моделі на тестовій вибірці було встановлено, що для усіх чотирьох груп прогноз було зроблено правильно (табл. 6).

Таблиця 6

Результати класифікації об'єктів тестової вибірки

Рівень потенційної небезпеки		Передбачена належність до групи				Разом
		Перший (найнижчий) рівень ПРН	Другий рівень ПРН	Третій рівень ПРН	Четвертий (найвищий) рівень ПРН	
Вихідні, %	Перший (найнижчий) ПРН	100	0	0	0	100
	Другий ПРН	0	100	0	0	100
	Третій ПРН	0	0	100	0	100
	Четвертий (найвищий) ПРН	0	0	0	100	100

Таким чином, загальний відсоток коректного прогнозування рівня потенційної радонебезпеки території за розробленою математичною моделлю становитиме $97,50\% \pm 0,94\%$ у випадку, якщо статистичний розподіл даних нового об'єкта класифікації не змінюється.

У шостому розділі розглянуто питання дистанційного картування індикаторів небезпеки територій на детальному (об'єктовому) рівні окремих екологічно небезпечних об'єктів території уранової спадщини України.

Виконано оцінювання геодинамічних умов та температурних трендів земної поверхні з метою встановлення можливості використання їх визначених (*extracted*) параметрів для подальшого оцінювання якісної та кількісної екологічної небезпеки території урановидобування за методиками обробки даних дистанційного зондування Землі. Проведено дистанційне картування деградації земель навколо об'єктів уранової спадщини впродовж 30 років.

Для аналізу деформації земної поверхні використовувались радіолокаційні супутникові продукти *Sentinel-1 SLC (Single Look Complex)*, отримані з кроком 28 днів за період з 2 січня 2016 року по 28 квітня 2019 року. Для виділених локацій трьох діючих шахт було визначено по дві окремих ділянки спостереження (*ROI – Region of Interest*, область інтересу): *ROI 1 (рожевого кольору)* – це ділянки навколо шахтних стовбурів, розташування ймовірних зон проходження гірничих виробок у місцях, де найбільш очікувані вразливі зони щодо деформації земної поверхні, та *ROI 2 (жовтого кольору)* – контрольні, за межами локацій самих шахтних майданчиків для порівняння з *ROI 1* (рис. 12, а, б, в).

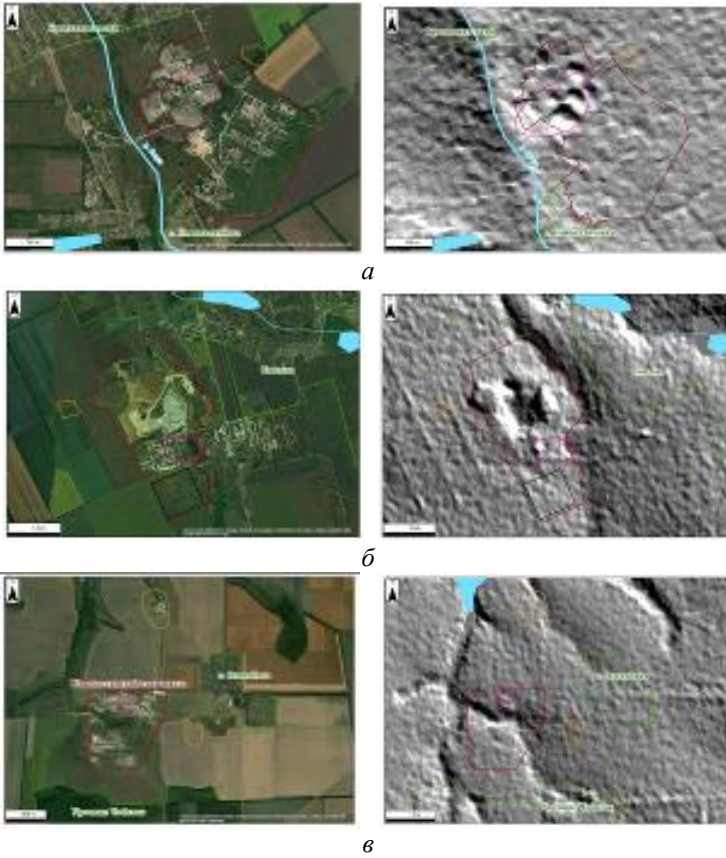
За результатами проведеного аналізу часових серій інтерферометричних прецизійних моделей місцевості одержано просторові розподіли таких параметрів поверхневої геодинаміки території дослідження: середні значення за весь період спостережень, середньомісячний приріст, характерний період коливань (період першої найбільш значущої гармоніки) і відношення амплітуд першої та другої значущих гармонік. Два перших параметри характеризують лінійний тренд, два останніх – періодичну складову геодинаміки в кожній точці території дослідження. Виділені тестова та контрольна ділянки спостережень, своєю чергою, є показовими для території самих промислових майданчиків шахт та для контрольних ділянок відповідно.

Отже, для виявлення можливого техногенного впливу на поточну геодинаміку земної поверхні було застосовано простий статистичний критерій Крамера–Уелча, який використовується для підтвердження чи спростування гіпотези про належність статистичних вибірок одній генеральній сукупності.

У розглянутому випадку оцінювалася схожість математичних очікувань (з урахуванням середньоквадратичних відхилень (СКВ)) параметрів часових серій всередині тестових та контрольних ділянок для кожної з шахт окремо:

$$T_i(x, y) = \frac{\sqrt{n_x n_y} (\bar{x}_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{n_x \sigma^2(x_i) + n_y \sigma^2(y_i)}}, \quad (2)$$

де $T_i(x, y)$ – значення критерію для тестової (x) і контрольної (y) вибірок за i -м параметром; \bar{x}_i, \bar{y}_i – вибіркові середні i -го параметра для тестової і контрольної вибірок; $\sigma^2(x_i), \sigma^2(y_i)$ – незміщені значення дисперсій i -го параметра для тестової і контрольної вибірок; n_x, n_y – обсяги тестової і контрольної вибірок.



■ локація шахти (*mining site*); ■ населені пункти;
■ тестова ділянка (*ROI 1 – region of interest 1*);
■ контрольна ділянка (*ROI 2 – region of interest 2*)

Рис. 12. Результати обробки матеріалів супутникової радарної інтерферометрії щодо визначення динаміки мезоформ рельєфу для локацій відповідно:

а – Інгільської; *б* – Сполінської; *в* – Новокостянтинівської шахт

Вибірки x та y вважаються такими, що статистично суттєво відрізняються за параметром i , якщо

$$T_i(x, y) > \Phi(1 - \alpha/2), \quad (3)$$

де $\Phi(1 - \alpha/2)$ – квантиль стандартного нормального розподілу; α – заданий рівень значущості.

Зокрема $\Phi(1 - \alpha/2) = 1,96$ якщо $\alpha = 0,05$ та $\Phi(1 - \alpha/2) = 2,58$ якщо $\alpha = 0,01$. Результати вимірювань статистик параметрів часових серій у межах тестових і контрольних ділянок території дослідження зведено до табл. 7.

Статистичні вимірювання параметрів часових серій радарної інтерферометрії

Параметр	Тестова ділянка			Контрольна ділянка			Критерій Крамера–Уелча (α)
	Кількість вимірювань	Середнє значення	СКВ	Кількість вимірювань	Середнє значення	СКВ	
Інгульська шахта							
Середня висота		167,935	1,933		160,834	8,264	
Середньомісячний приріст	13	$1,508 \cdot 10^{-3}$	$0,484 \cdot 10^{-3}$	12	$9,381 \cdot 10^{-3}$	$1,221 \cdot 10^{-3}$	$20,874 > 2,58$ (0,01)
Характерний період		932,582	431,36		832,524	364,344	
Відношення амплітуд		1,647	0,167		1,606	0,186	
Новокосянтинівська шахта							
Середня висота		229,586	1,35		246,238	1,63	
Середньомісячний приріст	10	$12,409 \cdot 10^{-3}$	$3,144 \cdot 10^{-3}$	10	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$1,027 \cdot 10^{-3}$	$10,124 > 2,58$ (0,01)
Характерний період		355,046	212,613		680,151	471,878	Характерний період
Відношення амплітуд		1,268	0,164		1,211	0,077	
Смолінська шахта							
Середня висота		211,27	15,563		228,125	1,049	
Середньомісячний приріст	11	$32,069 \cdot 10^{-3}$	$11,944 \cdot 10^{-3}$	11	$4,148 \cdot 10^{-3}$	$1,291 \cdot 10^{-3}$	$7,708 > 2,58$ (0,01)
Характерний період		255,297	155,7		232,654	95,516	
Відношення амплітуд		1,28	0,147		1,246	0,13	

Найбільш інформативним показником геодинаміки території дослідження виступає середньомісячний приріст висот рельєфу, який і було використано для статистичного оцінювання роздільності тестових та контрольних вибірок. Результати розрахунку значень критерію Крамера–Уелча наведено в табл. 7. Для всіх трьох шахт значення критерію суттєво перевищують порогові, тобто за результатами вимірювань виявлено статистично достовірні відмінності між тестовою та контрольною вибірками.

Для отримання розподілів поверхневої температури досліджуваних територій використовувались дані довгохвильового інфрачервоного діапазону (8–14 мкм) супутника *Landsat-8*, отримані в період 2013–2019 рр. Основними критеріями відбору зображень для дослідження були відсутність хмарності над досліджуваними ділянками та належність зображень до одного спільного сезону для збереження кореляції між даними під час виконання аналізу часових серій даних. Лінійні тренди часової серії дистанційних даних описуються середніми значеннями за весь період аналізу та середніми приростами за певний період. Періодичні складові описуються найбільш значущою частотою або характерним періодом змін, а також їх внеском у повну динаміку досліджуваного процесу.

Для безпосереднього визначення поверхневої температури використовується обернений закон Планка через вираження для спектральної щільності енергетичної яскравості, отриманої супутниковим сенсором:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L_s} + 1 \right)},$$

де L_s – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні; $\varepsilon(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання; $c_1 = 1,191 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² та $c_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К – перша і друга константи теплового випромінювання; λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання, за якою виконується визначення температури.

Величина L_s отримується після атмосферного коригування вхідних даних супутникового знімання. Для максимально точного оцінювання температури дистанційним методом обов'язковим є врахування впливу атмосфери на сонячне випромінювання, оскільки атмосфера містить у собі велику кількість газових та аерозольних фракцій, здатних поглинати, розсіювати та відбивати електромагнітне випромінювання залежно від довжини хвиль.

Принцип розрахунку коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю, заснований на різниці коефіцієнтів теплового випромінювання рослинності та ґрунтів. Після отримання розподілів коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні та скоригованих значень спектральної щільності енергетичної яскравості довгохвильового інфрачервоного діапазону ці дані використовуються у формулі для розрахунку поверхневої температури.

Аналіз часових рядів виконувався для кожного елемента розрізнення дистанційних даних окремо, в результаті чого було отримано чотири просторові розподіли кожного із параметрів часового ряду у вигляді псевдозображень такої самої геометрії, що вихідні знімки (рис. 13).

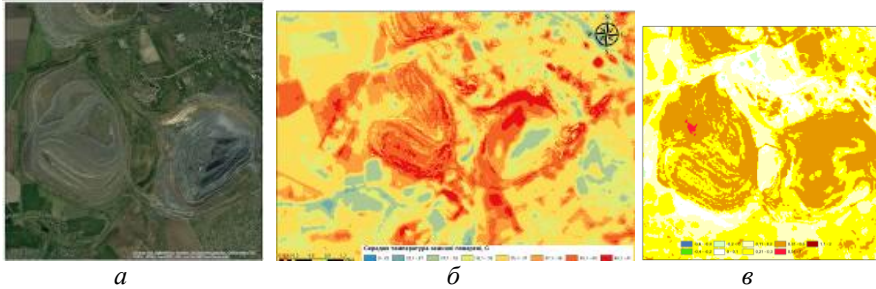


Рис. 13. Локація відпрацьованого родовища :
 а – загальний вигляд; б – середня температура земної поверхні;
 в – середньорічний приріст температури земної поверхні

Під час аналізу проведено вимірювання чотирьох основних параметрів одержаних часових рядів дистанційних даних: середнього значення поверхневої температури за увесь період, середнього приросту поверхневої температури на фіксованому інтервалі часу, характерного періоду найбільш значущої періодичної компоненти та вкладу коливальних визначеного періоду в загальну динаміку часового ряду.

Для виявлення змін, що характеризують деградацію земель навколо об'єктів уранової спадщини, окрім багатоспектральних зображень середньої просторової розрізненості супутникової системи *Landsat*, залучалися допоміжні геопросторові дані: цифрова модель рельєфу місцевості, усереднені характеристики ґрунтів (щільність ґрунту 1,1–1,4 г/см³; розмір структурних часток ґрунту 0,5 мм; ерозійний коефіцієнт 0,28 (мм/міс)⁻¹; гідрологічний показник (74–85) та кліматичні характеристики (середньомісячні опади 367 мм та середня швидкість вітру 5,2 м/с) [11–13; 21].

Зміни рослинного покриву з використанням супутникових знімків визначалися стандартними методами. При цьому було використано модифікований ґрунтово-скорегований вегетаційний індекс MSAVI.

Індекс MSAVI F_v розраховується за формулою:

$$F_v = \frac{2E_n + 1 - \sqrt{(2E_n + 1)^2 - 8(E_n - E_r)}}{2},$$

де E_n та E_r – оптичні сигнали багатоспектрального зображення у інфрачервоному і червоному діапазонах.

Паралельно оцінювалась повна ерозія $z = z_s + z_w$ та картувалися її зміни. Відсоток покриття рослинністю v розраховувався безпосередньо за вихідними багатоспектральними супутниковими знімками, а нахил місцевості – за ЦМР SRTM v4 та ASTER GDEM v2.

Оцінювання деградації земель проводилось шляхом геоінформаційного моделювання за діаграмою обробки даних (рис. 14). На першому етапі оброблення виконувалось за двома паралельними потоками для отримання часових трендів показників деградації земель.

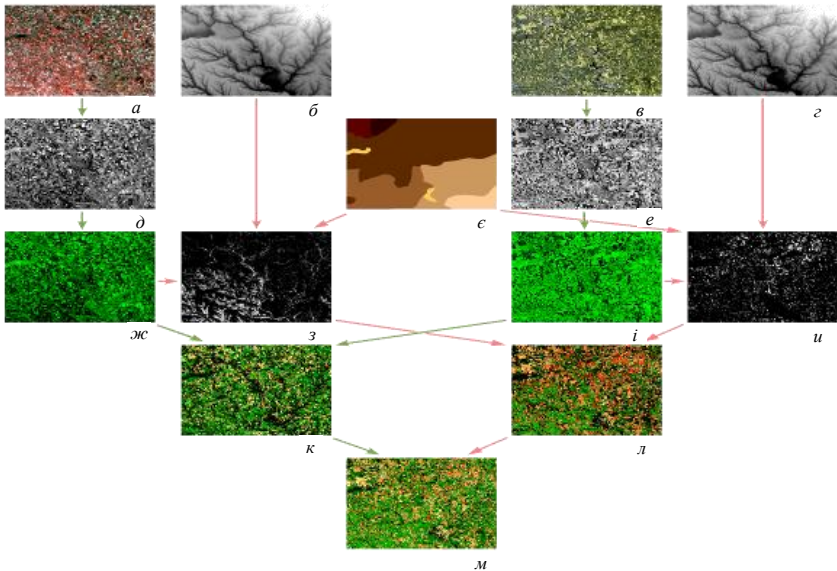


Рис. 14. Діаграма оброблення даних під час оцінювання деградації земель:
a, в – багатоспектральні зображення; *ж, і* – карти рослинного покриття;
д, е – MSAVI; *б, з* – цифрова модель рельєфу місцевості; *з, и* – карти схилів території; *к* – зміни рослинного покриття; *л* – зміни ґрунтової ерозії;
м – результуюча карта деградації земель

Парціальні класифікації першого рівня зливаються у прикінцеву класифікацію Байєсівським методом, що в результаті надає результуючу карту деградації земель (рис. 14, *м*) території дослідження. Результати оброблення космічних знімків надали можливість отримати серію результуючих карт деградації ґрунтово-рослинного покриття навколо урановидобувного виробництва. Інтерпретацією отриманих даних визначено сім класів деградації земель – від сильної деградації до значного покращення стану земельного покриття (рис. 15).

Аналіз збільшених фрагментів карти деградації земель показав розташування ділянок з низьким, помірним та високим рівнем деградації земель, що становить від 20 до 40 % території дослідження.

В умовах значної антропогенної перетворюваності визначення територій з високим ступенем деградації земельного покриття може стати підґрунтям під час прийняття управлінських рішень та обґрунтованого планування територій у техногенно навантажених регіонах.

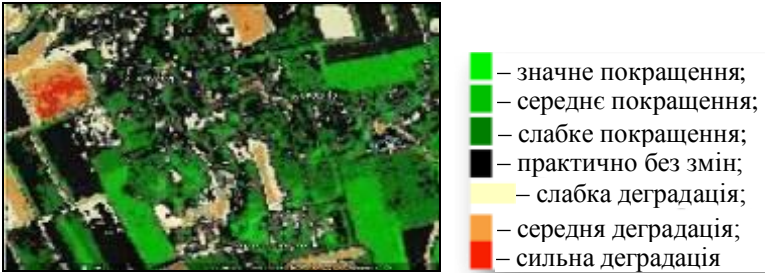


Рис. 15. Деградація земель в районі розташування діючих шахт (фрагмент, локація Смолінської шахти)

Таким чином, для визначення індикаторів небезпеки локацій об'єктів уранової спадщини на детальному (об'єктовому) рівні доведено доцільність і перспективність використання дистанційних методів та геопросторового аналізу для подальшого розвитку дистанційного екологічного моніторингу вразливості земної поверхні.

У **сьомому розділі** розглянуто питання потенційного пилового забруднення від відвалів уранових родовищ альбітитової формації на основі їх речовинного складу та оцінки дози і радіаційного ризику опромінення населення від надходження радіонуклідів в атмосферу. Визначення екологічної безпеки території з техногенно-підсиленими джерелами природного походження, наявність відвалів відходів урановидобування та пилове забруднення приземних шарів атмосфери і земної поверхні є важливою і актуальною регіональною проблемою. Пилове забруднення на промислових майданчиках шахт і за їх межами відбувається внаслідок вентиляційних процесів, дроблення вміщуючих порід, транспортних перевезень, а також за рахунок довготривалого існування самих породних відвалів низькоактивних відходів як техногенно-підсилених джерел природного походження.

Визначення дози і ризику опромінення людини від надходження радіонуклідів в атмосферу виконано з використанням програмного комплексу CAP-88, версія 4.0.1.17 (2019), який розрахований на оцінку хронічного опромінення низького рівня. Вихідні метеопараметри для моделювання запозичені з міжнародної бази даних (*World Weather resource*). Розраховану розу вітрів для м. Кропивницький наведено на рис. 16. Вона використовувалась при побудові вихідного метеофайла для проведення розрахунків по відвалах територій трьох досліджуваних урановидобувних шахт. На рис. 16 суцільною кривою наведено використовуваний частотний розподіл напрямків швидкостей вітру (роза вітрів для напрямку «куди»), а пунктирною кривою – тестовий розподіл потужностей доз для умовного точкового джерела в центрі відвалу. Отриманий збіг за формою рози вітрів з розподілом доз є доказом коректності завдання вихідних метеоданих.

Для розрахунків взято середнє значення пиловиносу з породних відвалів, що приблизно дорівнює величині $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ т} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$. Послідовність визначення площі відвалів за допомогою даних супутника *Sentinel-2* від 07.02.2019 та точних даних рельєфу земної поверхні SRTM (2000) зображено на рис. 17.

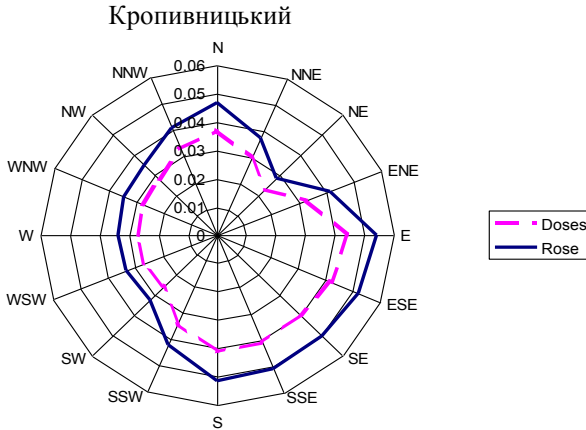


Рис. 16. Розрахована роза вітрів для 16-ти геодезичних румбів

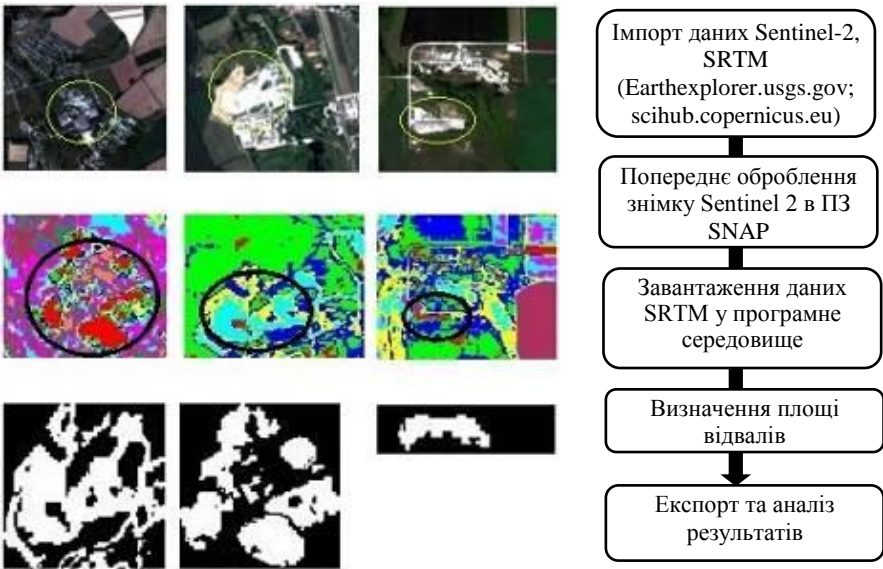


Рис. 17. Послідовність визначення площі відвалів шахт

Розміри породних відвалів шахт та середній вміст ізотопів урану і торію в породах, що містять уранове зруденіння, наведено в табл. 9.

Під час проведення розрахунків відвали шахт розглядалися як кругові площинні джерела винесення пилу з радіусами, наведеними в табл. 9. Розрахунки проводилися для 20 значень радіуса в кожному з 16 румбів. За розрахованими значеннями будувалися ізолінії середньорічних інгаляційних доз. Внутрішнє опромінення від продуктів харчування не враховувалося.

Таблиця 9

Характеристика породних відвалів урановидобувних шахт

Шахта	Площа		Радіус, м	U у породах, г/т	Th у породах, г/т
	м ²	км ²			
Інгульська (Мічурінське, Центральне)*	265032,45	0,2650	290	10,0	1,4
Смолінська (Ватутінське)*	243721,8	0,2437	278,5	16,0	32,1
Новокостянтинівська (Новокостянтинівське)*	23711,85	0,0237	87	20,8	37,9

* – назви родовищ, які розробляються

На рис. 18 зображені в плані майданчики, обмежені квадратом зі стороною 2,2 км, у центрі яких у вигляді кола зображені площі відвалів Інгульської, Смолінської та Новокостянтинівської шахт; наведені ізолінії середньорічних доз унаслідок винесення пилу з породних відвалів шахт. Для кожної з досліджуваних шахт побудовано чотири ізолінії середньорічних доз. Дослідження показали, що радіаційний ризик максимальний поблизу границі відвалів. Розглянемо для прикладу Смолінську шахту (рис. 18, б).

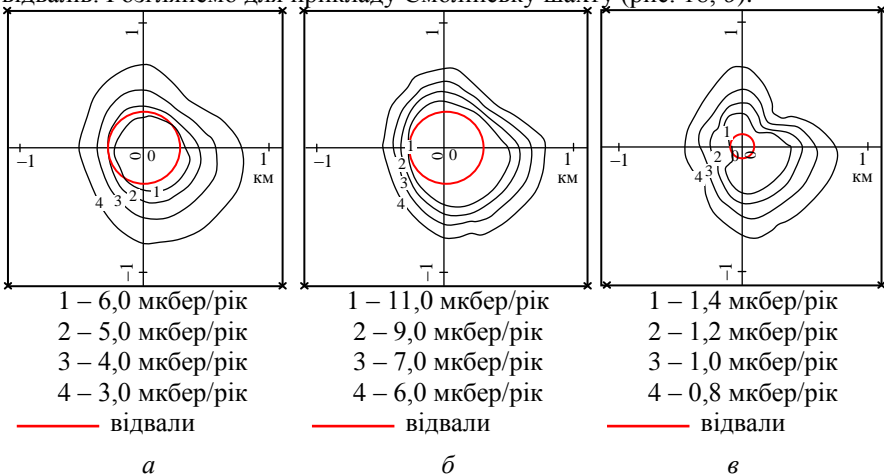


Рис. 18. Ізолінії середньорічних доз унаслідок винесення пилу з відвалів:
а – Інгульської; б – Смолінської; в – Новокостянтинівської шахт

Для цієї шахти побудовано чотири ізолінії середньорічних доз зі значеннями величин 11, 9, 7, 6 мкбер/рік. На границі відвалу за рахунок винесення пилу людина може отримати дозу ~ 11 мкбер/рік. За рахунок переважаючих напрямків вітру ізолінії доз витягнуті в напрямку на південний схід. На відстані 0,8 км від центру відвалу дози знаходяться на рівні ~ 6 мкбер/рік. Дози від винесення пилу в районі відвалів Смолінської шахти (~ 11 мкбер/рік) трохи вище, ніж у районі відвалів Інгульської шахти (~ 6 мкбер/рік). Це пояснюється різницею вмісту урану і торію у відвалах шахт. Оскільки відвали Новокосянтинівської шахти почали складувати набагато пізніше відвалів попередніх двох, то розміри відвалів і дози, які може отримати людина від винесення пилу, значно менші. Проте збільшення площі відвалів призведе до збільшення доз для населення.

На рис. 19 наведено розрахункову залежність радіаційного ризику людини за все життя від відстані по радіусу в напрямку на схід для відвалів трьох шахт.

Із наведених даних випливає, що максимальний ризик смертності може очікуватися поблизу відвалів Смолінської шахти, небагато менший ризик – поблизу відвалів Інгульської шахти, ще значно менший біля відвалів Новокосянтинівської шахти. Величина радіаційного ризику поблизу границі відвалів перебуває на рівні приблизно 10^{-9} рік $^{-1}$.

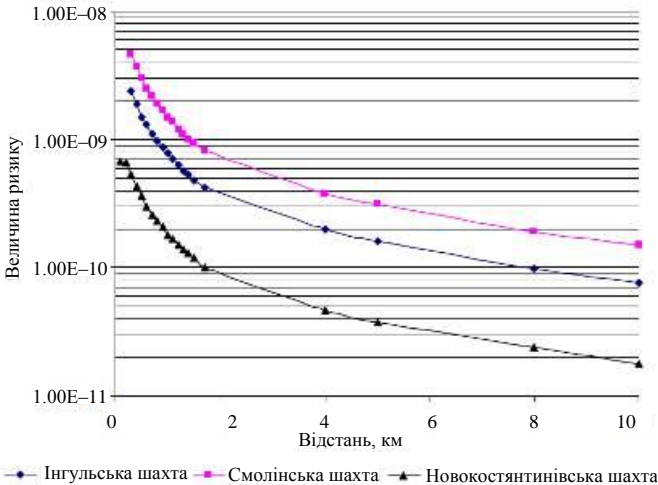


Рис. 19. Залежність величини радіаційного ризику від відстані до центру відвалів

Прижиттєвий радіаційний ризик від викиду пилу з відвалів шахт нехтовно малий. У національних нормативних документах зазначається, що ризик нехтовно малий, якщо очікувана ймовірність захворюваності або смертності менше за 10^{-6} рік $^{-1}$ або $5 \cdot 10^{-5}$ за все життя.

Потенційну небезпеку запиленості повітря розглянуто на прикладі довготривалого функціонування уранової шахти Інгульська, що розташована на південно-східній околиці міста Кропивницький, за літній період з

використанням рози вітрів 2019 р. Загалом було розглянуто та проаналізовано 16 чинників, що впливають на потенційну загрозу запиленості повітря для 27 прогнозованих ситуацій (табл. 10). Усі можливі ситуації було розподілено на дві групи: перша група – з низьким та друга група – з високим рівнем потенційної загрози запиленості повітря.

Таблиця 10

Чинники, що впливають на потенційну загрозу запиленості повітря

Номер з/п	Рівень загрози	Техногенно-антропогенні чинники																	
		у межах СЗЗ (територія уранової шахти)						населені пункти											
		площа відвалів м ²		У у пилюватій фракції відвалів, %			фракція ≥ 0,25 у пробі з відвалів, %		відстань від СЗЗ, км		потужність дози на висоті 1 м, мкЗв/г								
		А	А ¹	Б	Б ¹	В	В ¹	Г	Г ¹	Д	Д ¹								
1	1	130 000–160 000	1	< 0,005	1	< 5	1	> 5	1	0,08–0,09	1								
2	1	161 000–190 000	2	0,005–0,01	2	5–9	2	3,1–5	2	0,10–0,11	2								
3	2	191 000–265 000	3	0,02–0,03	3	10–14	3	2,1–3	3	0,12–0,13	3								
4	2	≥ 265 000	4	0,04–0,06	4	> 15	4	1–2	4	> 0,13	4								
Кліматичні чинники																			
ПнЗ		Пн		ПнС		ПдС+С		Пд		ПдЗ		З		Швидкість вітру, м/с			Опади (Д+Г)		
Е	Е ¹	Є	Є ¹	Ж	Ж ¹	З	З ¹	И	И ¹	І	І ¹	Ї	Ї ¹	Й	Й ¹	И ²	И ³	К	К ¹
11-9	1	11-9	1	11-9	1	< 2	1	< 2	1	11-9	1	11-9	1	≤ 2	1	30-22	1	14-9	1
8-5	2	8-5	2	8-5	2	4-2	2	4-2	2	8-5	2	8-5	2	4-3	2	21-14	2	8-5	2
4-2	3	4-2	3	4-2	3	8-5	3	8-5	3	4-2	3	4-2	3	6-5	3	13-6	3	5-2	3
< 2	4	< 2	4	< 2	4	11-9	4	11-9	4	< 2	0	< 2	0	≥ 6	4	< 5	4	< 2	4

У результаті використання покровокового дискримінантного аналізу були визначені три інформативні ознаки та побудована математична модель визначення рівня потенційної загрози запиленості повітря, яку можна навести у вигляді:

$$F_1(X) = 13,989 \cdot X_1 - 10,018 \cdot X_2 + 10,514 \cdot X_3 - 8,640; \quad (4)$$

$$F_2(X) = 43,502 \cdot X_1 - 35,830 \cdot X_2 + 33,664 \cdot X_3 - 64,748,$$

де X_1 – площа відвалів; X_2 – уран у пилюватій фракції відвалів; X_3 – напрямок вітру південно-східний та/або східний.

Отримані значення функцій $F_1(X)$ і $F_2(X)$ порівнюють між собою й за виконання умови $F_1(X) > F_2(X)$ можна говорити про низький рівень потенційної загрози запиленості повітря.

Точність класифікації, відповідно до отриманої моделі, оцінена на підставі порівняння збігів між прогнозованою і фактичною групами та становила $96,30 \% \pm 3,60 \%$. Розроблена математична модель коректна і дає можливість визначити рівень потенційної загрози запиленості повітря у $96,30 \% \pm 3,60 \%$ усіх випадків.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальної проблеми підвищення рівня екологічної безпеки територій уранової спадщини з техногенно-підсиленими джерелами природного походження та урахуванням потенційної радононебезпеки. Результати дослідження дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Аналіз світового досвіду показав, що забезпечення екологічної безпеки територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження слід розглядати в аспекті радіаційної небезпеки при видобуванні корисних копалин, що містять радіоактивні речовини, та радонової небезпеки від джерел переважно природного походження. Важливість радонової проблеми на національних рівнях широко сприйнята у світі. Міжнародні стандарти рекомендують визначати радононебезпечні локації, де надходження радону в будівлі очікується вище, ніж на інших територіях. На сьогодні в Україні відсутній національний план дій щодо зниження радіаційних ризиків від радону. Інформація щодо радононебезпеки території України відсутня на Європейських картах природної радіації.

2. Розроблено методологію, що включає теоретичні та практичні дослідження, зокрема методи дистанційного зондування Землі під час вивчення просторових особливостей трансформації довкілля в урановидобувних регіонах; методи геопросторового аналізу для картування чинників радононебезпеки територій; метод дискримінантних функцій для визначення рівня радононебезпеки території; методи теорії ймовірностей та математичної статистики для оброблення результатів вимірювань та моделювання.

3. Науково обґрунтовано критерії визначення територій уранової спадщини у форматі «*post-uranium legacy sites*». Визначено дев'ять локацій у межах Кіровоградської урановорудної субпровінції: території відпрацьованих уранових родовищ шахтним способом та методом підземного свердловинного вилуговування, діючих урановидобувних та переробних підприємств, що використовувались у минулому «*affected by past practices*», де рівень радіоактивності помітно перевищує фоновий і значення потужності еквівалентної дози досягають 350 мкЗв/год , а компоненти довкілля характеризуються підвищеним вмістом урану (гірські породи – до $40\text{--}53 \text{ г/т}$; ґрунти – до $0,5\text{--}1,9 \cdot 10^{-4} \%$; вода – $5 \cdot 10^{-6} \text{ г/л}$ – $9 \cdot 10^{-2} \text{ г/л}$), продуктів його розпаду та супутніх елементів.

4. Виділено та узагальнено 13 чинників радонової небезпеки (природні поклади урану; вміст урану в гірських породах, корі вивітрювання, ґрунтах, воді; потужність та гамма-активність порід осадового чохла; просторова щільність розломів достовірних і недостовірних та лінеamentів 3,4 та 5,6,7 порядків; відстань від санітарно-захисної зони видобувного підприємства;

потужність дози на висоті 1 м) для ідентифікації радононебезпечних зон у межах територій суб'єктів господарювання на локальному рівні.

5. Аналіз чинників радонової безпеки надав можливість розробити класифікацію потенційних рівнів радонової безпеки. Виділено чотири рівні радонової безпеки: *перший* – локації, розташовані в зонах з найменшою просторовою щільністю розломів 0,11–0,26 км на 25 км² та лінеаментів 3–4 порядків 0,2–1,52 км на 1 км², часто з найпотужнішим осадовим чохлам; *другий* – з просторовою щільністю розломів 0,27–0,41 км на 25 км² та лінеаментів 1,53–3,65 км на 1 км²; *третій* – з просторовою щільністю розломів 0,42–0,56 км на 25 км² та лінеаментів 3,66–5,78 км на 1 км²; *четвертий* – локації найвищого рівня радонової безпеки, зосереджені в зонах з найбільшою просторовою щільністю розломів 0,57–0,71 км на 25 км² та лінеаментів 3–4 порядків 5,79–7,9 км на 1 км², де компоненти доквілля характеризуються найвищим вмістом урану та продуктів його розпаду.

6. Розроблено математичну модель визначення рівня радонобезпеки територій з використанням методу лінійних дискримінантних функцій. Аналіз 13 чинників радонової безпеки дозволив виділити сім найбільш інформативних для моделювання. Модель дозволяє у 97,50 % ± 0,94 % правильно класифікувати рівень потенційної радонової безпеки в разі незмінності статистичного розподілу даних нового об'єкта класифікації.

7. Обґрунтовано доцільність і перспективність використання часових серій даних радарної інтерферометрії земної поверхні та часових серій даних дистанційної термометрії земної поверхні як індикаторів екологічної небезпечності територій на об'єктовому рівні.

8. За результатами оброблення багатоспектральних космічних знімків та геопросторового моделювання створено серію тематичних карт деградації ґрунтово-рослинного покриву в межах локацій об'єктів території уранової спадщини України.

9. Дослідження унікальних породних відвалів урановидобування Кіровоградської урановорудної субпровінції трьох шахт – Інгульської, Смолінської, Новокосянтинівської дозволили визначити їх як джерела запиленості приземних шарів атмосферного повітря дрібнодисперсним пилом (менше 0,25 мкм), який містить уран, продукти його розпаду та супутні елементи. При цьому проведено розрахунки площі відвалів з використанням даних супутника *Sentinel-2* та цифрової моделі рельєфу земної поверхні (*SRTM*, 2000). Результати комплексних досліджень виявили основні шляхи для прогнозування потенційної безпеки запиленості повітря (на прикладі промислового майданчика Інгульської шахти). Визначено дози опромінення і ризик смертності від пилового надходження радіонуклідів в атмосферу від породних відвалів. Встановлено, що найбільша доза опромінення, яку може отримати людина, дорівнює 11 мкбер/рік. Доведено, що прижиттєвий радіаційний ризик від надходження радіоактивного пилу в атмосферу дорівнює 10⁻⁹ рік⁻¹ і є зневажливо малим. Радіаційний ризик максимальний поблизу межі відвалів. Збільшення площі відвалів призведе до збільшення доз для населення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Літогенез і гіпогенне рудоутворення в осадових товщах України: монографія / В. О. Шумлянський, К.І. Деревська, Т.В. Дудар, О.М. Івантишина, А.Г. Субботін, М.В. Безугла. *Наукові праці Інституту фундаментальних досліджень*. Вип. 6. Київ: Знання України, 2003. 271 с. *Особистий внесок*: геолого-петрографічний аналіз порід, що вміщують гіпогенне зруденіння: розділи 2.2; 2.3; 3.1; 3.4.

2. Уранові руди України. Геологія, використання, поводження з відходами виробництва: монографія / Г. В. Лисиченко, Ю.П. Мельник, О.Ю. Лисенко, Т.В. Дудар, Н.В. Нікітіна. *Проект «Наукова книга»*. Київ: Наукова думка, 2010. 221 с. *Особистий внесок*: характеристика родовищ урану, нормативно-правове забезпечення щодо поводження з радіоактивними відходами видобутку і перероблення урану: розділи 1(1.1–1.4); 6(6.1; 6.2.2); 8 (8.1; 8.2).

3. Dudar T. V., Lysychenko G. V., Buhera M. A. Uranium resources of Ukraine: geology, mineralogy, and some mining aspects: monograph. *Lambert Publishing House*. Riga, 2018. 100 p. *Особистий внесок*: формулювання ідеї, змісту монографії, викладення основного матеріалу.

Публікації у наукових фахових виданнях України

4. Гидрогенное рудообразование в фанерозое Украины / В. А. Шумлянський, Е.Г. Сушук, О.М. Івантишина, Е.И. Деревская, Т.В. Дудар, М.В. Безуглая. *Інститут геохімії навколишнього середовища*: зб. наук. пр. 2003. Вип.8. С. 82–105.

5. Lysychenko G. V., Dudar T. V. Tendencies in power strategy and ecological safety of Ukraine. *Українсько-Македонський наук. зб.* НАНУ, Нац. б-ка України. Київ, 2008. Вип. 3. С. 143–153.

6. Лисиченко Г. В., Полькова Ю. С., Дудар Т. В. Визначення критеріїв розподілу суб'єктів господарювання за ступенем ризику в правових документах. *Екологічна безпека*. 2008. № 2. С. 9–15.

7. Дудар Т.В., Маслова Ю.В., Савицька М.А., Бугера С.П. Аналіз розвитку урановидобувної галузі та пов'язаних з нею проблем екологічної безпеки. *Наукоємні технології*. 2011. № 3–4 (11–12). С. 87–92.

8. Дудар Т. В., Станкевич С. А., Лоїк І. В., Мартинова О. В. Дослідження деградації земельних ресурсів Калуського району Івано-Франківської області. *Наукоємні технології*. 2012. № 4 (16). С. 116–120.

9. Дудар Т. В., Станкевич С. А., Тимошенко Я. О., Бугера М. А. Дистанційне картування змін ландшафтів під впливом антропогенного навантаження в районі видобування урану. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ–Кременчук, 2013. Вип. 6. С. 82–88.

10. Дудар Т. В., Станкевич С. А., Ведмеденко І. В. Аналіз антропогенних змін ландшафту в районі Смолінської шахти Кіровоградської області із застосуванням космічних зйомок. *Екологічна безпека та природокористування*. 2014. № 15. С. 40–45.

11. Dudar T. V., Buhera M. A., Lysychenko G. V., Englebrecht A. Uranium Deposits Database for the purpose of Nuclear Forensics in Ukraine. *Proceedings of the National Aviation University*. 4'2014. P. 140–145.

12. Dudar T. V., Zakrytnyi Ye. Ye., Buhera M. A. Uranium Mining and Associated Environmental Challenges for Ukraine. *Science-Based Technologies*. 2015. № 1(25). P. 68–73.

13. Тітаренко О. В., Дудар Т. В., Романенко Є. В. Оценка техногенной нагрузки на геологическую среду с использованием линейного анализа и космических съемок. *Экология и промышленность*. 2017. № 2. С. 52–57.

14. Дудар Т. В., Свіденок М. О., Щербей В. Я. Використання топографічних даних та радіолокаційної зйомки для оцінки стану зсувонебезпечних ділянок. *Екологічна безпека та природокористування*: зб. наук. праць. 2017. Вип. 23. С. 28–35.

15. Фомін Ю. О., Деміхов Ю. М., Верховцев В. Г., Дудар Т.В. Форми знаходження елементів-супутників урану у альбітитах Українського щита. *Геохімія техногенезу*: зб. наук. праць ІГНС НАН України. Київ, 2019. Вип. 2 (30). С. 106–118. DOI: 10.15407/geotech2019.30.106.

16. Dudar T. V. Uranium mining and milling facilities legacy sites: Ukraine case study. *Environmental Problems*. Lviv, 2019. Volume 4, Number 4. P. 212–218. DOI: 10.23939/ep2019.04.212.

17. Станкевич С. А., Дудар Т. В., Свіденок М. О. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні. *Екологічна безпека*. № 2/2019 (28). С. 18–23. DOI: 10.30929/2073-5057.2019.2.18-23.

18. Елементи-супутники уранового зруденіння альбітитової формації Українського щита та їх вплив на навколишнє середовище / Ю. О. Фомін, Ю.М. Деміхов, В.Г. Верховцев, Т.В. Дудар, Н.М. Борисова, З.М. Кравчук. *Екологічна безпека та природокористування*: зб. наук. праць. 2020. Т. 33. № 1. С. 42–58. DOI: 10.32347/2411-4049.2020.1.42-58.

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях та у виданнях України, що індексовані у міжнародних наукометричних базах даних

19. Lysychenko G. V., Dudar T. V. Database creation on the monitoring system for the South-Ukrainian Power Complex. *Brownfields. Multimedia Modelling and Assessment*. WIT Press. Southampton, Boston, 2004. С. 109–116. (*Scopus*).

20. Дудар Т. В., Бугера М. А., Лисиченко Г. В. Уранові руди як джерело потенційної небезпеки в разі несанкціонованого обігу радіоактивних матеріалів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. № 4. С. 51–54. (*Scopus*).

21. Stankevich S. A., Dudar T. V., Loik I. V., Neizmailova N. S. Belligerent Landscape Change Analysis using Remote Mapping of Vegetation Cover. *Global Geospatial Information and High Resolution Global Land Cover/Land Use Mapping*. Proceedings of the ISPRS WG IV/2 Workshop. Novosibirsk, 2015. P. 64-71.

22. Stankevich S. A., Dudar T. V., Kozlova A. O., Eindelshstein L. Ya. Remote sensing as information tool for engaging the public to counteract terrorism and disasters. *Engaging the Public to Fight the Consequences of Terrorism and Disasters*.

I. Apostol et al. (Eds). *NATO Science for Peace and Security Series*. Vol. 120. IOS Press, 2015. P. 91–103. DOI: 10.3233/978-1-61499-493-0-91.

23. Станкевич С. А., Дудар Т. В., Коваленко Г. Д., Карташов В. В. Повітряний інфрачервоний моніторинг об'єктів ядерного паливного циклу в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 4. С. 31–36. (*Scopus*).

24. Warfare induced vegetation cover change mapping in east Ukraine using multi temporal satellite imagery / S. A. Stankevich, T. V. Dudar, O. V. Titarenko, I.O. Pestova, N. S. Neizmailova. *Global Geospatial Information and High Resolution Global Land Cover/Land Use Mapping*. Proceedings of the ISPRS WG IV/2 Workshop. Novosibirsk, 2016. SSUGT. P. 62–69.

25. Stankevich S. A., Kharitonov M. M., Dudar T.V, Kozlova A. O. Risk Assessment of Land Degradation Using Satellite Imagery and Geospatial Modelling in Ukraine. *Land degradation and desertification – a global crisis IntechOpen*. 2016. P. 53–77. DOI: 10.5772/62403.

26. Dudar T., Stankevich S., Kovalenko G. Improving pre-emergency situational awareness of nuclear facilities using UAV-borne thermal and radiation measurements. *TIEMS Newsletter Special Edition*. 2017. No. 5. P. 32–35.

27. Dudar T. V., Verkhovtsev V. G., Lysychenko G. V., Tyshchenko Yu. Ye. Radon emanation as a source of radiation hazard to the environment. *Information & Security*. ISIJ International 40. December 2018. (no. 1). P. 51–57. DOI: 10.11610/isij.410x.

28. Urban Area Geodynamic Risk Mapping Using Long-Term Time Series of Sentinel-1 Satellite Radar Interferometry. / S. A. Stankevich, O. V. Titarenko, V. Ye. Filipovich, T. V. Dudar, M. O. Svideniuk. *Information & Security*. ISIJ International 40. December 2018. (no. 1). P. 39–50. DOI: 10.11610/isij.4003.

29. Radon-prone Areas: the Ukrainian Shield case study / T. V. Dudar, V. G. Verkhovtsev, Yu.Ye. Tyshchenko, L. S. Kyselevych, O. V. Buglak. European Association of Geoscientists & Engineers. *Conference Proceedings, 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. Volume 2019. P. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.201902034. (*Scopus*).

30. Land Surface Displacement Study for Kryvyi Rih Mining Area using Radar Interferometry Time Series Analysis/ S. Stankevich, I. Piestova, O. Titarenko, V. Filipovich, T. Dudar, M. Svideniuk. European Association of Geoscientists & Engineers. *Conference Proceedings, Monitoring 2019*. Nov 2019, Volume 2019. P. 1– 6. DOI: 10.3997/2214-4609.201903199 (*Scopus*).

31. European Atlas of Natural Radiation / Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.) European Commission, Joint Research Centre. Publication Office of the European Union, Luxembourg. Printed by Bietlot in Belgium 2019. 190 p. DOI:10.2760/520053.

32. Дудар Т. В., Якименко Г. М., Тітаренко О. В., Свіденюк М. О. Щодо сумарної альфа-активності води підземних джерел водопостачання. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1. (85). С. 62–71. DOI: 10.32918/nrs.2020.1(85).07 (*Scopus*).

Публікації, які додатково висвітлюють зміст дисертації

33. Шумлянський В. А., Дудар Т. В., Журавель Н. Е., Безуглая М. В. Минеральные отложения в трубах из нефтепромысловых скважин северной прибортовой зоны Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України*. 1995. № 12. С. 121–126.

34. Дудар Т. В., Шумлянський В. А. Золотосодержащая герсдорфит-фрейбергитовая минеральная ассоциация нижнего рудного яруса Бобриковского месторождения. *Доп. НАН України*. 1999. № 3. С. 124–127.

35. Шумлянський В. А., Дудар Т. В., Журавель Н. Е., М. В. Безуглая. Современное рудоотложение из рассолов глубоких горизонтов Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України*. 1999. № 7. С. 126–130.

36. Dudar T. V., Lysychenko G. V., Tatarchenko O. S. Assessment of water quality parameters of the Tashlyk cooling pool. *Proceedings of the NAU*. Kyiv, 2008. № 2 (35). С. 69–72.

37. Дудар Т. В., Бугера С. П., Кадошніков В. М., Злобенко Б. П. Бар'єрні властивості природних глинистих мінералів. *Вісник НАУ*. 2009. № 1 (38). С. 56–61.

38. Дудар Т.В., Станкевич С.А., Лоїк І.В. Оцінка еколого-економічного збитку, спричиненого деградацією земель Калуського району Івано-Франківської області. *Сталій розвиток національного господарства: еколого-економічна концепція*: кол. моногр. / за ред. О.І. Маслак, Кременчук: Видавець ПП Шербатих О. В., 2014. С. 204–225.

39. Дудар Т.В., Станкевич С.А., Свіденюк М.О. Дослідження динаміки деградації земель у зоні спостереження ПУЕК дистанційними методами. *Комплексний геоекологічний моніторинг зони впливу Ташилицької гідроакумуляуючої електростанції та Олександрівського водосховища 1998–2016 рр.*: моногр. / за ред. Г. В. Лисиченка. Київ, Наук. думка, 2017. С. 287–291.

40. Сучасний стан виробництва та споживання уранової сировини для потреб ядерної енергетики / Т. В. Дудар та ін. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2019. №1. С. 26–32.

Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях

41. Shumlyanskiy V.O., Bezugla M.V., Dudar T.V., Zhuravel M.Yu. The Radioactive Mineral Encrustations on the Casings in the Oil-Producing Wells in the Dnieper-Donets Depression, Ukraine. *4th International Symposium on the Environmental Geochemistry*. Proceedings: U.S. Geological Survey open-File Report OF97-496. 1997. P. 83.

42. Dudar T.V., Lysychenko G.V. Geological-Ecological Risk in Power Energetics of Ukraine for the Cold War Facilities and Environmental Legacy. *Cold War Environmental Legacies. Environmental Threat Reduction Program*. (Bourgas, Bulgaria, 02-11 May). Brookhaven National Laboratory, Upton. USA, 2001. P. 63.

43. Євдін О. М., Кучма М. Д., Ющенко А. І, Дудар Т. В. Деякі аспекти моніторингу потенційно небезпечних техногенних об'єктів. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. II міжнар. наук.-практ. конф. (Алушта, 11-15 вересня, 2006 р.). Харків, 2006. Т. 2. С. 152–154.

44. Лисиченко Г. В., Полькова Ю. С., Дудар Т. В. Державно-правове регулювання питань щодо системи управління техногенно-екологічною безпекою потенційно небезпечних об'єктів. *Захист довкілля від антропогенного навантаження*: матеріали 4-х Всеукр. Талієвських читань. Харків, 2008. Вип. 2 (18). С. 24–35.

45. Dudar T.V., Kramar O.O. Lysychenko G.V. Knight K., Englebrecht A. Uranium ores of Ukraine for the purpose of nuclear forensics. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Алушта, 10-14 вересня, 2012 р.). Харків, 2012. Т. 1. С. 129–132.

46. Дудар Т. В., Бугера М. А., Тимошенко Я. О. Вплив на довкілля в зонах розробки уранових родовищ України. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*: матеріали 2-го Міжнар. конгресу. (Львів, 19-22 вересня, 2012). Львів «ЗУКЦ», 2012. С. 25.

47. Дудар Т. В. Огляд проблеми виробництва та стану сучасного ринку урану в світі і в Україні. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Алушта, 9-13 вересня, 2013 р.). Харків, 2013. С. 89-92.

48. Дудар Т. В. Станкевич С. А. Бугера М. А. Антропогенні перетворення ландшафтів в зонах видобування урану. *IV Всеукр. з'їзд екологів з міжнар. участю (Екологія/Ecology-2013)*: зб. наук. ст. (Вінниця, 25–27 вересня, 2013 р.). Вінниця: Вид-во-друкарня ДЛЮ, 2013. С. 359–361.

49. Дудар Т. В., Бугера М. А. Uranium Deposit Passport. *Хімічна і радіаційна безпека: проблеми і вирішення*: зб. праць та повідомлень (Ужгород, 27–30 травня, 2014 р.). Київ, 2014. С. 100–101.

50. Дудар Т. В., Станкевич С. А., Лисиченко Г. В. Дистанційне оцінювання ризику деградації родючих чорноземів в районі Південноукраїнської атомної електростанції. *XIV Українська конференція з космічних досліджень: тези доповідей*. (Ужгород, 8-12 вересня, 2014 р.). Ужгород: ІЕФ НАН України, 2014. С. 164.

51. Станкевич С. А., Лисиченко Г. В., Дудар Т. В. Remote Assessment of Chernozem Soils Degradation in the Vicinity of Nuclear Industry Facilities: South-Ukrainian Power-Generation Area Case Study. *Хімічна і радіаційна безпека: проблеми і вирішення*: зб. праць та повідомлень. (Київ, 19–22 травня, 2015 р.). Київ, 2015. С. 44–45.

52. Дудар Т.В., Станкевич С.А., Коваленко Г. Д., Карташов В. В. Застосування інфрачервоного аерознімання для дистанційного контролю радіаційно небезпечних об'єктів. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XI Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 7–11 вересня, 2015 р.). Харків, 2015. С. 183–186.

53. Станкевич С. А., Дудар Т. В., Матвеева О. Л., Ковтун Р. О. Методика картування змін антропогенно навантажених ландшафтів з використанням космічних знімків та геоінформаційних технологій. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку сусільства. Європейський досвід і перспективи*:

матеріали II міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 4–6 листопада, 2016 р.). Львів, 2016. С. 151–152.

54. Дудар Т. В., Станкевич С. А., Пестова І. О. Land degradation case study within uranium mining areas. *Хімічна і радіаційна безпека: проблеми і вирішення*: зб. праць та повідомлень. (Київ, 17–20 травня, 2016 р.). Київ, 2016. С. 63.

55. Dudar T. V., Stankevich S. A. Geocological environment capacity assessment in the vicinity of nuclear fuel cycle facilities. *XVI Українська конференція з космічних досліджень: тези доповідей*. (Одеса, 22–26 серпня, 2016 р.). Одеса, 2016. Р. 165–166.

56. Дудар Т. В., Станкевич С. А., Свіденюк М. О., Щербаченко В. А. Оцінка стану ґрунтово-рослинного покриву в зоні довготривалого впливу Південноукраїнської АЕС. *«Екогеофорум-2017»: Актуальні проблеми та інновації*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 22–25 березня, 2017 р.). Івано-Франківськ, 2017. С. 276–277.

57. Dudar T.V., Piestova I.O., Orlenko T.A. Anthropogenic threats on landscapes in the vicinity of the uranium mine. *Хімічна і радіаційна безпека: проблеми і вирішення*: зб. праць та повідомлень. (Київ, 24–26 травня, 2017 р.). Київ, 2017. С. 69.

58. Dudar T. V. Steppe Landscape Changes Remote Assessment within Nuclear Facilities in Ukraine. *Ecology, environmental protection and balanced environmental management: education – science – production – 2017: abstracts of XX International scientific conference dedicated to the 10th anniversary of the School of Ecology*. (Kharkiv, April 19–22, 2017). Kharkiv, 2017. Р. 89–90.

59. Dudar T. V., Railko V. I. Level of anthropogenic transformation of mining landscapes case study: Kirovograd district. *VI Всеукр. з'їзд екологів з міжнар. участю (Екологія/Ecology-2017)*: зб. наук. ст. (Вінниця, 20–22 вересня, 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 22.

60. Dudar T. V., Stankevich S. A., Svideniuk M. O., Karmanska A.P. Landscape changes in the vicinity of Khmel'nitska nuclear power plant by remote sensing data analysis. *VI Всеукр. з'їзд екологів з міжнар. участю (Екологія/Ecology-2017)*: зб. наук. ст. (Вінниця, 20–22 вересня, 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 23.

61. Zabulonov Yu., Burtnyak V., Lysychenko G., Dudar T. V. Unmanned Aviation for the purpose of Radiation and Environmental Safety. *International Symposium on Sustainable Aviation: Abstract Book* (Kyiv, 10–13 September, 2017). Kyiv, P. 72.

62. Dudar T. V., Verkhovtsev V. G., Lysychenko G. V., Tyshchenko Yu. Ye. Radon as an indicator of geological structure and as a source of radiation hazard to the environment: the case of the Ukrainian shield. *2-nd International workshop on the European Atlas of Natural Radiation: Book of Abstracts*. (Verbania, Italy, 10–17 November, 2017). Ispra, Italy, 2017. Р. 16–17.

63. Дудар Т. В. Геологічне середовище з позиції розвитку та функціонування урановидобувних об'єктів. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XIII між нар. наук.-практ. конф. (Харків, 11–15 вересня, 2017 р.). Харків, 2017. С. 175–181.

64. Stankevich S., Dudar T., Kovalenko G., Zatserkovny V. Aerial monitoring of radwaste storage facilities using thermal and radiation measurements. *Proceedings of XI International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. (Kyiv, 13-16 November, 2018). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2018. CD.

65. Environmental safety of the territory of uranium mining and milling legacy in Ukraine / Т. В. Дудар та ін. *VII-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. (Екологія/Ecology–2019)*: зб. наук. ст. (Вінниця, 25–27 вересня, 2019 р.). Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 51.

66. Дудар Т. В. Уранова спадщина України: екологічні наслідки. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XV міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 9–13 вересня 2019 р.). Харків, 2019. С. 157–161.

67. Dudar T. V., Titarenko O. V., Orlenko T. A. Geoinformation technologies as a tool for territories environmental changes assessment. *Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій.*: наук. праці II міжн. наук.-практ. конф. (Київ-Краків, 19 грудня 2019 р.). Київ НУХТ, 2019. С. 20-23.

68. Dudar T. V. With regard to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in Ukraine. *Priority Directions of Science Development*. Abstracts of III International Scientific and Practical Conference. (Lviv, 28–29 December 2019). Lviv, 2019. P. 225–227.

69. Dudar T. V. Isaenko V. M., Nekos A. N. Ecological safety of disturbed mining lands. *International Scientific Symposium «Sustainable Development – State and Prospects»*. Proceedings. (Lviv-Slavske, 12–15 February, 2020). Lviv, 2020. P. 129-131.

70. Дудар Т. В., Коваленко Г. Д., Фаррахов О. В. Радіоекологічна безпека при видобуванні уранових руд. *XVIII конференція з фізики високих енергій та ядерної фізики*: тези доп. (Харків, 3 березня, 2020 р.). Харків, 2020. С. 108.

АНОТАЦІЯ

Дудар Т. В. Методологічні засади екологічної безпеки територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01. «Екологічна безпека». Національний авіаційний університет. Київ, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми зниження негативних наслідків впливу радононебезпечних проявів на екологічну обстановку навколо урановидобувних та прилеглих територій шляхом вдосконалення методологічних підходів до оцінювання і обґрунтування моделі контролю екологічної небезпеки територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження.

Науково обґрунтовано і визначено території видобування та перероблення уранової сировини у форматі уранової спадщини “*post-uranium*

legacy sites” як радіоактивно забруднені внаслідок антропогенної діяльності в минулому – “*affected by past practices*”, де рівень радіоактивності помітно перевищує фоновий, а компоненти довкілля характеризуються підвищеним вмістом урану, продуктів його розпаду та супутніх елементів. Розроблено метод ідентифікації радононебезпечних зон у межах територій суб’єктів господарювання, який включає класифікацію рівнів потенційної радононебезпеки, враховує природну радіоактивність компонентів довкілля, просторову щільність розломів та лінеаментів та дозволяє у 97,50 % ± 0,94 % правильно класифікувати рівень потенційної радонової небезпеки території.

Обґрунтовано доцільність і перспективність використання часових серій даних радарної інтерферометрії земної поверхні та часових серій даних дистанційної термометрії земної поверхні як індикаторів екологічної небезпеки територій на об’єктовому рівні. За результатами обробки багатоспектральних космічних знімків та геопросторового моделювання створено серію тематичних карт деградації ґрунтово-рослинного покриву в межах локацій об’єктів території уранової спадщини України.

Визначено основні шляхи для прогнозування потенційної небезпеки запиленості повітря, дози опромінення і радіаційного ризику від пилового надходження радіонуклідів в атмосферу від породних відвалів урановидобування. Доведено, що найбільша доза опромінення, яку може отримати людина від надходження радіоактивного пилу в атмосферу, дорівнює 11 мкбер/рік, а прижиттєвий радіаційний ризик дорівнює 10^{-9} рік⁻¹ і є нехтовно малим. Радіаційний ризик максимальний поблизу границі відвалів. Збільшення площі відвалів призведе до збільшення доз для населення.

Ключові слова: екологічна безпека територій, техногенно-підсилені джерела радіоактивності природного походження, радонова небезпека, радіаційна небезпека, уранова спадщина, дистанційне зондування Землі, багатоспектральні космічні знімки.

ANNOTATION

Dudar T.V. Methodological principles of environmental safety for territories with technogenically enhanced sources of natural origin. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 21.06.01 – ecological safety. – National Aviation University. Kyiv, 2020.

The thesis is dedicated to solving the scientific and applied problem of reducing the negative effects of radon hazards on the ecological situation around uranium mining and adjacent areas by improving methodological approach to assessing and justifying the model of environmental hazard control for territories with technogenically enhanced sources of natural origin.

The areas of uranium ore mining and processing from the point of "post-uranium legacy sites» are identified and outlined as affected by past practices and

radioactively contaminated, where the level of radioactivity significantly exceeds the background, the value of the equivalent dose rate reaches $350 \mu\text{Sv} / \text{h}$, and environmental components are characterized by high content of uranium (rocks – up to 40-53 g/t; soils – up to $0.5\text{-}1.9 \cdot 10^{-4}\%$; water – $5 \cdot 10^{-6}\text{g/l} - 9 \cdot 10^{-2}\text{g/l}$), its decay products and associated elements. It is proposed to use remote sensing methods for geospatial modeling of radon-prone areas, first at regional and then at local levels.

The method for identifying radon-prone areas within the territories of economic entities is developed. It includes classification of potential radon hazard levels, takes into account the natural radioactivity of environmental components, spatial density of faults and lineaments, and allows classifying correctly the level of potential radon hazard with $97,50\% \pm 0,94\%$ probability. As a whole 13 radon hazard factors for identification of radon hazardous zones within the territories of economic entities at the local level are identified and generalized. The radon survey can be further prioritized based on potential level identified on geospatial and mathematical modeling data. The basic parameters for the initial mapping stage are proposed to be the faults and the lineaments of the 3-d and 4-th order spatial density. Other parameters are added for more detailed analysis, depending on the particular location under consideration. In a limited number of direct indoor radon measurements, remote methods are supposed to be a good help in identification of potentially radon hazard areas.

It is substantiated that time series of radar interferometry and remote thermometry data of the earth's surface are worth considering as indicators of environmental hazard for mining territories. The analysis of time series of remote sensing data of the study area for long-term trends and periodic components mapping was carried out. The linear trends of the time series of remote sensing data were described by average values for the entire analysis period and average growths for a certain period. Based on the results of processing multispectral space images and geospatial modeling, a series of thematic maps of soil-vegetation cover degradation within the locations of uranium legacy sites in Ukraine were created. At that the methods of remote mapping of land degradation based on the processing of multispectral space images and geospatial modeling for areas around potentially hazardous radiation facilities were further developed.

The main ways to predict the potential hazard from air dust, radiation doses and radiation risk from dust radionuclides intake into the atmosphere from uranium mining rock heaps are identified. It was established that the highest radiation dose that a person can receive is $11 \mu\text{ber}/\text{year}$. It is proved that the lifetime radiation risk from radioactive dust entry into the atmosphere equals to $10^{-9} \text{ years}^{-1}$, and it is negligibly low. The radiation risk is maximum near the boundary of the heaps. Increasing the area of rock heaps will increase the dose to the population.

Key words: *environmental safety, technogenically enhanced sources of natural radiation, radon hazard, radiation hazard, uranium legacy sites, remote sensing of the Earth, multispectral space images.*