

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ,
ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Тамара ДУДАР
«_____» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 101 «ЕКОЛОГІЯ»,
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«ЕКОЛОГІЯ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

**Тема: «Геопросторовий аналіз потенційної радоннебезпеки у місті
Кисві з використанням геоінформаційних технологій»**

Виконавець: здобувач групи ЕК-201М Маковський Микита Дмитрович
(здобувач, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: докт.техн.наук, професор Дудар Тамара Вікторівна
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: _____
(підпис)

Катерина КАЖАН
(П.І.Б.)

Нормоконтролер: _____
(підпис)

Андріан ЯВНЮК
(П.І.Б.)

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій

Кафедра екології

Спеціальність, освітньо-професійна програма: спеціальність 101 «Екологія»,
ОПП «Екологія та охорона навколишнього середовища»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Тамара ДУДАР

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Маковського Микити Дмитровича

1. Тема роботи «Геопросторовий аналіз потенційної радононебезпеки у місті Києві з використанням геоінформаційних технологій»

затверджена наказом ректора від «10» липня 2023 р. №1096/ст.

2. Термін виконання роботи: з 02.10.2023 р. по 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані роботи: знімки поверхні рельєфу супутника ALOS з набору AW3D30, картографічні дані OpenStreetMap.

4. Зміст пояснювальної записки: концепція радононебезпеки територій міст України, геопросторовий аналіз потенційної радононебезпеки у місті Києві з використанням геоінформаційних технологій.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, рисунки.

6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Провести аналіз стану радонової проблеми в Україні з метою визначення її актуальності, зокрема для території міста Києва.	02.10.2023-15.10.2023	
2	Дослідити та обґрунтувати використання дистанційних методів для оцінки потенційної радононебезпеки.	16.10.2023-24.10.2023	
3	Проаналізувати геологічні та геоморфологічні дані, провести на їх основі геопросторове моделювання щільності лінеаментів на території міста Києва.	25.10.2023-22.11.2023	
4	Провести аналіз умов праці на робочому місці та сформулювати рекомендації щодо нормалізації концентрації радону в повітрі робочої зони.	23.11.2023-01.12.2023	
5	Зробити висновки щодо найбільш потенційно радононебезпечних зон.	01.12.2023-06.12.2023	
6	Оформлення дипломної роботи.	07.12.2023-14.12.2023	

7. Консультація з окремого(мих) розділу(ів):

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доцент кафедри БЖД Катерина КАЖАН		

8. Дата видачі завдання: «_____» _____ 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи:

(підпис керівника)

Тамара ДУДАР

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання:

(підпис випускника)

Микита МАКОВСЬКИЙ

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Геопросторовий аналіз потенційної радононебезпеки у місті Києві з використанням геоінформаційних технологій»: 83 с., 21 рис., 4 табл., 82 літературних джерела.

Об'єкт дослідження: виділення і накопичення природного радону.

Предмет дослідження: рівень забруднення повітря на території міста Києва

Мета роботи: виконати попередню оцінку радонової небезпеки міста Києва для подальшої наземної завірки. Визначити локації потенційної радононебезпеки шляхом створення результуючої електронної карт в ArcGIS.

Методи дослідження: оброблення супутникових знімків, аналіз карти рельєфу досліджуваної території, створення та аналіз результуючої електронної карти в ArcGIS.

ГЕОПРОСТОРОВА ОЦІНКА, ПОТЕНЦІЙНА РАДОНОНЕБЕЗПЕКА,
ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, РОЗЛОМНА ТЕКТОНІКА МІСТА КИЄВА,
ALOS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПЦІЯ РАДОНОНЕБЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЙ МІСТ УКРАЇНИ	11
1.1. Основи концепції радононебезпеки територій	11
1.2. Основні відомості про радон.....	14
1.2.1. Історія відкриття.....	14
1.2.2. Фізичні та хімічні властивості радону	15
1.2.3. Процес утворення радону.....	16
1.2.4. Ізотопи радону	18
1.2.5. Накопичення радону в будинках	19
1.2.6. Небезпека радону для здоров'я	22
1.2.7. Методи виявлення радононебезпечних зон	24
1.3. Джерела надходження радону в приміщення.....	25
1.3.1. Природні чинники формування радононебезпеки	26
1.3.2. Антропогенні чинники формування радононебезпеки	28
1.4. Досвід європейських країн та України у протидії радону	30
1.4.1. Європейський підхід щодо радононебезпеки	30
1.4.2. Стан радонової проблеми в Україні	34
1.4.3. Перспективи подальших досліджень радонової проблеми	38
1.5. Висновки до розділу	39
РОЗДІЛ 2. ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПОТЕНЦІЙНОЇ РАДОНОНЕБЕЗПЕКИ У МІСТІ КИЄВІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	42
2.1. Використання дистанційних методів для вирішення екологічних проблем ...	43
2.2. Опис території дослідження.....	43
2.3. Методика геопросторового аналізу щодо виявлення найбільш потенційно радононебезпечних локацій	46

2.3.1. Поняття лінеаментів та розломів	46
2.3.2. Можливості використання ArcGIS10.....	47
2.3.3. Використані первинні матеріали	48
2.4. Алгоритм побудови карти щільності лінеаментів 4-го порядку території міста Києва.....	49
2.5. Алгоритм побудови карти щільності розломів території міста Києва	56
2.6. Аналіз результатів досліджень	59
2.7. Висновки до розділу 2	61
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	63
3.1. Аналіз умов праці на робочому місці.....	63
3.2. Аналіз шкідливих та небезпечних чинників працівника	64
3.3. Рекомендації щодо нормалізації концентрації радону в повітрі робочої зони.	67
3.4. Пожежна безпека.....	68
3.4.1. Правова основа діяльності в галузі пожежної безпеки	68
3.4.2. Перелік протипожежних заходів	69
3.4.3. Встановлення режиму протипожежної безпеки	70
3.5. Висновки до розділу	71
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ...	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ЕД – ефективна доза опромінення;

МКРЗ – Міжнародна комісія з радіаційної безпеки;

ЕРОА – еквівалентна рівноважна об'ємна активність;

ОА – об'ємна активність радону;

ДПР – дочірні продукти розпаду;

НДПР – національний план дій щодо радону;

HERCA – Асоціація керівників європейських компетентних органів з питань радіаційного захисту (Heads of the European Radiological protection Competent Authorities).

ВСТУП

Актуальність теми. Радон і радіоактивні продукти його розпаду роблять основний внесок у радіаційний фон житлових та виробничих приміщень, будучи серйозним джерелом небезпеки для здоров'я працівників шахт і тунелів, а також здоров'я людей загалом через його поширення в ґрунті, підземних водах та широкому спектрі будівельних матеріалів. Вдихання радону людиною у приміщеннях зумовлює ефективну дозу опромінення (ЕД) близько однієї мЗв на рік, тобто половину дози опромінення людей від усіх природних джерел. В окремих приміщеннях вміст радону у повітрі може бути багаторазово підвищено. Деякі люди, не підозрюючи про це, протягом життя систематично одержують за рахунок радону ЕД у десятки мЗв/рік.

За даними Наукового комітету ООН з дії атомної радіації (*НКДАР*), не менше 10% зареєстрованих щороку у світі захворювань на рак легенів викликані радоною радіацією. Радон також виявляється вагомим фактором, що значно збільшує ймовірність серцево-судинних захворювань та неракових захворювань дихальних шляхів. Саме тому проблема радону займає важливе місце у мультидисциплінарних радіоекологічних програмах США, Австралії, Японії та країн Західної Європи.

Сучасні методики дослідження покладаються на безпосереднє виявлення газу на земній поверхні або в повітрі приміщень; непрямі методи дослідження радонебезпеки на сьогоднішній день мають величезні перспективи і дозволять значно полегшити процес виявлення небезпечних зон.

Проблему радонового проникнення в житлові приміщення і радонового захисту будівель досить глибоко і давно досліджено багатьма вченими, такими як Джур. Є. О. [1], Запрудін В. Ф. [2], Броневицький С. П. [3], та ін. Основи забезпечення радіаційної якості житлових будинків України закладено в працях Лося І. П. [4].

Мета і завдання виконання кваліфікаційної роботи.

Мета роботи: виконати попередню оцінку радонової небезпеки міста Києва для подальшої наземної завірки. Визначити локації потенційної радононебезпеки шляхом створення результуючої електронної карти в ArcGIS.

Завдання роботи:

1. Провести аналіз стану радонової проблеми в Україні з метою визначення її актуальності, зокрема для території міста Києва.
2. Дослідити та обґрунтувати використання дистанційних методів для оцінки потенційної радононебезпеки.
3. Проаналізувати геологічні та геоморфологічні дані, провести на їх основі геопросторове моделювання щільності лінеаментів на території міста Києва.
4. Провести аналіз умов праці на робочому місці та сформулювати рекомендації щодо номалізації концентрації радону в повітрі робочої зони.
5. Зробити висновки щодо найбільш потенційно радононебезпечних зон.

Об'єкт дослідження – виділення і накопичення природного радону на території міста Києва.

Предмет дослідження – рівень забруднення повітря на території міста Києва

Методи дослідження. Оброблення супутникових знімків, аналіз карти рельєфу досліджуваної території, побудова карт щільності лінеаментів 4 порядку та розломів на території міста Києва, створення та аналіз результуючої електронної карти в ArcGIS.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше для території міста Києва використано непрямий метод дослідження радононебезпеки з використанням геоінформаційних технологій шляхом створення та подальшого аналізу карт щільності лінеаментів та розломів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані здобувачем результати даної роботи можуть слугувати просторовою основою для інженерно-

екологічних досліджень рівня радононебезпеки шляхом наземної завірки, зокрема у випадку обмеженості ресурсів/часу.

Особистий внесок випускника: Здобувачем самостійно проведено геопросторове моделювання щільності лінеаментів 4-го порядку та глибинних розломів території м. Києва. Створено результуючу електронну карту з визначеними зонами потенційної підвищеної радононебезпеки.

Апробація отриманих результатів. Результати кваліфікаційної роботи доповідалися на XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» (Харків, Україна, 14 вересня 2023).

Публікації. Результати дослідження опубліковані у збірнику статей «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»:

Маковський М. Д., Дудар Т. В., Тітаренко О. В. Дистанційна оцінка потенційної радононебезпеки території м. Києва: XIX Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення». м. Харків. УКРНДІЕП, 2023. С. 252-256. URL: <http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/konfer2023.pdf>

РОЗДІЛ 1

КОНЦЕПЦІЯ РАДОНОНЕБЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЙ МІСТ УКРАЇНИ

1.1. Основи концепції радононебезпеки територій

Концепція радононебезпечних територій, також відомих як "радонові зони" або "райони підвищеної радонової активності," розглядається у рамках європейських стандартів безпеки, що є невід'ємною частиною Директиви Європейського Союзу 59/2013 [5]. Вона встановлює стандартні основні норми безпеки для захисту здоров'я осіб, які зазнають професійного, медичного та громадського опромінення від небезпек, що виникають внаслідок іонізуючого випромінювання [6].

Радононебезпечні території - це ті території, де природні та антропогенні умови сприяють накопиченню високих концентрацій радону в повітрі, зокрема у приміщеннях порівняно з іншими регіонами країни [7].

Міжнародна комісія з радіаційної безпеки (МКРЗ) рекомендує виділяти радононебезпечні зони, де більше 1% будинків мають концентрацію радону, що перевищує середні національні норми в 10 разів. Належить акцентувати увагу на цих радононебезпечних зонах і впроваджувати відповідні заходи для нормалізації рівня радону.

Директива Ради 96/29/Євратом (Європейська комісія 1996) уже включала загальні вимоги щодо ідентифікації трудової діяльності, де працівники можуть піддаватися впливу торону або радону, прямо згадуючи курорти, печери, шахти, підземні та надземні робочі місця у визначених зонах. Директива Ради 2013/59/Євратом підтверджує необхідний високий рівень захисту попередньої Директиви, розширюючи сферу її дії, щоб узгоджено та послідовно охоплювати захист працівників на робочих місцях з підвищеною природною радіацією, наприклад працівники, які зазнали впливу радону на робочих місцях, працівники промисловості,

що переробляє природні радіоактивні матеріали, а також екіпаж літаків і космічних екіпажів [8].

Згідно з текстом даної Директиви однією з основних вимог до країн-членів ЄС є створення національних планів дій щодо радону (НДПР) – Стаття 103. План дій щодо опромінення радоном:

1. Держави-члени розробляють національний план дій щодо довгострокових ризиків від опромінення радоном у помешканнях, будівлях із громадським доступом і на робочих місцях для будь-якого джерела проникнення радону, чи то з ґрунту, будівельних матеріалів чи води. План дій повинен враховувати питання, викладені в Додатку XVIII, і регулярно оновлюватися.

2. Держави-члени забезпечують вжиття відповідних заходів для запобігання проникненню радону в нові будівлі. Ці заходи можуть включати спеціальні вимоги в національних будівельних нормах.

3. Держави-члени повинні визначити райони, де концентрація радону (як середньорічна) у значній кількості будівель, як очікується, перевищить відповідний національний контрольний рівень.

Таким чином під час проєктування НДПР необхідно зосередитись на подоланні довгострокових ризиків від опромінення радоном у житлових приміщеннях, будівлях громадського користування та на робочих місцях з будь-яким джерелом надходження радону - з ґрунту, будівельних матеріалів чи води. Необхідно розглянути: стратегію проведення досліджень концентрації радону в приміщеннях або концентрації газу в ґрунті; підхід, дані та критерії, що використовуються для розмежування зон; визначення типів робочих місць і будівель з відкритим доступом, де необхідно проводити вимірювання; основу для встановлення референтних рівнів радону для житла та робочих місць; розподіл обов'язків, механізми координації та наявні ресурси для виконання плану дій; стратегію зменшення впливу радону в житлових приміщеннях; стратегії сприяння відновлювальним заходам після завершення будівництва; методи та інструменти, для запобігання надходженню радону в новобудови; графіки перегляду плану дій; стратегію комунікації; настанови щодо методів та інструментів для проведення вимірювань та коригувальних заходів;

надання фінансової підтримки для проведення радонових обстежень та коригувальних заходів; довгострокові цілі щодо зниження ризику раку легенів, пов'язаного з впливом радону. За необхідності, також проводиться розгляд інших пов'язаних питань і відповідних програм.

На рисунку 1.1 зображено поточний статус плану дій щодо радону в країнах Європейського Союзу та Великобританії.



Рис. 1.1. Статус плану дій щодо радону в країнах Європи

Таким чином, станом на травень 2023 року:

- Національні радонові плани затверджено в 23 країнах Європи;
- НПДР у статусі «проекту документа» у 3 країнах (Естонія, Італія, Португалія);
- Немає спеціального радонового плану дій у 2 країнах (але вживаються радонові дії - Литва, Латвія);

Кіпр і Мальта вирішили не розробляти протокол вимірювань через переважаючу низьку концентрацію радону на своїй території.

1.2. Основні відомості про радон

1.2.1. Історія відкриття

Проводячи дослідження щодо іонізації повітря радіоактивними речовинами, Марія та П'єр Кюрі виявили, що об'єкти, розташовані поряд з радіоактивним джерелом, набувають радіоактивних характеристик, які зберігаються певний час після видалення радіоактивного препарату. Таким чином, для опису даного явища було введено термін "індукована активність".

У 1899 році Е. Резерфорд відзначив, що препарати торію, окрім α -частинок, випромінюють досить невідому раніше речовину, через що повітря навколо препаратів торію поступово набуває радіоактивності. Він запропонував назвати цю речовину "еманацією" (від латинського "emanation") та позначити її символом Em. Подальші спостереження показали, що всі препарати радію, торію та актинію виділяють певну еманацію, яка має радіоактивні властивості.

У 1902 році Ернест Резерфорд і Фредерік Содді здійснили серію експериментів, які переконали їх у тому, що еманація - це газоподібна речовина, що відповідає закону Бойля та може перетворитися на рідину при охолодженні. Подальше дослідження хімічних властивостей еманачії підтвердило, що цей газ є інертним.

В подальшому, охолоджену еманацію, отриману з препаратів радію, було названо "еманацією радію" (Ra Em), з метою відрізнення її від еманачій торію та актинію. Подальші дослідження підтвердили, що всі еманачії в дійсності є радіонуклідами нового елемента - інертного газу, якому відповідає атомний номер 86. Цей газ був вперше виділений у чистому вигляді у 1908 ученими Рамзаєм та Грєм.

Три роки потому Рамзай дав еманачії радію нову назву - "нітон", що походить від латинського слова "nitens", що означає "блискучий". Ця назва була обрана

Рамзаєм, ймовірно, для підкреслення властивості газу викликати фосфоресценцію в деяких речовинах. Проте, у 1923 році було прийнято більш точне найменування – радон (Rn), яке походить від слова "радій" (Ra). Еманції торію і актинію, отримали назви "торон" (Tn або ^{220}Rn) і "актинон" (An або ^{219}Rn) відповідно.

Заслуга відкриття радону, як хімічного елемента, часто приписується також німецькому хіміку Фредеріку Ернсту Дорну, проте першовідкривачем радону як хімічного елемента все ж таки слід вважати Резерфорда. У 1900 р. Дорн відкрив довговічний ізотоп радону ^{222}Rn з періодом напіврозпаду 3,823 дня і опублікував статтю про це, зіславшись на більш ранню роботу Резерфорда.

1.2.2. Фізичні та хімічні властивості радону

Радон – інертний радіоактивний одноатомний газ без кольору та запаху, може становити небезпеку для здоров'я та життя. Є елементом групи 18 періодичної системи хімічних елементів Д.І. Менделєєва (за старою класифікацією – головної підгрупи 8 групи, 6 періоду), з атомним номером 86. Позначається символом Rn (Radon). Найбільш стабільний ізотоп ^{222}Rn має період напіврозпаду 3823 діб.

Електронна структура атома радону $[\text{Xe}] 4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$. Електронна конфігурація зовнішніх оболонок $6s^26p^6$. Енергії послідовної іонізації 10.75, 21.4 та 29.4 еВ відповідно. Радіус атома 0,22 нм.

На холодних поверхнях радон легко конденсується в безбарвну рідину, що фосфоресцює. Твердий радон світиться діамантово-блакитним кольором. Радон малорозчинний у воді, хоча трохи краще, ніж інші благородні гази. Розчинність радону у 100 г води складає 51,0 мл (0°C) – в 1 об'ємі води розчиняється 0,507 об'ємів радону та 13,0 мл (50°C). В органічних розчинниках і жировій тканині людини розчинність радону в десятки разів вище, ніж у воді. Газ легко проникає крізь полімерні плівки, ефективно взаємодіє з активованим вугіллям та силікагелем, що призводить до його швидкого поглинання. Радон в 110 разів важчий за водень і в 7 разів важчий за повітря. Один літр цього газу важить близько 9,9 г. При охолодженні до -62°C радон згущується в рідину, яка в 7 разів важча за воду (питома вага рідкого

радону майже дорівнює питомій вазі цинку). Температура замерзання радону складає $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$. За нормальних умов щільність газу радону складає $9,73\text{ кг/м}^3$. При критичному тиску $6,2\text{ МПа}$ потрібна точка відповідає $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску $0,07\text{ МПа}$. Питома теплота випаровування $73,9\text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, теплоємність $C_p=90\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ (за температури 298 К та нормального тиску).

1.2.3. Процес утворення радону

Головним джерелом радону є ^{238}U , який під час свого радіоактивного розпаду переходить у ^{226}Ra . Радон входить до складу радіоактивних рядів ^{238}U , ^{235}U та ^{232}Th . Ядра радону постійно виникають у природі при радіоактивному розпаді материнських ядер. Найчастіше радон утворюється саме в результаті розпаду урану ^{238}U , який є частиною серії з 14 перетворень, які називають ланцюгом розпаду. Кожне перетворення призводить до утворення нового елемента з меншим атомним номером і масовим числом. Такий радіоактивний ряд називається рядом радію, що починається з ^{238}U та завершується утворенням стабільного ^{206}Pb – рисунок 1.2.

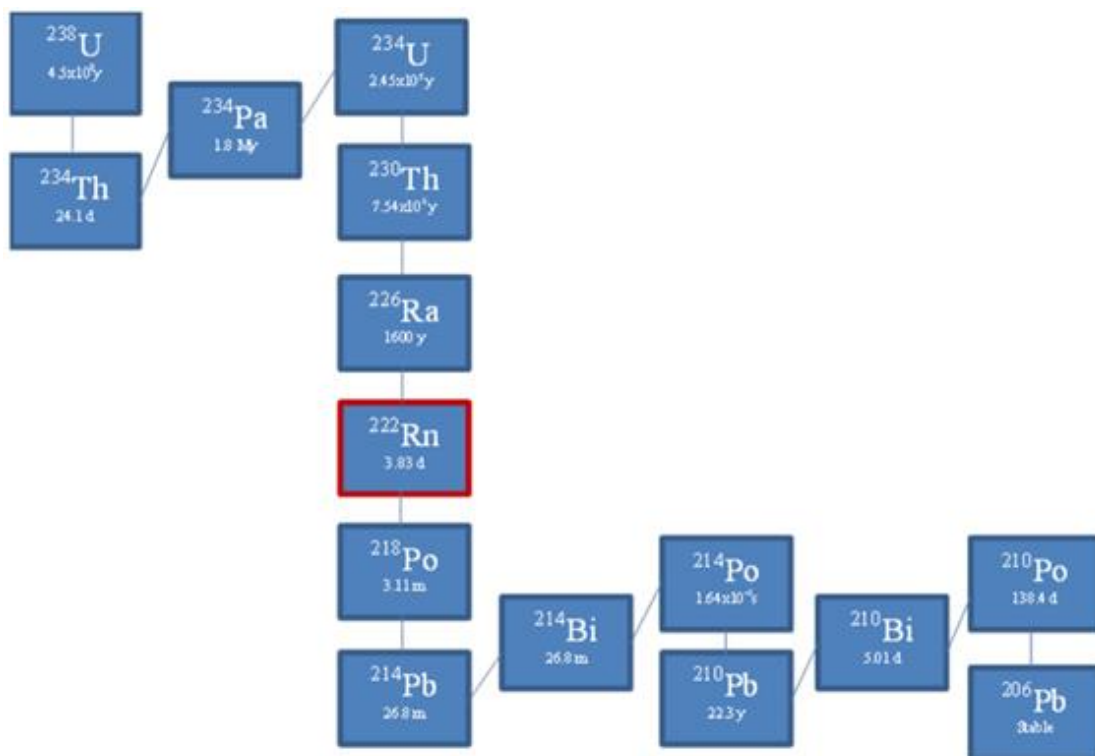


Рис. 1.2. Радіоактивний ряд радію [10]

Найбільша небезпека полягає в тому, що радон та його дочірні продукти є альфа-випромінювачами, і їхнє вдихання може бути шкідливим для здоров'я. Коли уран піддається радіоактивному розпаду, він випромінює альфа-, бета- та гамма-випромінювання, а також низку продуктів, що включають радон.

Крім того, при α -розпадах утворюються ядра, що знаходяться у збудженому стані, які при переході в основний стан випромінюють γ -кванти. Ці γ -кванти формують радіоактивний фон приміщень, в яких ми знаходимося. При цьому радон, будучи інертним газом, не утворює аерозолів, тобто не приєднується до порошин, важких іонів і т.д. та гірських порід на великі відстані.

Сам газ радон розпадається через серію з чотирьох дуже короткоживучих радіоактивних продуктів розпаду радону у формі твердих, електрично заряджених частинок, які називаються похідними радону: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi і ^{214}Po . Через короткий період напіврозпаду дочірні речовини радону становлять навіть більший ризик для здоров'я, ніж сам радон. Вдихання усіх зазначених вище радіоактивних ізотопів може призвести до іонізації в органах дихання, особливо в легенях та бронхах. Під час вдихання радіоактивні частки, що містяться в повітрі, осідають в різних органах або розпадаються безпосередньо в легенях. Існує ризик впливу радону на здоров'я, оскільки дихання радону людиною в приміщеннях будівель може призвести до отримання ЕД в середньому близько одного мілізіверта на рік [11, 12]. Це становить половину загальної дози опромінення, одержуваної від усіх природних джерел радіації. Таким чином радон і радіоактивні продукти його розпаду вносять основний внесок в радіаційний фон житлових і виробничих будівель, а розуміння даного фактора дуже важливо для забезпечення належного рівня радіаційної безпеки.

Зважаючи на хімічну інертність, радон відносно легко залишає кристалічну решітку «батьківського» мінералу і потрапляє в підземні води, природні гази і повітря. Поступово накопичуючись в землі, радон надходить до поверхні різними шляхами, як-от зони розломів та тектонічні неузгодження. Після цього він може потрапити в будинки через щілини та вентиляційні отвори. Це може створювати підвищені рівні радону в приміщеннях.

1.2.4. Ізотопи радону

Ізотопи радону – різновиди атомів хімічного елементу радону з атомним номером 86, що мають різний вміст нейтронів у ядрі. Усі ізотопи радону радіоактивні, при цьому найбільш стабільним є ізотоп ^{222}Rn , що є дочірнім продуктом розпаду ізотопу радію ^{226}Ra . Ізотоп ^{222}Rn зазнає α -розпаду з періодом напіврозпаду 3,823 дня. У хімії ізотопи радону часто називають еманаціями.

Загалом відомо 35 ізотопів радону з різним нуклонним числом (від 195 до 229) та періодом напіврозпаду (від 10^{-6} до 3,823 діб). Серед розглянутих ізотопів радону, чотири зустрічаються в природі, входячи в природні радіоактивні ряди: ^{222}Rn і ^{218}Rn входять до ряду ^{238}U ; ^{220}Rn - у ряд ^{232}Th ; ^{219}Rn - до ряду ^{235}U . Ці природні ізотопи є дочірніми продуктами альфа-розпаду ізотопів радію (за винятком ^{218}Rn , що виникає в рідкій бічній гілці ряду при бета-розпаді ^{218}At) і самі у свою чергу зазнають альфа-розпаду, утворюючи ізотопи полонія. Таким чином, гази розпадаються, випускаючи альфа-частинки та перетворюючись на тверді частинки, які можуть осідати у повітрі.

За наявними дослідженнями, ^{222}Rn є найбільш важливим ізотопом радону з точки зору внеску в загальну дозу опромінення [10]. Він є 20 разів потужнішим, ніж інші ізотопи радону. ^{222}Ra має короткий період напіврозпаду, всього 3,82 дні, та розпадається, випускаючи альфа-частинки в ^{218}Po . Полоній ^{218}Po , у свою чергу, розпадається на свинець ^{210}Pb з періодом напіврозпаду 23,3 роки, і, нарешті, ^{210}Pb перетворюється на стабільний ^{206}Pb .

Легкі ізотопи радону (^{208}Rn – ^{212}Rn) синтезують у реакціях глибокого розщеплення ядер урану або торію частинками (в основному протонами) високої енергії або за реакціями типу $^{197}\text{Au}(^{14}\text{N}, n_x)$, де x - число нейтронів (зазвичай більше трьох) [13, 14].

Оскільки найбільш довгоживучим із чотирьох природних ізотопів радону є ^{222}Rn , саме його вміст у цих середовищах максимальний.

1.2.5. Накопичення радону в будинках

Початком планомірного вивчення радонової радіації варто вважати 70-і роки, коли на території фінської столиці Гельсінкі виявили свердловини з надзвичайно високою концентрацією радону у воді. Під час обстеження житлових будинків у 1981 році були знайдені приміщення з концентраціями радону понад 10 тис. Бк/м³ [15].

З урахуванням статистично значущих результатів обстежень на основі 2150 вимірювань було визначено середньгеометричне значення ОА радону в приміщеннях, що складає 64 Бк/м³. При цьому перевищення ОА радону в 600 Бк/м³ і більше становили 1,9% випадків.

Дослідження показали, що велика кількість будівель має підвищені рівні радону, що може призвести до значного підвищення ЕД для людей. Наприклад, в таких країнах, як Фінляндія та Швеція, виявлено концентрації до кількох тисяч Бк/м³ радону, що відповідає ЕД до 100 мЗв на рік. У Великій Британії знайдено 20 тисяч будинків з щорічною ЕД від радону більше 20 мЗв (2 бера).

Найбільшу кількість дослідів, присвячених питанню накопичення радону в будинках було проведено в США. Високі концентрації радону в будинках були виявлені випадково в 1985 році після того, як ретельні радіаційні випробування, проведені на новій АЕС у селищі Лімерик Тауншіп показали, що Стенлі Ватрас, інженер-будівельник станції, був забруднений радіоактивними речовинами, хоча реактор ніколи не завантажувався паливом [16].

Найвищі рівні радонової небезпеки в США спостерігаються в штаті Айова та в районі Аппалачських гір на південному сході Пенсильванії [17]. Айова має найвищі середні концентрації радону в США через значне зледеніння, яке подрібнило гранітні породи Канадського щита і відклало їх у ґрунтах, що складають багаті сільськогосподарські угіддя штату Айова [18]. У багатьох містах штату, таких як Айова-Сіті, були введені вимоги щодо радонозахищеного будівництва в нових будинках.

Станом на 1991 рік обстежено понад 1,8 мільйонів будинків у 29 штатах США. Згідно з результатами досліджень, середня активність радону в американських

будинках складає 55 Бк/м³. У 1986 році Федеральне агентство з охорони навколишнього середовища США рекомендувало вважати 150 Бк/м³ максимально допустимою концентрацією радону в повітрі житлових будинків.

У більш ніж 5% будинків у США виявлено радон у концентрації понад 150 Бк/м³, а в 0,1% з них активність радону перевищує 800 Бк/м³. Зі 130 шкільних будівель, що були обстежені, у 3% було виявлено активність радону вищу за 700 Бк/м³. Таким чином, оприлюднені у ЗМІ дані про радіацію радону суттєво стурбували американське суспільство, що призвело до прийняття президентом Рональдом Рейганом антирадонового закону в жовтні 1988 року.

У Німеччині середнє значення активності радону в повітрі житлових будинків становить 40 Бк/м³. Проте, в 1% з обстежених споруд, виявлено показник вище 250 Бк/м³, а в 0,1% – понад 600 Бк/м³.

Скандинавські країни теж занепокоєні проблемою радону, особливо в місцях, де земна поверхня складається з материкових порід, насичених ураном та торієм. У Швеції середнє значення активності радону в приміщеннях становить 50 Бк/м³. Але в 10% будинків виявлено значення, які перевищують 100 Бк/м³, та в 1% – понад 400 Бк/м³.

Одні з найбільших величиною показники активності радону в Ірландії були виявлені в офісних будівлях в невеликому ірландському містечку Маллоу, графство Корк, що викликало місцеві побоювання щодо підвищеного ризику розвитку раку легенів [19].

У Фінляндії понад 200 тисяч квартир мають концентрацію радону 200 Бк/м³ і вище, приблизно 70 тисяч – рівень 400 Бк/м³ і вище, а близько 20 тисяч – рівень 800 Бк/м³ і вище. Середня річна доза радону на жителя становить приблизно 2 мЗв. Враховуючи специфічні геологічні умови, в країні встановлені нормативи: не більше 200 Бк/м³ радону у нових будинках та до 800 Бк/м³ у старих.

У США в 1992 р. ухвалено норматив, згідно з яким питома активність радону у водопровідній воді не має бути вищою за 0,1 Бк/л. Розрахунки показують, що за такої умови внесок цього джерела в повну концентрацію радону в будівлі не перевищує 10 Бк/м³. Насправді не менше 10% людей у США та інших країнах світу п'ють воду з

активністю радону понад 100 Бк/л. Тому експерти МКРЗ вважають, що з води до приміщень може надходити до 1/5 радону [20].

Згідно до переліку досліджень, описаних в [21], Україна має одні з найвищих значень за показником вмісту радону в будинках (при цьому кількість обстежених будівель складало 2000) – таблиця 1.1.

Таблиця 1.1

Вміст радону в будівлях

Країна	Кількість обстежених будівель	Концентрація радону, Бк/м ³
Німеччина	5970	40 ± 2
Італія	1000	25 ± 3
США	3000	72 ± 5
Великобританія	2000	12 ± 3
Швейцарія	400	720 ± 120
Швейцарія (Альпи)	100	926 ± 210
Нідерланди	927	30 ± 5
Фінляндія	2154	64 ± 3
Канада	13450	17 ± 4
Україна	2000	450 ± 35

Оскільки радон - безбарвний газ без запаху, єдиний спосіб дізнатися, скільки його міститься в повітрі або воді - це провести тести. У США набори для тестування радону доступні для громадськості в роздрібних магазинах, таких як господарські магазини, для домашнього використання, а тестування проводять ліцензовані фахівці, які часто є домашніми інспекторами. Зусилля, спрямовані на зниження рівня радону

в приміщенні, називаються пом'якшенням впливу радону. У США Агентство з охорони довкілля рекомендує перевіряти всі будинки на вміст радону. У Великій Британії згідно з Системою оцінки безпеки та гігієни житла (Housing Health and Safety Rating System - HHSRS) власники житла зобов'язані оцінювати потенційні ризики та небезпеки для здоров'я і безпеки в житловому приміщенні [22].

1.2.6. Небезпека радону для здоров'я

Проблема важливості вимірювання рівня радону для мегаполісів на порядку денному у містах Європи з високою щільністю населення, оскільки високі концентрації радону чинять негативний вплив як на здоров'я людей, так і на екологічне середовище в цілому. Великі концентрації радону як джерела радіаційного опромінення в повітрі можуть бути шкідливими для здоров'я, оскільки радон і його продукти розпаду можуть вдихатися людиною і виступати як канцерогени, збільшуючи ризик розвитку раку легенів [23]. Розпад ядер радону та його дочірніх ізотопів у легеневій тканині викликає мікроопіки, оскільки вся енергія альфа-частинок поглинається практично у точці розпаду. Крім цього, радоновий газ може негативно впливати на імунітет, репродуктивну систему та процеси кровотворення, спричиняючи тим самим розвиток інших видів захворювань.

Рівень шкоди від експозиції радоном прийнято визначати ризиком розвитку раку легенів, оскільки радон є найпоширенішою причиною цього онкологічного захворювання серед некурців та другою за частотою причиною даної хвороби для курців (до 14% випадків загалом). В таблиці 1.2 показано основні ризики для людини в залежності від рівня радіоактивності та співставні ризики для здоров'я, пов'язані з іншими факторами.

Оцінка ризику, зумовлена радоном [24]

пКі/л	Оцінка кількості смертей від раку легень, обумовлених опроміненням за рахунок радону (на 1000)	Співставні рівні опромінення	Співставний ризик
200	400–770	У 1000 разів перевищує середній рівень у зовнішньому повітрі	Більш ніж у 60 разів перевищує ризик для людини, яка не курить
100	270–630	У 100 разів перевищує середній рівень у помешканнях	Ризик курця, що викурює 4 пачки за одну добу; 20000 рентгенівських знімків грудної клітини на рік
40	120–380		Ризик курця, що викурює 2 пачки на добу
20	60–210	У 100 разів перевищує середній рівень на зовнішньому повітрі	Ризик курця, що викурює 1 пачку сигарет на добу
10	30–120	У 10 разів перевищує середній рівень у приміщеннях	У 5 разів перевищує ризик некурця
4	13–50	У 10 разів перевищує середній рівень на зовнішньому повітрі	200 рентгенівських знімків грудної клітини на рік
2	7–30		Ризик смерті некурця від раку легенів
1	3–13	Середній рівень в помешканнях	20 рентгенівських знімків грудної клітини на рік
0,2	1–3	Середній рівень в зовнішньому повітрі	

1.2.7. Методи виявлення радононебезпечних зон

Один із ефективних інструментів для виявлення радононебезпечних зон - це картування радонового ризику, де ключовим параметром є еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА) радону у повітрі будівель. Використання даних про ЕРОА дозволяє ідентифікувати території, де рівень активності радону у приміщеннях є високим, що є важливим для прийняття заходів з мінімізації радіаційного впливу на населення [25].

ЕРОА (Бк/м³) дорівнює концентрації радону-газу в такій рівноважній його суміші з продуктами розпаду, яка має те ж значення прихованої енергії альфа випромінювання, що і нерівноважна суміш, що розглядається. Прихована енергія альфа випромінювання в одиниці об'єму повітря характеризує сукупну (до розпаду) енергію альфа частинок тих дочірніх продуктів, які затримуються в органах дихання. Таким чином, величина ЕРОА дозволяє характеризувати вплив радону у будь-якій суміші з його ДПР. Надходження ДПР радону розраховується як добуток ЕРОА на об'єм повітря, що вдихається.

В цілому вдосконалення методів картування та розуміння радіаційних ризиків сприяє не лише виявленню радононебезпечних зон, але й розробці ефективних стратегій для зменшення впливу радону на здоров'я населення. Додатково, для визначення радонового потенціалу використовується ОА радону у ґрунтовому повітрі. Картування радонового потенціалу має на меті виявлення територій, де ґрунтові ділянки відрізняються високим рівнем радону. Такий підхід надає можливість визначати радононебезпечні географічні або адміністративні області на підставі наукових досліджень рівнів радону у ґрунтовому повітрі [26].

Ключовий аспект в створенні карт радонового ризику - це систематичний збір інформації про геологічні особливості ґрунтів, їх структуру та інші параметри. Після отримання даних про геологічні характеристики, проводиться вимірювання ЕРОА радону у повітрі будинків та ОА радону у воді. При цьому необхідно враховувати не лише внутрішні джерела радону, але й зовнішні впливи, як-от геотермальні процеси

або антропогенні фактори. Отримана інформація є основою для планування подальших польових досліджень з картування радону.

Наступним етапом є проведення гамма-спектрометричних вимірювань для визначення вмісту продуктів радіоактивного розпаду у ґрунті та ОА радону у ґрунтовому повітрі. З ціллю забезпечення точності та геолокації вимірювань, кожна точка фіксується за допомогою системи позиціонування GPS.

Отримані дані піддаються комплексній обробці. Важливо враховувати не лише величину радіоактивних викидів, але і їх просторовий розподіл, що дозволяє отримати деталізовану картину радіаційного фону досліджуваної території. Результати аналізу визначають рівень радіаційного ризику для кожного вимірюваного пункту. Територію класифікують в одну з трьох основних градацій ризику: високого, нормального або низького. Ця класифікація відображається на топографічній карті, надаючи зрозумілий візуальний звіт про рівні радіаційного навантаження в різних частинах досліджуваної території.

1.3. Джерела надходження радону в приміщення

Як вже було зазначено, радон - це радіоактивний газ, який становить найвищу небезпеку для здоров'я людини у випадку його накопичення у житлових приміщеннях (оскільки основна частина дози, що зумовлена радоном отримується людиною під час перебування в закритому приміщенні без належного провітрювання). У зонах з помірним кліматом концентрація радону в закритому приміщенні приблизно в 8 разів вища, ніж у зовнішньому повітрі [27].

Для визначення зон підвищеного радонового ризику на локальному рівні виділяється перелік факторів радонебезпеки. Такими факторами можуть бути: природні поклади урану, його вміст у гірських породах, у ґрунтах та водних джерелах, осадовий чохол: його товщина та гамма-активність гірських порід. Також важливі просторова щільність розломів та лінеаментів різних порядків, відстань від санітарно-захисних зон видобувних підприємств та значення дози на висоті 1 метра від земної поверхні [28].

Розглядаючи питання радіаційної безпеки, необхідно враховувати різні види чинників, як природного так і антропогенного походження. Загалом, основними джерелами виходу радону в повітря приміщень є ґрунт та будівельні матеріали. Нижче більш детально наведено джерела надходження радону в приміщення, включаючи природні і антропогенні чинники, які впливають на його утворення.

1.3.1. Природні чинники формування радононебезпеки

Згідно з інформацією, наданою Міжнародною комісією з радіологічного захисту та Науковим комітетом з дії атомної радіації ООН, важливо враховувати, що найбільша частина дози опромінення, яку люди отримують в звичайних умовах (приблизно 80% від загальної дози), походить від природних джерел радіації. З цієї частини опромінення більше половини обумовлено присутністю радонового газу та його дочірніх продуктів розпаду в повітрі приміщень, де люди проводять більшість свого часу.

Формування потенційно радононебезпечних територій обумовлене різноманітними факторами, які включають шляхи викиду радону в атмосферу та його концентрацію у повітрі будівель. Загальний принцип полягає в тому, що внаслідок розпаду ізотопів ^{226}Ra та ^{232}Th утворюється природний радій, що міститься в гірських породах та ґрунті і поступово розпадається в серію інтермедіатів, таким чином утворюючи ^{222}Rn , який має здатність проникати через різні матеріали та тріщини на поверхню. Якщо радон виходить на поверхню в приміщенні, то він може накопичуватися та утворювати радонову небезпеку для жителів.

Природні чинники, які формують радононебезпеку, пов'язані з природними процесами і геологічними особливостями, які можуть сприяти надходженню радону в приміщення. Кількість ^{222}Rn в атмосферному повітрі залежить від вмісту ^{238}U та ^{226}Ra в гірських породах (деякі типи гірських порід, як-от граніт, сланець, гнейс, і уранові руди містять великі кількості природного радію), вивітрювання порід, ґрунтів та підземних вод, а також від коефіцієнта еманування ^{222}Rn з ґрунту. Також

факторами, що впливають на процес еманування є властивості ґрунту, наявність родовищ та уранова мінералізація.

Концентрація радону в ґрунті обумовлена як наявністю радіонуклідів ^{226}Ra та ^{228}Th у ньому, так і будовою та вологістю ґрунту: структура та композиція земної кори визначають процеси дифузії атомів радону та їх міграційну здатність. Збільшення вологості ґрунту сприяє міграції атомів радону, тоді як емісія радону з ґрунту залежить від значень температури: її збільшення призводить до розширення пор в ґрунті, що сприяє виділенню радіоактивного газу радону. Крім того, високі температури сприяють випаровуванню води, разом з якою радон виводиться в атмосферу. Зі зростанням атмосферного тиску активізується процес проникнення повітря в глибину ґрунту, що призводить до зниження концентрації радону. З іншого боку, при зниженні зовнішнього тиску ґрунтовий газ надходить до поверхні, і це призводить до збільшення концентрації радону в атмосфері.

Варто зазначити, що особлива увага при дослідженні радононебезпечних територій приділяється уранорудним регіонам, де можуть бути виявлені радонові підземні води та виходи мінералізованих радонових вод через глибокі розломи та тріщини на поверхню.

Важливу роль у накопиченні радону у порожнинах та тріщинах низькорадіоактивних порід відіграють структурно-тектонічні фактори, як-от зони тріщинуватості, глибинні розломи, тектонічні зсуви, процеси дроблення порід та ін [29]. Такі тектонічні порушення можуть перетворитися на радононосні структури, що сприяють виведенню радону на поверхню. Радонові аномалії також пов'язані з зонами активізації глибинних розломів тектонічних структур, які характеризуються підвищеною тріщинуватістю і дробленням. Ці зони є більш проникними для радону, що призводить до його накопичення в поверхневих шарах ґрунту і, відповідно, підвищеної концентрації в повітрі приміщень.

Перенос радону в атмосферу та в приміщення також залежить від будівельних матеріалів, структури будівель, системи провітрювання та управління приміщеннями.

Концентрація радону в атмосферному повітрі є результатом складної взаємодії природних факторів та геологічних умов. Насамперед, геологічна обстановка в

регіоні визначає рівень радону. Наприклад, граніт, багатий на уран, стає активним джерелом радону, в той час як над поверхнею морей концентрація радону мінімальна. Погодні умови також впливають на концентрацію радону в атмосфері. Під час дощу мікротріщини в ґрунті, через які радон проникає до повітря, заповнюються водою, що призводить до зменшення викидів радону. Також сніжний покрив в зимовий період обмежує доступ радону до атмосфери.

Цікавим аспектом є вплив землетрусів на концентрацію радону в повітрі. Дослідники виявили, що перед землетрусами спостерігається підвищення рівня радону в атмосфері. Ймовірно, це пов'язано зі збільшенням мікросейсмічної активності, що призводить до активнішого обміну повітря між ґрунтом і атмосферою [30].

1.3.2. Антропогенні чинники формування радононебезпеки

Антропогенні чинники, що утворюють радіаційну (радонову) небезпеку в першу чергу пов'язані з урановидобувними роботами та іншими видами гірничовидобувних/геологорозвідувальних робіт. Техногенні аномалії інтенсивності іонізуючого випромінювання концентруються вздовж транспортних магістралей, а їхнім основним джерелом є відходи видобування та перероблення уранової сировини, яка несанкціоновано використовувалась в Україні у 1970-х роках під час прокладання та ремонту доріг і залізниць [5].

У більшості випадків вплив будівельних матеріалів на рівень радону, що проникає в будинки, є менш вираженим порівняно з проникненням радону із ґрунту. Об'ємна активність радону, що потрапляє в приміщення через будівельні матеріали складає близько 100 Бк/м^3 , що становить лише близько 10% загальної кількості радону. Однак у деяких випадках, наприклад, при використанні будівельних матеріалів з підвищеним вмістом урану, ця частка може значно збільшуватися, досягаючи 90% [31].

Вміст радону у повітрі приміщень, які знаходяться вище першого поверху, є значно нижчим, ніж в приміщеннях першого та цокольного поверхів. За оцінками досліджень, швидкість надходження радону до першого поверху будинку становить близько 20 Бк/(м³*год) [32].

Одним з чинників, що впливає на формування радононебезпеки є вибір будматеріалів. При будівництві сучасних житлових будинків використовують залізобетонні конструкції, які складаються з цементу, піску, щебеню та пористого глинистого керамзиту – це слід враховувати при радіоекологічних дослідженнях. Такі матеріали містять природні радіонукліди, які можуть бути джерелом радіації. Якщо вміст радіонуклідів у будівельних матеріалах підвищений, то стіни, стелі та підлоги квартир у таких будинках можуть випромінювати радіоактивні частинки та гамма-кванти. Це може негативно впливати на здоров'я людей, які проживають у житлових приміщеннях.

Особливо високі концентрації цих елементів можна знайти у глиняних ґрунтах, піщаних багаторічних ґрунтах, а також у деяких видів каміння, які можуть бути використані для будівництва. Будівельні матеріали, такі як глина, цегла та бетон, можуть намагнічувати радон і накопичувати його в стінах та підлозі будівель.

Для характеристики потенційно радоновикидних матеріалів вводиться поняття довжини дифузії радону у будматеріалі. Воно визначає, як далеко від стіни може проникнути радон, обмежуючись довжиною дифузії. Тобто зі стіни виходять лише ті атоми радону, що знаходяться в порах матеріалу на глибині, не перевищуючі радонову дифузійну відстань.

Застосування екологічно чистих технологій у виробництві будівельних матеріалів може суттєво впливати на ОА радону у приміщеннях. Використання кальцій-силікатних шлаків, які утворюються під час обробки фосфатних руд та порожніх порід з відвалів збагачувальних фабрик може значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище і знизити вартість виробництва будівельних матеріалів [31].

Також важливим антропогенним чинником, що впливає на рівень радонової небезпеки в межах закритих приміщень є наявність якісної системи вентиляції:

погано спроектовані або погано обслуговувані системи можуть призвести до накопичення радону в приміщеннях. Якщо повітря не циркулює ефективно або система вентиляції не видаляє радон із приміщення, це призводить до зростання концентрації радону, особливо в підвальних приміщеннях. Крім того, під час ремонту та модернізації будівель можуть виникнути неконтрольовані шляхи проникнення радону у приміщення. Загалом, шляхи проникнення радону в приміщення можуть бути різноманітними, включаючи щілини в монолітних підлогах, монтажні з'єднання, тріщини у стінах та фундаментах, проміжки навколо комунікаційних труб, порожнини в стінах, природний газ, сланцеву глину, фосфатний шлак, воду та системи накопичення сонячної енергії.

Об'ємна активність радону у повітрі приміщення завжди вища, ніж у атмосферному повітрі. Точна відстань, яку радон може подолати від свого джерела до закінчення періоду напіврозпаду, залежить від механізму(ів) транспортування [33]. У випадку транспортування тільки шляхом дифузії, радон може пройти лише від 10 до 20 метрів, перш ніж закінчиться його короткий період напіврозпаду, який становить 3,8 днів; якщо задіяна геотермальна конвекція, радон, як повідомляється, може пройти майже 100 метрів. Гази, виміряні в ґрунтах, як правило, мають дифузійну природу і сильно залежать від факторів навколишнього середовища, таких як атмосферний тиск, вологість ґрунту і температура ґрунту [34].

Процес, відомий як ексхаляція, відбувається через випаровування радону з гранул мікрочастинок породи або будівельних матеріалів. Рівень ексхаляції радону залежить від кількох факторів, включаючи вміст радію в матеріалах, їх щільність, пористість, параметри приміщення, товщину стін та якість вентиляції.

1.4. Досвід України та європейських країн у протидії радону

1.4.1. Європейський підхід щодо радононебезпеки

У більшості країн світу радонове питання є досить важливим аспектом сталого розвитку та створення екологічного середовища, тому дослідження методів та

практик, направлених на оцінку радонової небезпеки та зменшення її впливу на навколишнє середовище наразі є дуже актуальними.

Питання геологічного потенціалу радону широко висвітлено в багатьох європейських публікаціях [35, 36]. Також існує перелік наукових публікацій, в яких описується зв'язок між магнітними аномаліями та потенційною радононебезпекою [37, 38].

Боротьба з радоновою проблемою вимагає не лише регулювання та політичної волі з боку національних, регіональних та місцевих органів влади, але й проінформованості громадськості, а також бажання та коштів з боку населення вживати заходи за розумну ціну, коли це необхідно. Цього можна досягти лише за допомогою національної політики і стратегії, яку зазвичай називають "Національним планом дій щодо радону" [39].

Таким чином, деякі країни, зокрема європейські, після проведення національного опитування та інших заходів для оцінки національної ситуації та накопичення досвіду у врегулюванні дій щодо зменшення рівня радону створили та впровадили національні плани заходів, наприклад Швейцарія (з 1994 року), Чехія (з 2000) та Італія (з 2002). На основі цього національного досвіду вимога розробки плану заходів також була включена до міжнародних рекомендацій і правил. У 2009 році Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) рекомендувала «національні радонові програми для зниження як ризику для всього населення, яке піддається впливу середньої концентрації радону, так і ризику для осіб, які піддаються високим концентраціям радону», і представила «компоненти для розробки національної радонової програми та основу для організації такої програми на рівні країни» [40]. Крім того, у 2014 році МКРЗ у своїй рекомендації щодо захисту від опромінення радоном повідомила, що «національна стратегія захисту від радону повинна реалізовуватися через національний план дій щодо радону, створений національними органами влади із залученням відповідних зацікавлених сторін» і що «стратегія має містити зобов'язання зменшити опромінення населення радоном загалом та рівень найвищих індивідуальних опромінь» [41]. Спираючись на це, у 2014 році Європейська директива 2013/59/Euratom встановила вимогу до держав-членів щодо

розробки та впровадження НДПР з кінцевою метою зменшення смертності від раку на їхніх територіях [6]. Подібна вимога введена в 'Міжнародні основні стандарти безпеки радіаційного захисту та безпеки джерел випромінювання', співавторами яких є вісім міжнародних організацій (Європейська комісія, Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, Міжнародне агенство з атомної енергії, Міжнародна організація праці, Організація економічного співробітництва та розвитку, Всесвітня організація охорони здоров'я, Програма ООН з довкілля, Всесвітня організація охорони здоров'я) [42].

Щоб підтримати країни в розробці їхніх НДПР, Асоціацією керівників європейських компетентних органів з питань радіаційного захисту (Heads of the European Radiological protection Competent Authorities – HERCA) організована низка семінарів, перший з яких було проведено у 2014 році [43]. У наступні роки було проведено інші відповідні заходи, включаючи організацію семінару у 2015 році, присвяченого радону на робочих місцях, який також охоплювали НДПР, створення робочої групи HERCA у 2017 році з приводу «Природних джерел радіації» та ін.

Загальна картина щодо заходів, вжитих європейськими країнами проти опромінення радоном, кардинально змінилася останнє десятиріччя. Більшість європейських країн вже впровадили НДПР, і тепер мають правила, що регулюють радон на робочих місцях і в приміщеннях. Стратегія захисту населення від опромінення радоном містить широкий спектр заходів, включаючи створення нормативно-правової бази, розробку національних протоколів для вимірювання радону, встановлення вимог щодо рівня радону у будівельних нормах, а також розробку норм для зниження рівня радону у вже експлуатованих будівлях та інші заходи.

Таким чином, у 2022 році Другий семінар HERCA щодо НДПР був зосереджений на ефективності різних дій, які впроваджуються через НДПР, а також на виборі належних індикаторів для моніторингу прогресу на шляху до досягнення мети щодо зменшення кількості ракових захворювань, пов'язаних із радоном, у Європі.

В цілому, сучасний європейський підхід до радононебезпеки базується на розробці стратегій та регулюючих стандартів з метою захисту громадського здоров'я та зменшення експозиції до радону в приміщеннях. Європейські країни співпрацюють для встановлення спільних підходів та стандартів, і це допомагає у скороченні радонної небезпеки. Ключовими аспектами європейського підходу до радононебезпеки є:

1. Обмін даними та дослідження: Країни співпрацюють у сфері обміну даними про радон та вивчення його розповсюдження. Це дозволяє країнам визначити області, де може існувати підвищений ризик радонній експозиції, а також спільно аналізувати та виробляти стратегії для контролю над радоном.

2. Освіта та інформування: Важливою частиною європейського підходу є освіта та інформування громадськості про радон та радонну небезпеку. Населення повинно бути ознайомлене з потенційними ризиками та розуміти наявність доступних заходів для захисту здоров'я від опромінення радоном.

3. Регулярне тестування і вимірювання: В багатьох європейських країнах рекомендується або навіть обов'язкове тестування на радон у будинках та приміщеннях, особливо в зонах з високим ризиком. Це дозволяє власникам будинків вживати заходи для зменшення концентрації радону, якщо це необхідно.

4. Технічні рекомендації і заходи зменшення ризику: Європейський підхід включає в себе розробку технічних рекомендацій для будівель та інженерних систем, які допомагають зменшити надходження та накопичення радону в приміщеннях. Це може включати в себе правила для герметизації будівель, підвищення вентиляції та використання спеціальних матеріалів.

5. Стандарти та регуляції: Європейські країни розробляють та впроваджують стандарти та регуляції, які обмежують максимально допустимі концентрації радону в будівлях. Ці нормативи встановлюються з урахуванням наукових даних і забезпечують безпеку жителів.

6. Міжнародна співпраця: Європейські країни співпрацюють з іншими країнами та міжнародними організаціями, такими як Міжнародна агентурія з атомної енергії (МААЕ), щоб обмінюватися досвідом і координувати дії з питань радону та ядерної

безпеки. Це допомагає виробити єдиний підхід до управління радонним ризиком в різних країнах.

Європейський підхід до радонобезпеки покликаний забезпечити належний рівень захисту від радону для населення і сприяти зменшенню радонової небезпеки в будівлях. Це важлива складова стратегії забезпечення безпеки та захисту здоров'я людей в Європі.

1.4.2. Стан радонової проблеми в Україні

До 1980 року жодна країна світу не встановлювала нормативи для вмісту радону та його дочірніх продуктів розпаду у приміщеннях [44]. Проте, з часом та поступовим накопиченням наукових публікацій, що свідчать про шкідливий вплив радону на навколишнє середовище, провідні країни усього світу почали усвідомлювати важливість регулювання рівнів радону для наявних та майбутніх будівель, а також необхідністю розроблення заходів з протирадіаційного захисту з урахуванням геологічних умов та економіко-правових аспектів різних країн.

В Україні моніторинг рівня радону розпочато з 1989 року. Високі рівні активності цього газу (1000 Бк/м³ і вище) зафіксовані в будівлях, що розташовані в областях Українського кристалічного масиву [45].

Порівняльна оцінка середніх річних доз опромінення населення України показує, що приблизно 5,05 мЗв/рік припадає на радонове опромінення, природні радіонукліди у воді та будівельних матеріалах; 1,1 мЗв/рік – на фонове (космічне, терагенне) опромінення; 0,5 мЗв/рік – опромінення в медицині та всього лиш 0,3 мЗв/рік – опромінення від аварії на ЧАЕС [46].

Ці дані підкреслюють значний внесок радону та його дочірніх продуктів у загальну дозу опромінення, що складає близько 75% від щорічної ЕД опромінення, одержуваної від природних джерел радіації.

Станом на сьогоднішній день в Україні немає повністю розробленого національного плану дій щодо зниження радіаційних ризиків від радону та захисту населення від радонового опромінення, а також недостатньо наукових публікацій, що

зосереджують увагу на проблемі ідентифікації територій з підвищеною радононебезпекою [47]. Крім того, у Європейський атлас природної радіації (The European Atlas of Natural Radiation - EANR) – колекція карт, що відображають рівні природної радіоактивності [48], поки не містить жодних даних про радоновий потенціал для України. Стратегія захисту населення від наслідків опромінення радоном знаходиться в стадії розробки, методологія визначення потенційно небезпечних територій на державному рівні ще не розроблена, тому ці питання залишаються надзвичайно актуальними [49].

Методологія вимірювання рівня радону та дослідження радону як джерела значного ризику для здоров'я людини розроблена, зокрема, фахівцями Державної установи "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва" Національної академії медичних наук України та іншими фахівцями [50 – 53].

У 2009 р. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) в публікації «Проблема радону в закритих приміщеннях з точки зору суспільної охорони здоров'я. Довідковий посібник ВООЗ» запропонувала рекомендованим рівнем безпеки для радону в оселях вважати 100 Бк/м^3 . [54].

Згідно з Нормами радіаційної безпеки України, середньорічна ЕРОА радону в повітрі приміщень є нормативною величиною, яка відповідно не повинна перевищувати: 50 Бк/м^3 для нових та реконструйованих будівель, а також дитячих, санаторно-курортних та лікувально-оздоровчих закладів; та 100 Бк/м^3 для експлуатованих будівель [5]. В країнах Європейського союзу експертами з радіаційного захисту рекомендовано такі нормативні значення активності радону: 200 Бк/м^3 – для нових житлових будівель та 400 Бк/м^3 – для старих. Нормативи ЕРОА радону у повітрі житлових будівель різних країн наведено у таблиці 1.3.

Нормативи еквівалентної рівноважної об'ємної активності радону у повітрі
житлових будинків [55]

Країна	ЕРОА, Бк/м ³
Швеція	200 (для нових будівель)
	400 (для старих будівель)
Німеччина	200 (для нових будівель)
	400 (для старих будівель)
Великобританія	200 (для нових будівель)
	400 (для старих будівель)
США	150 (для нових будівель)
	250 (для старих будівель)
Італія	200 (для нових будівель)
	400 (для старих будівель)
Канада	200 (для нових будівель)
	400 (для старих будівель)
Україна	50 (для нових будівель)
	100 (для старих будівель)

Незважаючи на те, що в Україні норми радіаційної безпеки житлових приміщень можуть бути жорсткішими, ніж аналогічні в країнах ЄС, слід зазначити, що в розвинених країнах екологічні нормативи, закріплені на державному законодавчому рівні, дотримуються жорсткіше.

Для України зоною найвищого потенційного радонового ризику є територія Українського кристалічного щита, який простягається близько 1000 км вздовж середньої течії Дніпра та має ширину приблизно 250 км [56]. Оскільки Київ розташований у північній частині Українського щита, де в надрах міститься підвищена кількість урану, дослідження рівня радонової небезпеки для міста Києва і залишається актуальним завданням. Беззаперечним фактом, що вказує на важливість

вирішення радонової проблеми є те, що в Україні щорічна кількість смертей від опромінення радоном більша, ніж від пожеж, повенів та автокатастроф разом узятих [57, 58].

Дані Міністерства охорони здоров'я свідчать, що понад 20% житлового фонду в Україні не відповідають встановленим вимогам щодо вмісту радону у повітрі помешкань. Відповідно до статті 15 Закону України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання», опромінення населення у виробничих або житлових будівлях не має перевищувати затверджені відповідні нормативи.

Законодавством передбачено ряд заходів для захисту населення від впливу радіонуклідів, зокрема, вибір місця під забудову з урахуванням запобігання надходженню радону у повітря, контроль за вмістом радіонуклідів у будівельних матеріалах, прийом будівель в експлуатацію з попередньою оцінкою та врахуванням рівня радону та гамма-випромінювання. У разі перевищення встановлених нормативів опромінення забороняється використання будівельних матеріалів, що не відповідають вимогам захисту від впливу іонізуючого випромінювання. Також передбачена можливість зміни характеру використання будівель та споруд для забезпечення безпеки від радіації [59].

Оскільки Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) не визначають об'ємну активність дочірніх продуктів розпаду радону, а встановлюють еквівалентну рівноважну об'ємну активність радону, для адекватної оцінки ЕРОА радону за отриманими даними необхідно враховувати добові та місячно-сезонні варіації концентрацій радону та його дочірніх продуктів: зранку активність радону та його дочірніх продуктів може бути до 4 разів більшою, ніж у пізні години; у холодну пору року активність радону і його дочірніх продуктів може бути до 2,5 рази більшою за рівень активності у влітку. Також додатковим фактором, який необхідно враховувати є зрушення радіоактивної рівноваги.

У відповідності до НРБУ-97 питома ефективна активність (A_{ef}) природних радіонуклідів у будівельних матеріалах не повинна перевищувати: для матеріалів, що використовуються для будівництва житлових будівель (І клас) $A_{\text{ef}} = 370$ Бк/кг; для використання в будівництві доріг у межах населених пунктів, а також при будівництві

виробничих споруд (II клас) вона повинна не перевищувати $A_{\text{сф}} = 740$ Бк/кг; для будівництва доріг поза населеними пунктами (III клас) може досягти значення $A_{\text{сф}} = 1500$ Бк/кг [60]. Тому, при значенні $A_{\text{сф}} > 1500$ Бк/кг такі матеріали повинні визнаватись як брак і не використовуватись.

Отримані в останні роки результати епідеміологічних досліджень, проведених Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) в межах радонового проєкту, однозначно показали лінійний зріст ризику розвитку раку легенів у зв'язку з тривалою радоною експозицією (до 30 років) [61]. Ці дослідження не виявили жодних даних, які підтверджували б наявність порогового значення, тоді як навіть помірні рівні радону в житлових приміщеннях (до 100 Бк/м³) статистично значуще збільшують цей ризик [39].

У 2015 році у публікації 126 МКРЗ оприлюднила нові рекомендації [40], згідно з якими ризик радіаційного впливу від радону на бронхолегеневу систему людини є майже вдвічі вищим, ніж колишнє значення з публікації 65 МКРЗ від 1994 [62].

1.4.3. Перспективи подальших досліджень радонової проблеми

Існує декілька десятків міжнародних програм щодо проблеми радонебезпеки, які здійснюються за підтримки Міністерства енергетики та Федерального агентства з охорони навколишнього середовища США разом з Комісією з радіаційного захисту країн Європейського союзу. До недавнього часу ці програми більшою мірою спрямовувались на практичні завдання. Основна увага приділялася технічним питанням контролю радону та його дочірніх продуктів у житлових і промислових приміщеннях, методам зменшення рівнів радіації, дослідженню радіаційного випромінювання радону, а також збору та статистичному аналізу епідеміологічних даних щодо частоти випадків онкологічних захворювань.

В останні роки в США та країнах Євросоюзу зросло зацікавлення до фундаментальних аспектів радонової проблеми – від дослідження факторів, які визначають шляхи переміщення радону в ґрунтах, до розгадування молекулярно-

біологічних та фізико-хімічних механізмів канцерогенного та мутагенного впливу цього радіоактивного газу.

Значний розвиток дослідницьких програм у США та країнах Європейського союзу проявився в збільшенні кількості проєктів, що вивчають біомедичні аспекти [63 – 65]. Наприклад, з 47 проєктів, які отримали фінансування від Міністерства енергетики США, 11 спрямовані на дослідження геофізики та геохімії (проблеми джерел і переносу радону у ґрунтах). Ще 5 проєктів вивчають міграцію радону у будівлях, 3 - фізико-хімічні процеси в атмосфері, пов'язані з радоном та його продуктами розпаду, а решта 28 - це проєкти, присвячені біомедичним аспектам. З них 13 проєктів - це експериментальні дослідження на тваринах в лабораторіях та клітинних культурах, 4 - розрахунки ризику захворювання на рак легені залежно від умов експозиції по відношенню до радону. Останні 11 проєктів, які отримали фінансування від Міністерства енергетики США, присвячені вивченню фізико-хімічних механізмів радонового канцерогенезу, зокрема, механізмів дії альфа-випромінювання радону на структуру ДНК і хроматину, трансформації фібробластів у клітинних культурах та ролі онкогенів у цих процесах.

За оцінками американських фахівців, протирадіаційні заходи, вживані для боротьби з радоною небезпекою, мають приносити економіці прибуток в межах від 500 до 700 тисяч доларів за кожне врятоване життя. Ці розрахунки враховують, по-перше, що кожен випадок онкологічного захворювання призводить до втрати близько 16 років життя, коли людина могла б активно працювати, і, по-друге, - відзначається, що запобігти хворобам обходиться дешевше, ніж лікувати вже хворих [66].

1.5. Висновки до розділу

1. Розглянуто основи концепції радононебезпеки територій: на базі опрацьованого матеріалу (наукові публікації, матеріали конференцій, навчальні посібники та ін.) можна дійти висновку, що незважаючи на наявні правила радіаційної безпеки в Україні, що є значно жорсткішими, ніж в країнах ЄС, обсяги досліджень та ступінь опрацювання радонової проблеми в Україні в цілому значно поступаються

передовим європейським країнам. Важливим рішенням для покращення ситуації може стати створення НДПР, що також є однією з вимог для успішної євроінтеграції України у сфері охорони навколишнього середовища.

2. За останнє десятиріччя в США та Європі продовжує зростати інтерес до фундаментальних досліджень радону, включаючи дослідження шляхів його міграції в ґрунті, а також молекулярно-біологічних та фізико-хімічних механізмів його канцерогенного та мутагенного впливу. Десятки міжнародних програм з дослідження радононебезпеки підтримуються Міністерством енергетики та Федеральним агентством з охорони навколишнього середовища США, а також Комісією з радіаційного захисту Європейського союзу.

3. Вирішення проблеми радонової небезпеки ділиться на завдання діагностики та технології подальшої нейтралізації впливу радону на людину та біологічні об'єкти. За відсутності можливості проведення радонових досліджень за встановленою методикою, прийнятою у Європейському Союзі (наземне вимірювання щільністю 1 км x 1 км тощо) розглянуто перспективи використання дистанційних методів оцінки радононебезпеки: такі методи дозволять ефективно визначати потенційно радононебезпечні локації для подальшої наземної завірки та значною мірою зменшити кількість вимірювань, а також полегшити процес розробки необхідних протирадонових заходів.

4. Проаналізовано основні джерела надходження радону в приміщення. Об'ємна активність радону в повітрі приміщень формується в основному із ґрунту. Шляхи проникнення радону у приміщення: щілини в монолітних підлогах, монтажні з'єднання, тріщини у стінах, фундаментах, проміжки навколо комунікаційних труб, порожнини стін, штукатурка (гіпс), природний газ (кухня), сланцева глина (алюмін), фосфатний шлак, вода (ванна) та ін.

5. Практична значимість проблеми надходження радону у житлові приміщення полягає в тому, що варіабельність активностей радону у повітрі житлових приміщень України визначають наступні фактори:

- гідрогеологічні особливості території;

- кліматичні аспекти регіонів (температура, кількість опадів, тиск, переважаючі напрямки вітру та ін.);

- інженерно-планувальне рішення будівель;

- режим вентилявання (прівітрювання) приміщень.

6. При будівництві екологічно безпечних будинків необхідно дотримуватись наступних вимог: проведення радозахисних заходів; введення відповідальності за проведення таких заходів, а також за оцінку доз опромінення радоном від природних джерел та здійснення заходів щодо їх зниження.

7. За оцінками американських фахівців, заходи з протидії радоновій небезпеці можуть принести економіці значну вигоду (до 700 тисяч доларів за кожне врятоване життя).

РОЗДІЛ 2

ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПОТЕНЦІЙНОЇ РАДОНОНЕБЕЗПЕКИ У МІСТІ КИЄВІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1. Використання дистанційних методів для вирішення екологічних проблем

Дистанційні методи широко використовуються для вирішення екологічних проблем. Ці методи дозволяють отримувати інформацію про стан геосистем з відстані, що є економічно ефективним рішенням і дозволяє досліджувати великі за площею території.

Дані, отримані за допомогою дистанційних методів, є просторовою основою для інженерно-екологічних досліджень. Вони можуть використовуватися для створення карт, моделювання процесів, оцінки впливу та моніторингу стану довкілля, що може являти собою визначення таких характеристик, як тип рослинності, стан ґрунтів, водних об'єктів та масштаби антропогенного впливу. Дистанційні методи можуть використовуватися для визначення джерел забруднення, оцінки ризику надзвичайних ситуацій та розробки заходів з охорони довкілля.

Геопросторовий аналіз потенційної радононебезпеки за допомогою геоінформаційних технологій (ГІС) дозволяє ідентифікувати та аналізувати області, де існує підвищений ризик виникнення радонової небезпеки. Він включає в себе збір, аналіз та візуалізацію геопросторових даних, пов'язаних із земельною геологією, ґрунтами, геологічними особливостями та іншими факторами, які впливають на концентрацію радону в приміщеннях і навколишньому середовищі. Основні аспекти геопросторового аналізу радононебезпеки включають:

1. Збір геопросторових даних. Збір різних типів геоданих є першим етапом у геопросторовому аналізі радононебезпеки. Ці дані можуть включати геологічні

карти, дані про ґрунти, топографічні карти, інформацію про будівельні матеріали, дані про системи вентиляції, інформацію про джерела водопостачання тощо.

2. Створення геопросторових шарів. Зібрані дані обробляються та перетворюються в геопросторові шари, які можуть бути відображені на географічних картах. Наприклад, можна створити шари, які показують рівні радону в ґрунтах, геологічні особливості, а також розподіл будівель та їх характеристики.

3. Аналіз ризику. За допомогою ГІС можна проводити аналіз ризику для визначення областей з підвищеним ризиком радононебезпеки. Це може включати в себе визначення областей, де геологія сприяє накопиченню радону, а також ділянок з поганими системами вентиляції або іншими факторами, що підвищують ризик.

4. Візуалізація та звітність. Результати аналізу можуть бути візуалізовані на картах або в інших геопросторових форматах. Це допомагає органам регулювання та власникам будівель легше розуміти ризики та приймати рішення щодо запобігання радонній небезпеці.

5. Встановлення заходів безпеки. ГІС можуть бути використані для розробки імплементації заходів для запобігання радоновій небезпеці. Наприклад, визначення будівель для встановлення систем вентиляції або підвищення герметизації фундаментів.

6. Моніторинг та оновлення: Геопросторовий аналіз є постійним процесом, і дані можуть бути постійно оновлювані. Моніторинг рівнів радону в будівлях і довкіллі є важливою частиною системи безпеки.

Таким чином, використання методів геопросторового аналізу потенційної радононебезпеки може суттєво допомогти урядам та іншим зацікавленим сторонам приймати обґрунтовані рішення щодо управління радоновим ризиком та сприяти зниженню радонової небезпеки для населення в окремих регіонах.

2.2. Опис території дослідження

Геологічний опис досліджуваної території Києва вказує на те, що місто розташоване в межах північно-східного схилу Українського щита (рисунок 2.1). Геологічно ця область має двошарову будову: кристалічний фундамент, що покритий

фанерозойським чохлам. Товщина чохла зростає з заходу на схід, коливаючись від десятків до кількох сотень метрів, в залежності від регіону міста [67].



Рис. 2.1. Тектонічні структури на території України

Територія Києва з геоструктурної точки зору належить до Росинсько-Тікицького мегаблоку Українського щита, який в північному напрямку занурюється під осадові відклади Дніпровсько-Донецької западини [47, 58]. Глибина ґрунтових вод перевищує 3 метри на багатьох ділянках міста з частковим підтопленням окремих зон. Місто має складну геологію, що обумовлено наявністю густої мережі розломів. Розломи простягаються в різних напрямках, але найбільші з них розташовані в центральній частині міста. До найбільших розломів належать Київський, Пушча-Водицький, Дарницький, Святошинський та Пирогівський та інші [64].

Геологічна будова території Києва та його околиць характеризується наявністю дрібних блоків, які утворилися внаслідок розломів. Ці розломи мають як

ортогональну, так і діагональну орієнтацію. У верхній частині розрізу земної кори спостерігається тріщинуватість порід.

За рівнем концентрації радону в ґрунті міська агломерація Києва поділяється на три категорії:

1. Безпечна - це територія, де не виявлено перевищення допустимого рівня концентрації радону в приміщеннях будівель (50-100 Бк/м³).
2. Підвищеної небезпеки - це територія, де в окремих приміщеннях будівель є ймовірність перевищення допустимого рівня концентрації радону (> 100 Бк/м³).
3. Небезпечна - це територія, де в приміщеннях будівель виявлено перевищення допустимого рівня концентрації радону більше 200 Бк/м³.

У Києві виявлено будинки, де значення концентрації радону в повітрі сягає 900 Бк/м³ за його концентрації в ґрунтах у цих районах до 20 кБк/м³ і більше.

Території з концентрацією радону в ґрунтовому повітрі понад 40 кБк/м³ вважаються особливо небезпечними для проживання населення. До небезпечних територій також відносять площі з концентрацією радону від 20 до 40 кБк/м³. Такі території переважно виявлені у північно-західній і південно-західній частинах міста. У центральній, північній та східній частинах міста також є окремі ділянки з високими концентраціями радону.

Отже, в Києві аномалії радону в ґрунтовому повітрі спостерігаються переважно в районах, де є тектонічні розломи. Ці розломи перекриті тонким шаром четвертинних моренних суглинків і глин. У правобережній частині міста глибина залягання корінних порід менша, ніж у лівобережній, тому такі умови більш характерні для правого берегу Києва. Через ці розломи радон з надр надходить у ґрунт, а потім і в повітря приміщень, тобто основним механізмом формування підвищених і аномальних рівнів радону в будівлях Києва є надходження радіоактивних газів з надр через зони підвищеної проникності.

2.3. Методика геопросторового аналізу щодо виявлення найбільш потенційно радононебезпечних локацій

Методи вимірювання радону використовують його фізичні та ядерні властивості, зокрема наявність альфа-частинки для ідентифікації. Сучасні методології оцінки радононебезпечності території зазвичай базуються на прямому вимірюванні даного газу на земній поверхні, проте на сьогоднішній день досить перспективним напрямом є використання непрямих методів оцінки концентрації радону за допомогою дистанційних засобів, зокрема із застосуванням геоінформаційних систем. Комплексна оцінка радонової небезпеки територій з використанням дистанційних методів як одного з етапів дослідження дозволить у повному обсязі та з більшою точністю відстежувати наявність радонових аномалій.

Основне завдання дослідження полягало у виявленні найбільш пропускоздатних територій шляхом аналізу геотектонічних структур та створення і накладання відповідних карт просторової щільності розломів та лінеаментів, оскільки дані параметри є інформативними показниками властивостей земної кори, які визначають її проникність для рідин та газів, що сприяє надходженню радону до поверхні землі.

2.3.1. Поняття лінеаментів та розломів

Аналіз наукової літератури, що стосується класифікації лінеаментів, показує, що, незважаючи на столітню історію цього терміну, досі не існує єдиного і чітко визначеного поняття лінеаменту [68]. Розвиток геотектоніки, зокрема вивчення глибинних розломів, з одного боку, і застосування дистанційних методів у геології, з іншого, призвели до двоїстого розуміння терміну "лінеамент". У геотектоніці він вказує на глибинні розломи великого масштабу, тоді як у дистанційних дослідженнях він охоплює лінійні структури різної важливості, які виділяються під час аналізу дистанційних зображень [69].

Лінеamenti представляють собою лінійні або лінійно організовані елементи геологічної структури земної поверхні, які відображають особливості геологічної будови, включаючи глибинні розриви та тріщинуватість у складі земельного фундаменту. Він важливий як індикатор геологічних порушень та використовується для розпізнавання при пошуку корисних копалин за допомогою дистанційних методів [70].

Розлом – це порушення суцільності гірських порід, без зміщення або зі зміщенням порід поверхнею розриву. Великі розломи земної кори є результатом зсуву тектонічних плит на стиках. Оскільки найчастіше розломи складаються не з єдиної тріщини чи розриву, а зі структурної зони однотипних тектонічних деформацій, які асоціюються з площиною розлому, такі зони називають зонами розлому.

Розломність земної кори є важливим фактором, що визначає еманетність порід, тобто здатність виділяти радон. Радононосність тектонічних зон залежить від просторової щільності розломів, які підвищують пористість гірських порід, утворюють тріщини та порожнини. У результаті, в тектонічних зонах накопичується радон, підвищується його еманацийний коефіцієнт і вони стають радононосними підвідними структурами.

2.3.2. Можливості використання ArcGIS10

Геоінформаційна система ArcGIS 10, створена американською компанією Esri, пропонує різноманітні можливості для обробки та аналізу геопросторових даних. В загальному, ArcGIS використовується для вирішення різних видів завдань, включаючи картографію, аналіз даних, моделювання і багато інших. Програмне забезпечення має ряд розширень та додаткових інструментів, які розширюють його функціональність та дозволяють виконувати різні завдання у галузі геоінформатики:

1. Картографія та візуалізація даних: ArcGIS 10 дозволяє створювати професійні карти, включаючи статичні та інтерактивні карти. Функціональністю

програми зокрема передбачено створення картографічних проєкцій, додавання шарів та налаштування вигляду карти.

2. Аналіз геопросторових даних: перелік інструментів для проведення аналізу геоданих дозволяє виконувати операції, як-от буферизація, перетин, об'єднання, виділення та багато інших для вивчення взаємозв'язків між об'єктами на карті.

3. Моделювання геопросторових процесів: ArcGIS 10 має можливості для аналізу гідрологічних, кліматичних, транспортних і інших явищ та прогнозування результатів на основі введених даних та створеної моделі.

4. Спеціальні аналізи: спеціальні інструменти для аналізу конкретних явищ, як-от розподіл ресурсів, аналіз сільськогосподарських угідь, виявлення геологічних аномалій і багато інших.

5. Робота з растровими та векторними даними: ArcGIS 10 підтримує як растрові, так і векторні дані, що дозволяє працювати з різними типами геоданих. Це дозволяє аналізувати супутникові знімки, розробляти карти високої деталізації, робити геореференцію та багато іншого.

6. Інтеграція з базами даних: застосунок ArcGIS 10 може бути легко інтегрований з реляційними базами даних, що дозволяє зберігати та ефективно керувати величезною кількістю геоданих в ефективний спосіб.

7. Робота з мережами: програмне забезпечення дозволяє аналізувати та моделювати різноманітні мережі, як-от транспортні, водопостачання, електромережі та інші.

2.3.3. Використані первинні матеріали

У рамках цього дослідження розглянуто проблему виявлення потенційної радонової небезпеки на території мегаполісу Києва за допомогою дистанційних методів. Проведено геопросторове моделювання щільності лінеаментів території міста Києва, використовуючи геоінформаційну систему ArcGIS. У якості вихідних даних застосовано зображення поверхні рельєфу супутника ALOS з набору AW3D30

та картографічні дані OpenStreetMap (рисунок 2.2).

Набір даних AW3D30 є глобальною цифровою моделлю поверхні (global digital surface model – DSM) із горизонтальною роздільною здатністю приблизно 30 метрів, створеною із зображень, зібраних за допомогою Панхроматичного дистанційного інструмента для стереокартографування (PRISM) на борту супутника Advanced Land Observing Satellite (ALOS).



Рис 2.2. Територія дослідження мегаполісу (місто Київ)

2.4. Алгоритм побудови карти щільності лінеаментів 4-го порядку території міста Києва

Важливим етапом дослідження є опрацювання методики та створення послідовності кроків для побудови карт щільності лінеаментів. Алгоритм побудови карти щільності лінеаментів складається з наступних етапів:

1. Завантаження вихідних даних (зображення поверхні рельєфу супутника ALOS з набору AW3D30) у програму ArcGIS 10.

2. Створення окремого шару відмивки рельєфу.
3. Відновлення поверхні стоків за даними поверхні рельєфу.
4. Візуалізація карти водотоків та виділення лінеаментів 4 порядку.
5. Створення сітки для просторового моделювання.
6. Розрахунок кількості лінеаментів у кожній комірці.
7. Об'єднання даних щодо кількості лінеаментів у кожній комірці з центрами комірок.
8. Побудова та оформлення карти щільності лінеаментів 4 порядку.

На рисунку 2.4, а зображено оцифровану ділянку поверхні з накладеним шаром відмивки рельєфу (Hillshade), після чого використано функцію Color Ramp (рисунок 2.4, б), яка "розмальовує" значення пікселів растрових даних, використовуючи певні кольори зі шкали grayscale (відтінки сірого) на основі обраної колірної шкали. Функція Hillshade (рисунок 2.3) створює представлення поверхні місцевості у градаціях сірого з урахуванням відносного розташування сонця для затінення зображення. Це якісний метод візуалізації топографії, який не дає абсолютних значень висоти.

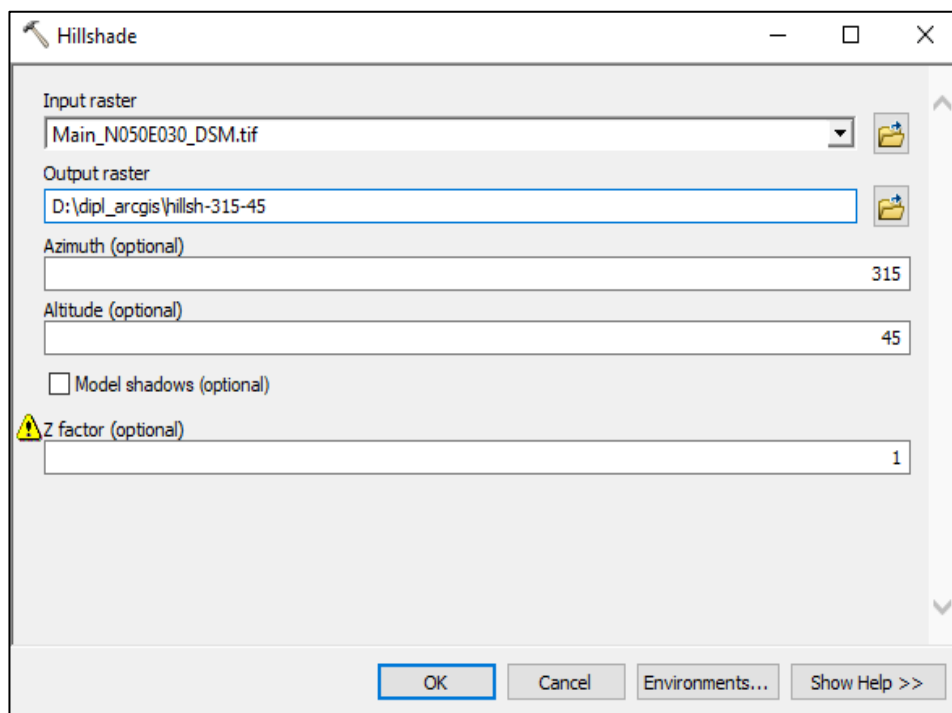
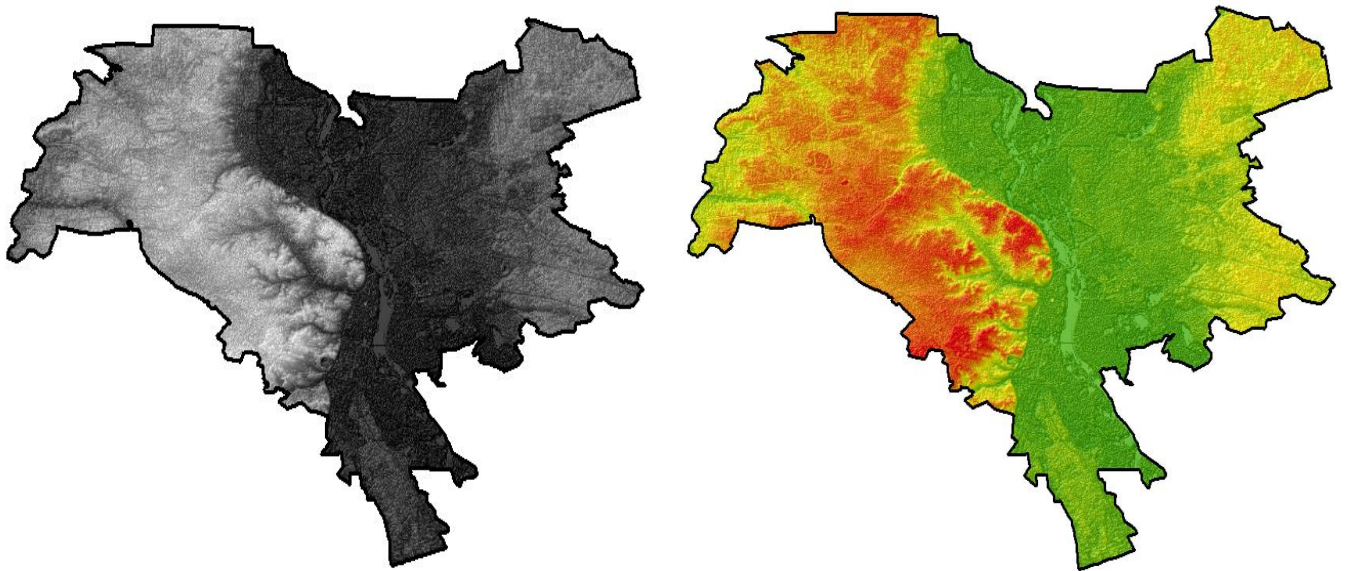


Рис. 2.3. Інструмент Hillshade

Одразу помітно, що територія Києва, яка знаходиться на лівому березі Дніпра, характеризується більш рівнинним рельєфом, в той час правий берег знаходиться на високому Київському плато, що в свою чергу розділене ярами на окремі височини, як-от Печерські пагорби, гора Щекавиця, гора Хорєвиця, Батієва гора та ін.



а) Застосування функції *Hillshade*

б) Функція *Color Ramp* поверх шару відмивки

Рис. 2.4. Дані поверхні рельєфу

Отримана карта поверхні рельєфу необхідна для подальшої побудови поверхневих напрямків потоку (рисунок 2.6, а) за допомогою функції ‘Flow Direction’ (рисунок 2.5). Цей інструмент приймає поверхню рельєфа як вхідні дані та виводить растр, що показує напрямок потоку з кожної комірки.

Для побудови карти щільності за водотоками 4-го порядку, необхідно провести їх вибірку (для цього використано функцію ‘Select by Attributes’), результат зображено на рисунку 2.6, б.

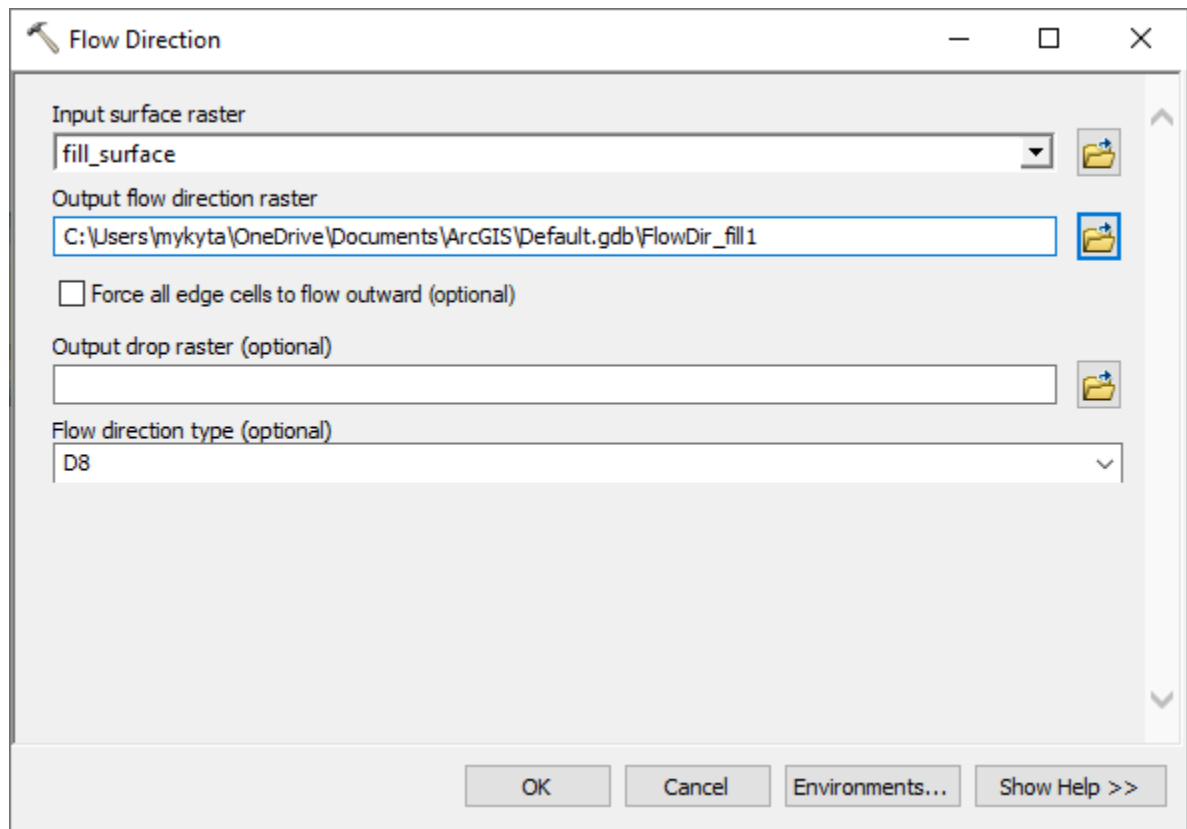
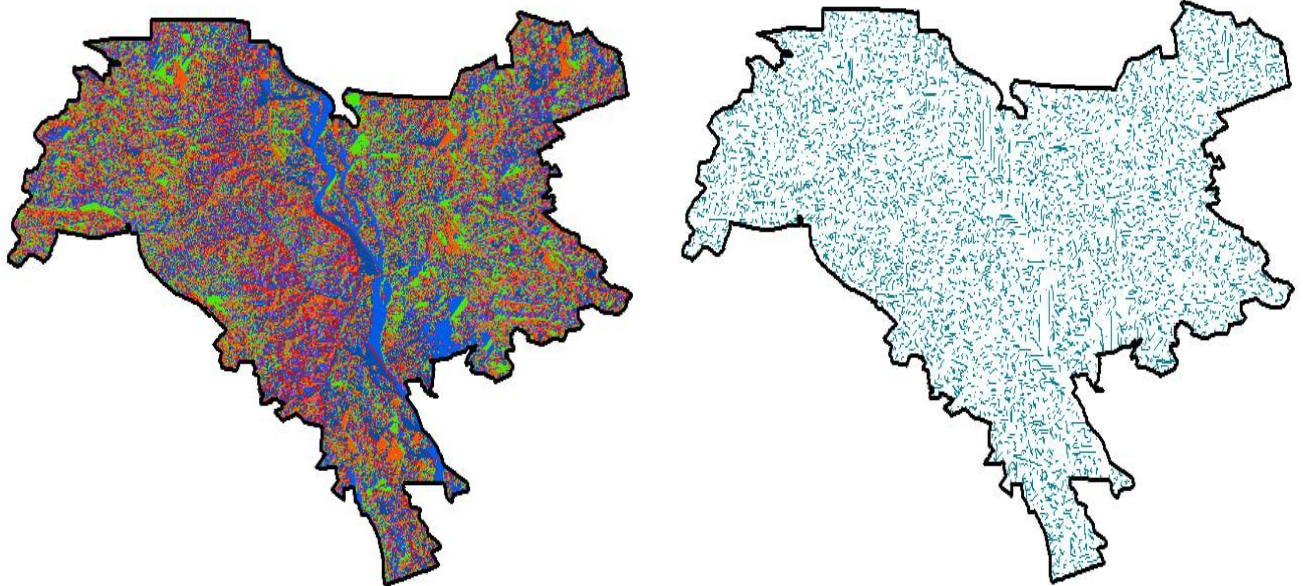


Рис. 2.5. Процедура створення поверхні потоків за допомогою Flow Direction



а) відновлення поверхні стоків згідно з даними поверхні рельєфу б) виділення водотоків (лінеаментів) 4-го порядку

Рис. 2.6. Етапи геопросторового моделювання щільності лінеаментів:

Далі за допомогою функції Create Fishnet (рисунок 2.7) було створено сітку 20x20 для просторового моделювання (рисунок 2.8), розраховано та занесено до окремої таблиці кількість лінеаментів 4-го порядку у кожній комірці (функція ‘Zonal statistics as table’ (рисунок 2.9) узагальнює значення растру в межах зон іншого набору даних і зводить результати до таблиці – рисунок 2.10), об’єднано дані отриманої таблиці з центрами кожної з комірок (за доп. інструменту ‘Joins and Relates’ – рисунок 2.11).

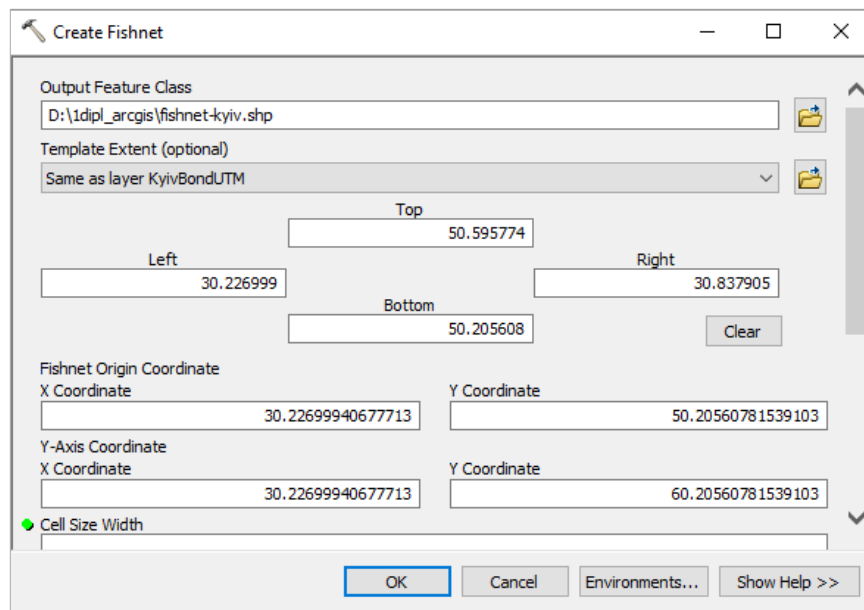


Рис. 2.7. Меню інструмента Flow Direction

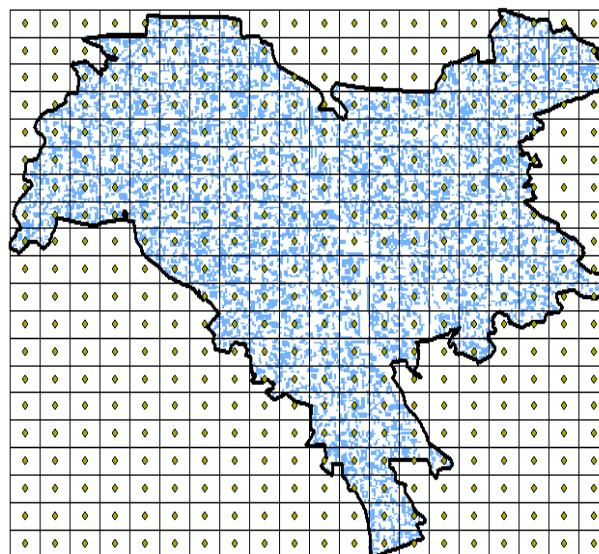


Рис. 2.8. Створена сітка для просторового моделювання

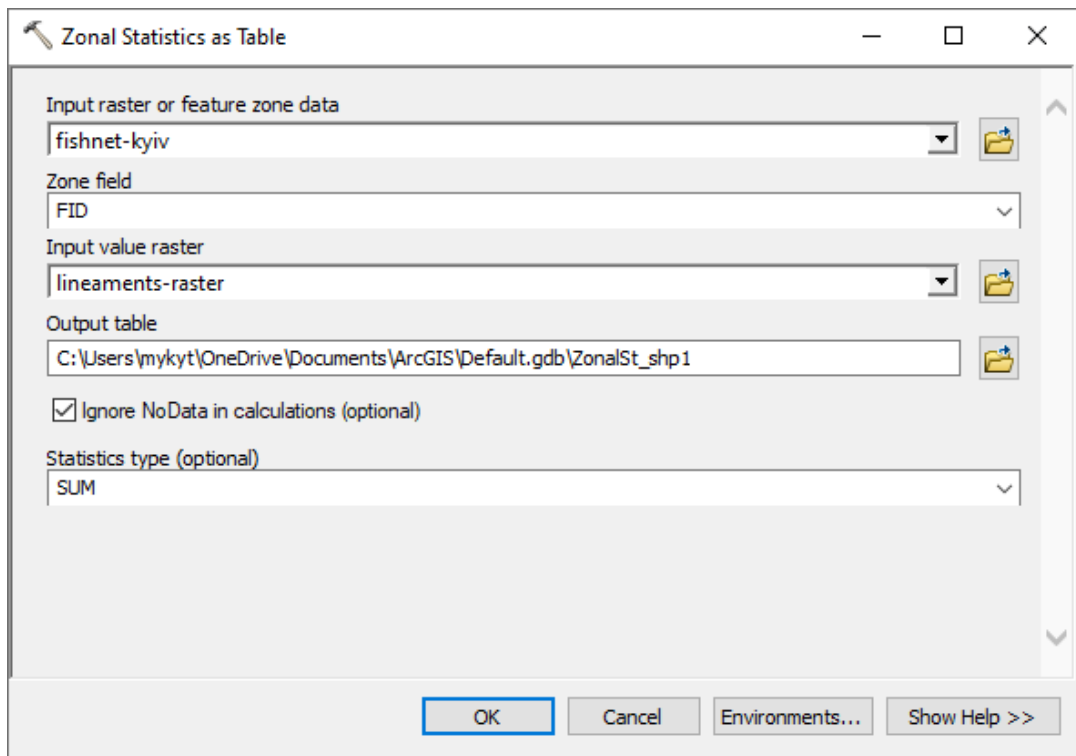


Рис. 2.9. Процедура занесення сум кількості лінеаментів 4-го порядку, що припадає на кожну комірку до таблиці (Zonal statistics as table)

OBJECTID *	FID *	COUNT	AREA	SUM
144	285	130	0.000293	520
150	291	128	0.000288	512
90	228	124	0.000279	496
70	206	123	0.000277	492
123	262	122	0.000275	488
44	168	120	0.00027	480
87	225	119	0.000268	476
65	197	118	0.000266	472
88	226	118	0.000266	472
91	229	118	0.000266	472
127	266	118	0.000266	472
151	292	118	0.000266	472
178	324	118	0.000266	472
129	268	117	0.000263	468
56	188	116	0.000261	464
89	227	116	0.000261	464
98	236	116	0.000261	464
136	275	116	0.000261	464

Рис. 2.10. Таблиця розрахунку кількості лінеаментів у кожній комірці

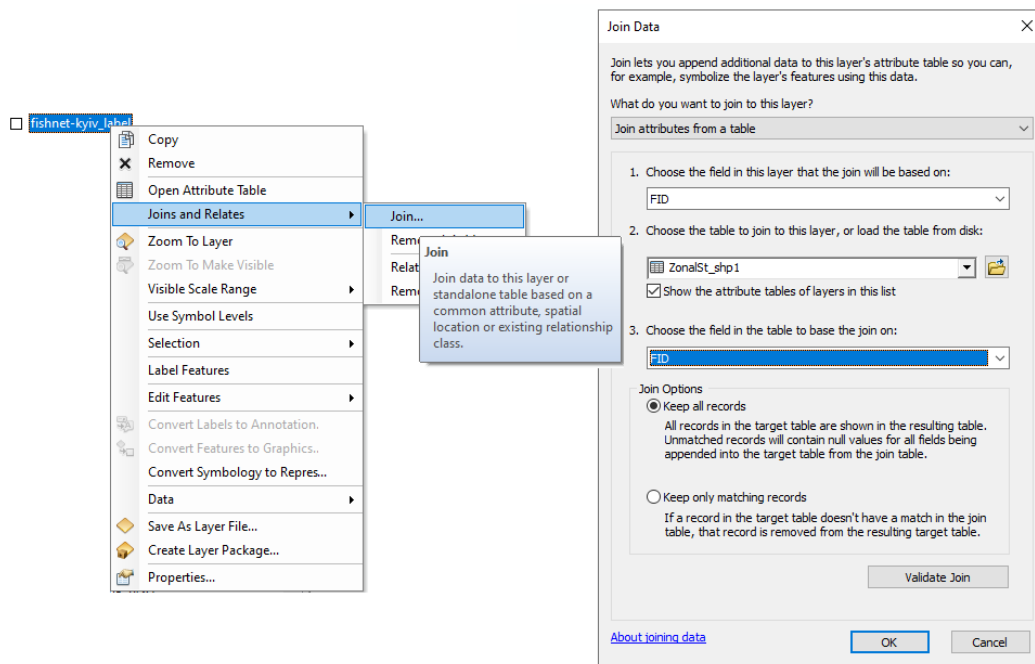


Рис. 2.11. Процедура об'єднання даних отриманої таблиці з центрами кожної з комірок (Joins and Relates)

Завершальним етапом є створення поверхні щільності лінеаментів за вищевказаними даними, визначивши просторову розрізненість вихідного файлу ('Topo to Raster' інтерполіює гідрологічно правильну растрову поверхню з точкових, лінійних і полігональних даних – рисунок 2.12) – результат зображено на рисунку 2.13.

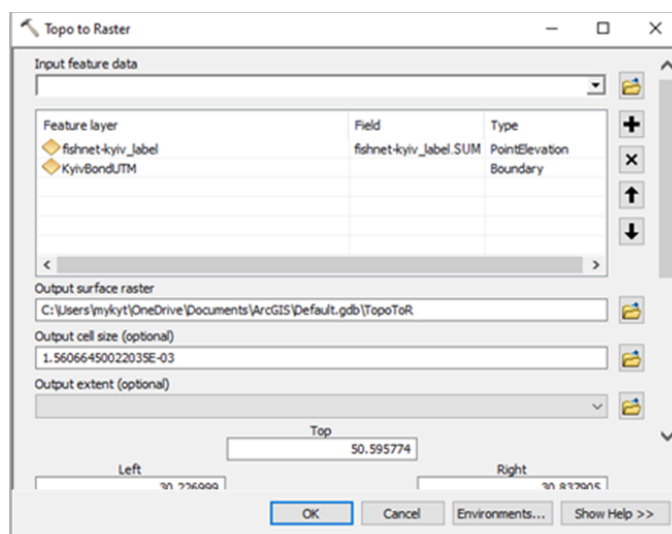


Рис. 2.12. Меню інструмента Topo to Raster

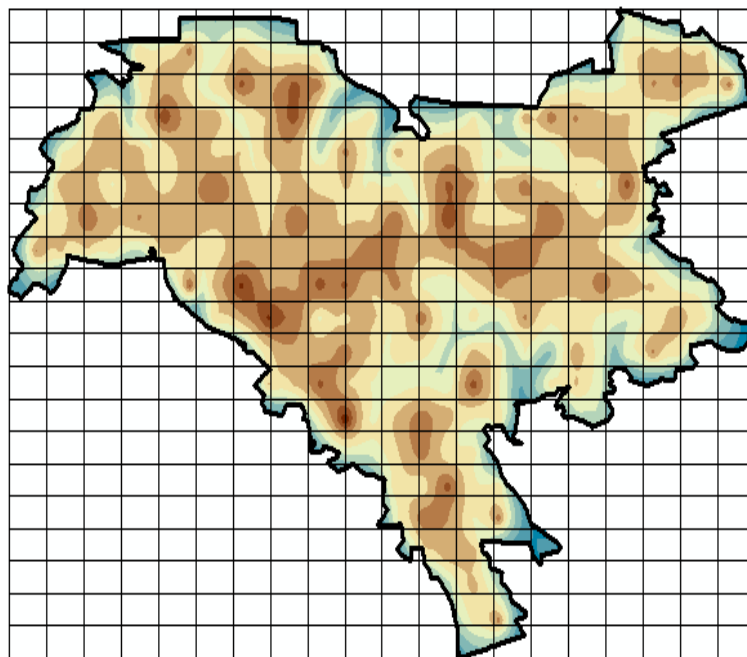


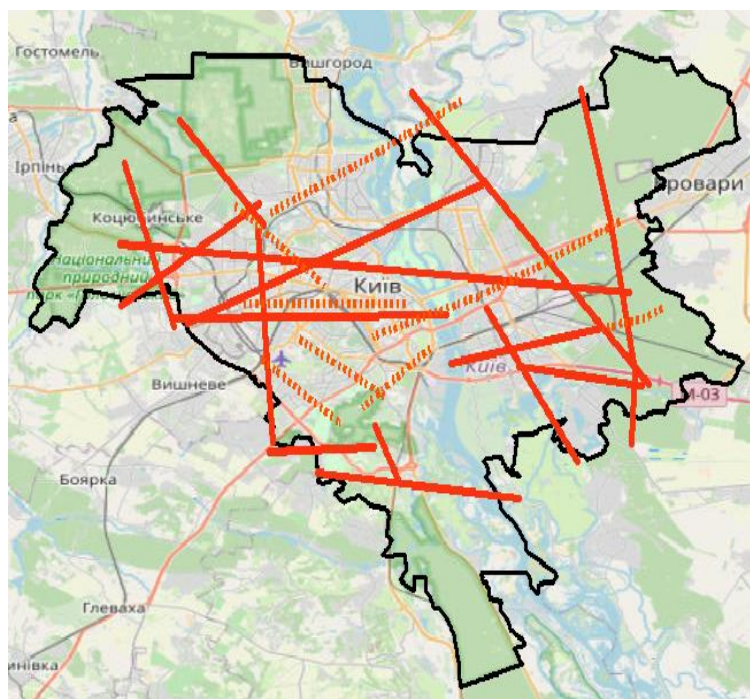
Рис. 2.13. Карта щільності лінеаментів 4-го порядку території міста Києва

2.5. Алгоритм побудови карти щільності розломів території міста Києва

Процес побудови карти щільності розломів схожий до описаного в п. 2.4. алгоритму та складається з наступних етапів:

1. Проведення геопросторової прив'язки геологічної карти.
2. Нанесення на карту достовірних та недостовірних розломів.
3. Створення сітки для просторового моделювання.
4. Конвертація лінійних просторових об'єктів (розломів) в набір растрових даних.
5. Розрахунок кількості розломів у кожній комірці.
6. Об'єднання даних щодо кількості розломів у кожній комірці з центрами комірок.
7. Побудова та оформлення карти щільності розломів.

Проведено геопросторову прив'язку геологічної карти, після чого нанесено глибинні достовірні та недостовірні розломи, таким чином отримавши карту поверхні розломів (рисунок 2.14).



— достовірні розломи; - - - - - недостовірні розломи

Рис. 2.14. Карта розломів Києва

Далі за методикою, ідентичною до описаної раніше для лінеаментів, використовуючи інструмент ‘Create Fishnet’ створено сітку для просторового моделювання – результат показано на рисунку 2.15.

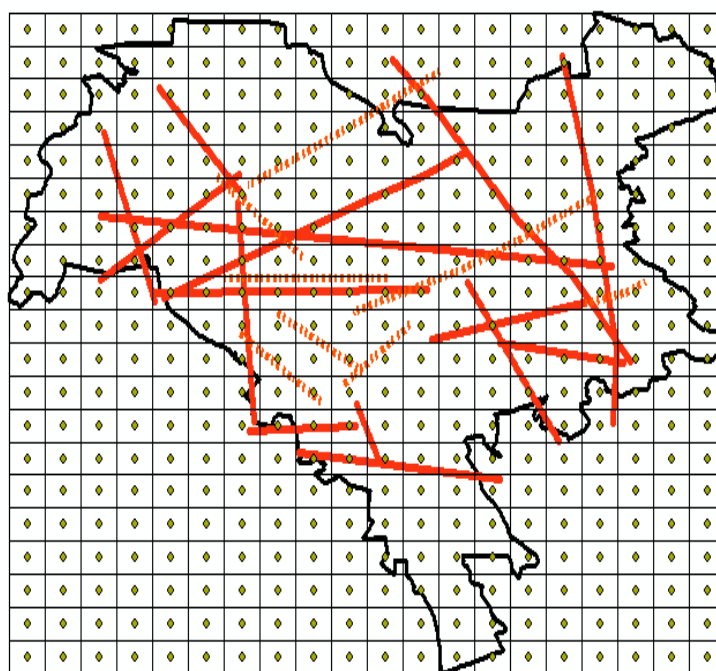


Рис. 2.15. Сітка для просторового моделювання щільності розломів

Для конвертації поверхні розломів у растровий формат використано функцію 'Polyline to Raster'. Щоб розрахувати кількість розломів у кожній комірці застосовано функцію 'Zonal statistics' з модуля Spatial Analyst Tools, отримано результат у формі таблиці – рисунок 2.16.

OBJECTID *	FID *	COUNT	AREA	SUM
1	112	14	0.000004	154
2	113	56	0.000017	616
3	128	114	0.000034	1254
4	129	156	0.000047	1776
5	130	103	0.000031	1139
6	131	106	0.000032	1166
7	132	81	0.000025	891
8	133	10	0.000003	110
9	135	22	0.000007	176
10	146	86	0.000026	972
11	147	96	0.000029	960
12	148	60	0.000018	600
13	149	104	0.000031	1164
14	150	27	0.000008	189
15	154	66	0.000002	528
16	155	55	0.000017	440
17	156	15	0.000005	45
18	166	72	0.000022	1008

Рис. 2.16. Таблиця розрахунку кількості розломів у кожній комірці

Далі об'єднано дані отриманої таблиці з центрами кожної з комірок (функція 'Joins and Relates').

Останнім етапом є використання функції Topo to Raster для отримання поверхні щільності розломів – результат показано на рисунку 2.17.

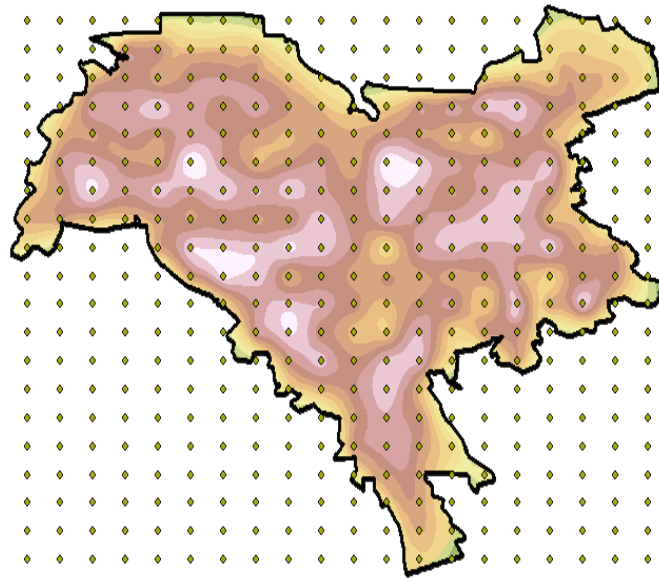
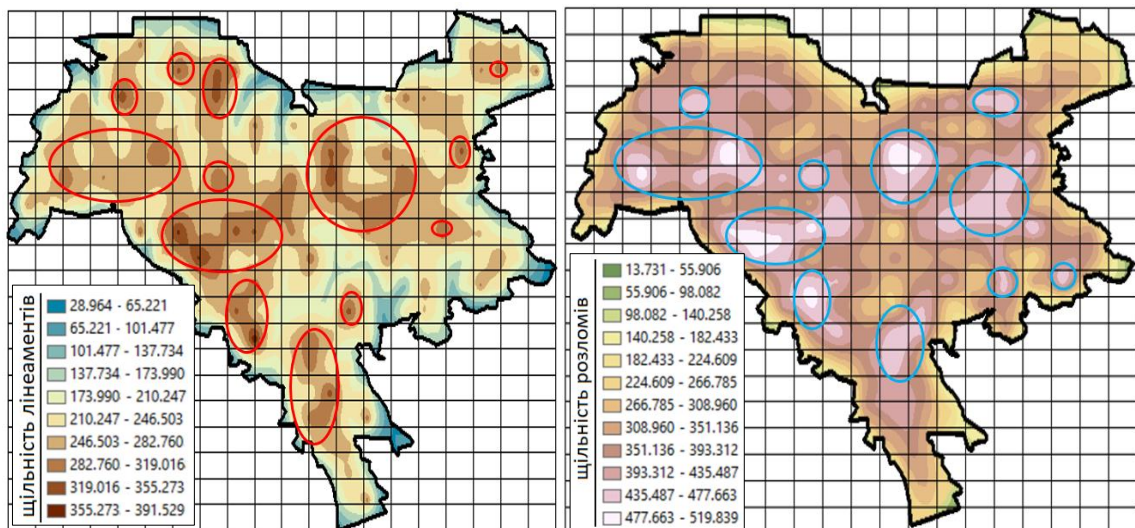


Рис. 2.17. Поверхня геопросторової щільності розломів

2.6. Аналіз результатів досліджень

Після аналізу отриманих змодельованих карт щільності лінеаментів 4-го порядку та щільності розломів виділено основні аномальні зони (рисунок 2.18, а та 2.18, б відповідно) – їм відповідають ділянки з максимальною кількістю лінеаментів/розломів, що припадають на кожную з комірок.



а) Карта щільності лінеаментів 4-го порядку території міста Києва

б) Карта щільності розломів території міста Києва

Рис. 2.18. Отримані карти щільності

Далі проведено взаємне накладання обраних зон для ідентифікації ділянок з одночасно високими показниками щільності лінементів та розломів відповідно: даний крок спрямований на виключення даних (ділянок) недостатньої достовірності. Таким чином передбачається, що в зонах перетину ділянок підвищених концентрацій розломів та лінементів ступінь потенційної радононебезпеки є більшим. Результуючу карту Києва з демонстрацією зон потенційної підвищеної радононебезпеки та районами, що піддаються найбільшому радоновому впливу показано на рисунку 2.19.

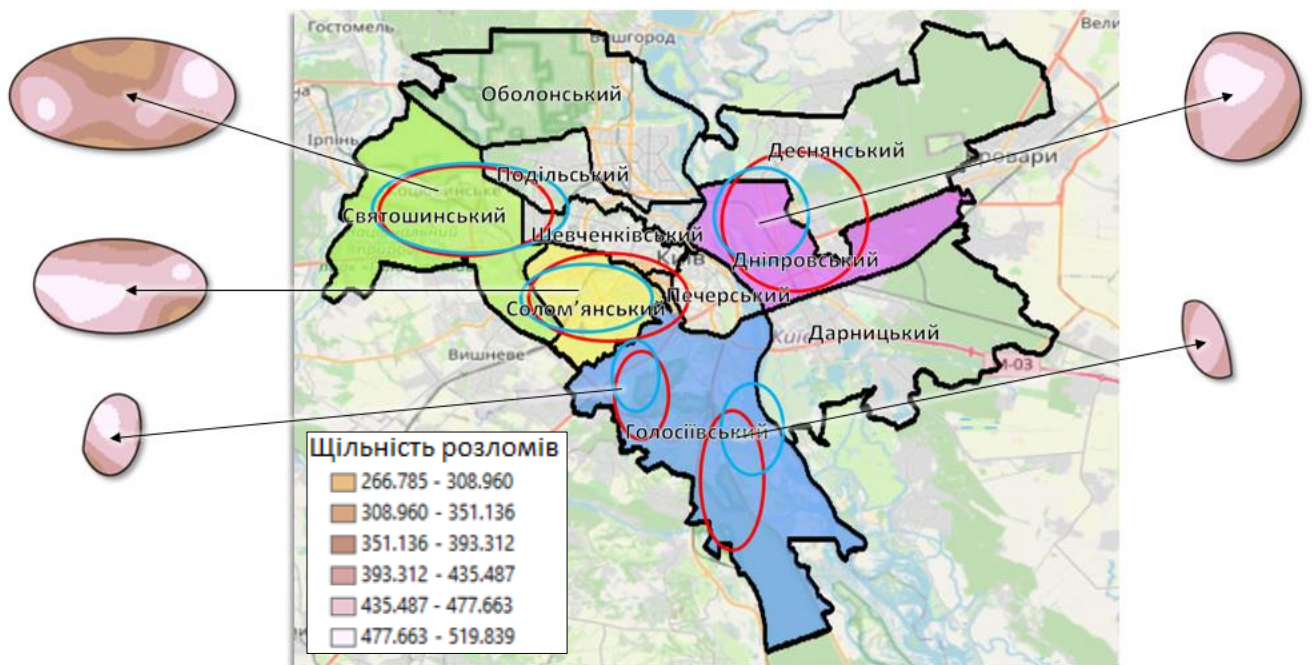


Рис. 2.19. Зони потенційної підвищеної радононебезпеки в м. Києві

Найбільший рівень ризику радонової небезпеки спостерігається переважно у правобережних районах Києва, особливо можна відмітити крайні правобережні райони: Святошинський, Солом'янський (зокрема, масив Відрадний) та окремі ділянки Голосіївського (станція метро «Виставковий центр» та Жуків острів). На лівому березі територією з потенційно підвищеним рівнем радону можуть бути Русанівські сади Дніпровського району Києва. В цілому передбачається, що територія

західної частини Києва (правий берег) є більш радононебезпечною, що також підтверджується більшою загальною концентрацією розломів.

2.7. Висновки до розділу

1. Розглянуто перспективи використання дистанційних методів (зокрема геоінформаційних систем) для вирішення екологічних проблем. Геоінформаційні технології відносять до непрямих методів, що дозволяють проводити геопросторовий аналіз потенційної радононебезпеки з метою ідентифікування та аналізу областей, де концентрація радону в приміщеннях і навколишньому середовищі може бути підвищеною. Для цього використовується збір, аналіз та візуалізація геопросторових даних, пов'язаних із земельною геологією, ґрунтами, геологічними особливостями та іншими факторами, які впливають на концентрацію радону. Використання дистанційних методів при комплексній оцінці радонової небезпеки територій є важливим етапом сучасних досліджень, що дозволить детальніше та точніше виявляти радонові аномалії.

2. Проаналізовано та описано методуку геопросторового аналізу зображення поверхні рельєфу супутника ALOS з набору AW3D30 у поєднанні з картографічними даними OpenStreetMap для виявлення найбільш потенційно радононебезпечних локацій. Основне завдання дослідження полягало в проведенні картографування найбільш пропускоздатних для радону територій. Для цього використовувався аналіз геотектонічних структур, а саме просторової щільності розломів та лінеаментів 4-го порядку, оскільки дані параметри є інформативними показниками властивостей земної кори, які визначають її проникність для рідин та газів, зокрема радону.

3. Побудовано карти щільності лінеаментів 4-го порядку та щільності розломів, після чого проведено аналіз найбільш аномальних ділянок в зонах їхнього перетину на двох картах з метою виявлення територій, де одночасно спостерігається висока щільність лінеаментів та розломів, оскільки радонові аномалії в ґрунтовому повітрі спостерігаються переважно в районах з тектонічними розломами. Таким чином, зони

перетину між високою концентрацією розломів та лінеаментів мають найбільший потенціал радонової небезпеки.

4. Найвищий рівень радонової небезпеки спостерігається переважно в правобережних районах Києва, зокрема Святошинському, Солом'янському та Голосіївському районах. На лівому березі зоною потенційної радононебезпеки можуть бути Русанівські сади Дніпровського району. Загалом, територія західної частини Києва (правий берег) вважається більш радоново небезпечною, що також підтверджується загальною вищою концентрацією розломів. У правобережній частині міста глибина корінних порід менша, ніж на лівобережній, що створює більш сприятливі умови для виходу радону в атмосферне повітря.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно з Законом України «Про охорону праці від 14.10.1992 № 2694-ХІІ», «Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності» [71].

Суб'єктом охорони праці в даному випадку є оператор персонального комп'ютера в одному з кабінетів Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук.

Вибір суб'єкта пов'язаний з професійною діяльністю, що проводиться в напрямку обраної теми дипломної роботи – Геопросторовий аналіз потенційної радононебезпеки у місті Києві з використанням геоінформаційних технологій.

3.1. Аналіз умов праці на робочому місці

Робочі місця є частинами загального приміщення або декількох основних приміщень, призначених для трудової діяльності та оснащених необхідним обладнанням, наприклад, принтери, персональні комп'ютери, комп'ютерні столи, шафи для зберігання документів та ін.

Робота суб'єкта охорони праці проходить в одному з кабінетів першого поверху дослідної установи – Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України. Фактичні значення розмірів робочого приміщення наступні: площа приміщення складає $S = a \times b = 5 \text{ м} \cdot 6 \text{ м} = 30.00 \text{ м}^2$ та об'єм $V = S \cdot h = 30.00 \text{ м}^2 \cdot 3 \text{ м} = 90 \text{ м}^3$.

Згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», на одне робоче місце, де встановлено персональний

комп'ютер (ПК), нормативна площа для кожного робочого місця повинна складати не менше 6,0 м² та об'єм приміщення повинен бути не менше 20,0 м³ [72]. В даному випадку робоче приміщення має 3 повністю облаштованих робочих місця, що відповідає державним санітарним нормам.

Основними джерелами шуму в робочому приміщенні є різноманітні технічні пристрої, як-от 3 персональних комп'ютера, принтер, обігрівач, кондиціонер, а також інші пристрої та електроніка. Також для забезпечення комфортних умов роботи використовується система кондиціонування у теплу погоду та система обігріву в холодну.

3.2. Аналіз шкідливих та небезпечних чинників працівника

Аналіз шкідливих та небезпечних чинників у робочому приміщенні є важливою складовою системи охорони праці. Декілька аспектів, які можуть створювати ризики для здоров'я суб'єкта охорони праці включають:

Радонове випромінювання. В Україні на основі сучасної концепції захисту людини від радіації, рекомендацій Міжнародної комісії з радіологічного захисту розроблено нормативно-правові документи щодо забезпечення радіаційної якості продукції будівельного виробництва. Основним документом, що регулює допустимі рівні опромінення *людини радоном* та містить інформацію про заходи *захисту* від його впливу є Закон України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» [73]. Для будівель та споруд, де люди перебувають постійно, рівень вмісту ²²²Rn у повітрі не повинен перевищувати 100 Бк/м³.

Враховуючи те, що робоче місце суб'єкта охорони праці знаходиться у правобережному (більш потенційно радононебезпечному через високу концентрацію розломів) районі Києва, а також безпосереднє перебування суб'єкта у межах першого поверху, ризик накопичення надмірного опромінення радоном працівником протягом довготривалого часу роботи є досить високим. Як вже було вказано раніше, вдихання надмірних концентрацій радону може збільшити ризик виникнення раку легень, особливо у некурців.

Ергономіка робочого місця. Ергономіка робочого місця відіграє ключову роль у забезпеченні комфорту та безпеки працівників. Згідно з ДСТУ 8604:2015, «...конструкція робочого місця та взаємне розташування всіх його елементів (сидіння, органів керування, засобів відображення інформації тощо) повинні відповідати антропометричним, фізіологічним і психологічним вимогам, а також характеру виконуваної роботи» [74]. Обладнання та робоче місце в цілому має бути індивідуалізованим: шляхом регулювання висоти столів, сидіння й простору для ніг, а також висоти монітору та його відстані до суб'єкта можна досягти оптимального положення тіла працюючого під час роботи. Погана ергономічність робочого місця може викликати фізичну та психологічну втому, що призводить до стресу, погіршення концентрації та зниження ефективності роботи, а також сприяти появі захворювань опорно-рухового апарату: сколіоз, остеохондроз, викривлення хребта.

Штучне освітлення. Згідно з вимогами ДБН В.2.5-28:2018 у будівлі використовується система загального штучного освітлення [75].

Для оптимального освітлення робочого приміщення мають використовуватись розрядні та світлодіодні джерела світла з колірною температурою від 2400 К до 6800 К. Порівняно з тепловими джерелами, вони мають більшу світлову віддачу та більший термін служби за однакової потужності.

У випадку відхилення фактичних характеристик штучного освітлення приміщень від державних норм освітлення, працівники установи після довготривалої роботи можуть відчувати дискомфорт та втому очей, головні болі (що пов'язано з використанням світлодіодних джерел з низькою частотою мерехтіння, недостатнім рівнем освітлення та ін.). Використання неправильної температури кольору світла може впливати на настрій та емоційний стан працівників, спричиняючи стрес або дискомфорт у роботі і впливає на загальну продуктивність роботи.

Умови мікроклімату. Мікроклімат виробничих приміщень і стан у робочій зоні визначають якість умов праці, створюючи основу для комфортного та продуктивного виконання завдань. Основні фактори, як-от температура, вологість та швидкість руху повітря є ключовими для оцінки метеорологічних умов і впливають на фізіологічний стан працівників.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», затверджених постановою МОЗ і Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 42 роботи, які виконуються працівником, що в свою чергу користується комп'ютером, можна віднести до категорії 1а (витрата енергії дорівнює 105-140 Вт (90-120 ккал/год.) [76]. Оптимальні величини основних характеристик мікроклімату наведено в таблиці 4.

Таблиця 3.1.

Оптимальні величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочому приміщенні.

Період року	Категорія робіт	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху, м/сек.
Холодний	Легка 1а	22-24	60-40	0,1
Теплий	Легка 1а	23-25	60-40	0,1

Якщо температура в приміщенні надто низька чи висока, це може призвести до дискомфорту та негативно вплинути на продуктивність працівників. Повітря з низькою вологістю може призводити до загострення алергійних реакцій, так само занадто висока вологість може призвести до виникнення плісняви та розвитку бактерій, що також викликає алергічні реакції та інші проблеми зі здоров'ям. Також пил та алергени в повітрі можуть виникати через погану вентиляцію.

Електробезпека. Електробезпека у робочому приміщенні, де знаходяться комп'ютери є важливою складовою охорони праці. Основні вимоги щодо електробезпеки у приміщеннях, де встановлені персональні комп'ютери відображені у НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями», затверджених Наказом Міністерства соціальної політики України 14.02.2018 № 207 [77].

Оскільки за ступенем електробезпеки робоче приміщення можна віднести до приміщень без підвищеної небезпеки, основна небезпека в даному випадку пов'язана

з можливістю ураження суб'єкта охорони праці електричним струмом або можливістю виникнення пожежі, що може бути пов'язане з використанням неякісних електропровідників або подовжувачів, перевантаженням мережі (перегріву та підвищеною вірогідністю короткого замикання) внаслідок підключення великої кількості електронних пристроїв до одного електричного вводу та ін.

3.3. Рекомендації щодо нормалізації концентрації радону в повітрі робочої зони

Зниження рівня опромінення населення від радону – важливе завдання, що вимагає наукового та практичного підходу та стає актуальним у контексті громадського здоров'я. В цьому контексті важливо вдосконалювати методи та підходи до визначення радонових ризиків.

Вирішення завдання зменшення рівня іонізуючих випромінювань радіонуклідів об'єктів будівництва можливе на стадії проектування будинку, коли можна розробити та забезпечити комплексне рішення підвищення радіаційної якості продукції, що в першу чергу задовольняє принципам концепції радіаційного захисту людини та нормам радіаційної безпеки [78]. Аналогічний висновок можна зробити щодо забезпечення захисту екологічно безпечних житлових будинків від радонового проникнення. На стадії вибору місця будівництва будівлі, оздоблювальних матеріалів та матеріалів будівельних конструкцій, проектування, підбору обладнання для експлуатації будівлі необхідно проводити обов'язковий комплексний аналіз шляхів можливого попадання радону всередину житлових приміщень та ефективну оцінку варіантів та способів зниження радонового ризику.

Для зниження концентрації радону в існуючих будівлях вживаються різні профілактичні заходи. Найефективнішим методом захисту працівників від високих концентрацій радону є впровадження ефективної системи вентиляції. Швидкість, з якою видаляється радон з повітря робочих зон, має прямий вплив на рівень опромінення працівників від його дочірніх продуктів розпаду. Ефективність вентиляційної системи полягає у мінімізації часу, коли насичене радоном повітря

перебуває в робочих зонах, та в максимізації перебування працівників у середовищі, насиченому свіжим повітрям. Систематичне провітрювання (за умови надходження радону через повітря з вулиці, а не з ґрунту) дозволить знизити концентрацію радону в приміщенні в десятки разів.

Також для запобігання радоновому накопиченню у повітрі робочої зони облаштовують системи відводу радону в основі будівлі або під монолітною підлогою, проводять герметизацію тріщин та отворів у фундаменті та стінах, через які може потрапляти радон.

3.4. Пожежна безпека

Пожежна безпека є однією з найважливіших складових системи охорони праці. Згідно з законодавством, власник або керівник підприємства має зобов'язання створити безпечні умови праці для працівників. Однак, відповідальність за пожежну безпеку несуть не лише керівники, але й самі працівники, які повинні дотримуватися правил пожежної безпеки під час своєї діяльності.

3.4.1. Правова основа діяльності в галузі пожежної безпеки

На загальнодержавному рівні питання пожежної безпеки регулюється рядом нормативно-правових актів. Одним з основних документів є Кодекс цивільного захисту України, введений у дію 01.07.2013 року. У цьому Кодексі визначені інструменти, методи та способи організації пожежної безпеки на різних підприємствах, незалежно від їх форми власності, а також визначено повноваження керівників організацій у випадку критичних ситуацій. Стаття 2 Кодексу цивільного захисту України визначає пожежну безпеку як стан, при якому відсутній ризик виникнення пожежі та будь-якої шкоди, яку вона може заподіяти людям, майну та навколишньому середовищу [79]. Правила пожежної безпеки на підприємстві мають на меті запобігти виникненню пожеж та вразливості до таких подій. А у разі

виникнення пожежі, правила пожежної безпеки спрямовані на захист людей, матеріально-технічної бази та організацію своєчасного та ефективного гасіння вогню.

Важливим документом є Правила пожежної безпеки України № 1417 у чинній редакції від 01.03.2023, що є нормативною базою для регулювання питань пожежної безпеки на всіх підприємствах, незалежно від кількості працівників [80].

У зазначених вище нормативних документах (Кодекс цивільного захисту та Правила № 1417) вказано, що власник організації несе повну відповідальність за забезпечення належного протипожежного режиму. Особа, яка здійснює керівництво, несе відповідальність за дотримання встановлених вимог та нормативів, які регулюють питання пожежної безпеки. Крім забезпечення фінансового успіху організації, роботодавець має зобов'язання забезпечити виконання умов трудового договору відповідно до законодавчих норм. Порушення цих обов'язків може призвести до кримінальної або адміністративної відповідальності для роботодавця.

Керівник має можливість делегувати свої повноваження у сфері пожежної безпеки іншим працівникам шляхом видання відповідного наказу та посадової інструкції з детальним описом обов'язків та повноважень нового відповідального співробітника. Важливим аспектом є підтвердження ознайомлення працівника з документом шляхом підпису. Засоби забезпечення вогнеборного режиму повинні бути чітко визначені відповідно до внутрішніх положень та локальних документів підприємства.

3.4.2. Перелік протипожежних заходів

Протипожежні заходи поділяються на організаційні та технічні в залежності від методів їх впровадження та застосування.

Організаційні заходи спрямовані на створення системи безпеки та управління ризиками пожежі в підприємстві. До них входять: розробка та впровадження правил та інструкцій з пожежної безпеки; проведення систематичних інструктажів працівників; періодична перевірка приміщень після закінчення робочого дня для виявлення потенційних загроз; контроль за станом пожежної техніки та інвентарю.

Технічні заходи спрямовані на забезпечення відповідності будівельних стандартів та вимог щодо пожежної безпеки. До них входять: дотримання пожежних норм і правил при будівництві (ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [81], ДБН В.1.2-7:2021 «Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека» [82]); підтримання робочого стану опалювальних та вентиляційних систем; заборону використання інструментів, що порушують пожежні вимоги; належну організацію робочих приміщень; встановлення автоматичних систем сповіщення та гасіння пожеж, а також пожежного водопостачання.

3.4.3. Встановлення режиму протипожежної безпеки

Режим протипожежної безпеки на підприємстві встановлюється відповідними розпорядчими документами роботодавця, а це передбачає створення відповідної документації та розміщення необхідних засобів пожежогасіння у визначених місцях.

Інструкція є ключовим документом, де має бути чітко описано категорію приміщень з точки зору пожежної безпеки, вимоги до збереження шляхів евакуації, розміщення додаткових виходів, місць для паління, а також процедури зберігання легкозаймистих та пожежовибухових речовин, якщо такі використовуються на підприємстві. Також важливо визначити дії персоналу у випадку виникнення пожежі, що є вимогою згідно з Правилами пожежної безпеки України № 1417 (розділ 4 пункт 2) [80].

Необхідним є розміщення копій інструкцій у місцях загального доступу, щоб всі працівники могли ознайомитися з цією важливою інформацією (забезпечення доступності цієї інформації може врятувати життя у випадку небезпеки).

Додатково до організаційних заходів важливо регулярно проводити тренувальні заходи, що дозволить працівникам засвоїти та відпрацювати план дій у разі пожежі. Це надасть можливість персоналу діяти координовано та ефективно в кризових ситуаціях, зменшуючи ризик постраждання та збитків для підприємства.

3.5. Висновки до розділу

1. Проведено аналіз умов праці на робочому місці: встановлено, що санітарно-гігієнічні умови виконуються та відповідають державним нормам.

2. Визначено основні шкідливі та небезпечні чинники, які можуть створювати ризики для здоров'я суб'єкта (працівника) протягом його перебування у межах робочого місця: радонове випромінювання, ергономіка робочого місця, штучне освітлення, умови мікроклімату, електробезпека.

3. Вирішення проблеми радонової небезпеки можна умовно поділити на два основних завдання. По-перше, це завдання діагностики, яке включає в себе вимірювання та моніторинг концентрації радону та його дочірніх продуктів розпаду в повітрі та у будівлях, де люди проживають та працюють. Це дозволяє виявити потенційні джерела радонового забруднення та оцінити ризики для здоров'я.

По-друге, вирішення цієї проблеми включає розробку та впровадження технологій для подальшої нейтралізації впливу радону на людину та біологічні об'єкти. Це може включати в себе покращення системи провітрювання, герметизацію приміщень, а також заходи для зменшення концентрації радону в ґрунтах та воді. Усвідомлення серйозності проблеми та впровадження відповідних заходів може значно зменшити ризики, пов'язані з радоною небезпекою і покращити якість життя людей.

4. Розглянуто нормативно-правову базу, що регулює питання пожежної безпеки в Україні: протипожежні заходи зводяться до вирішення організаційних (розробка правил пожежної безпеки, перевірки приміщень) та технічних (дотримання будівельних стандартів, належний стан систем опалення та вентиляції) проблем. Ознайомлення персоналу з інструкціями та регулярні тренування з пожежної безпеки є важливими аспектами для ефективного реагування в небезпечних ситуаціях.

5. Для підвищення рівня охорони праці в робочому приміщенні рекомендується проводити регулярні аудити, вивчати відгуки працівників та вживати заходи для усунення виявлених проблем. Також важливо надавати працівникам навчання з охорони праці та встановлювати існуючі ефективні стандарти безпеки.

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу сучасного стану проблеми радононебезпеки досліджено актуальність даної проблеми для України та, зокрема, для міста Києва, а також перспективи використання дистанційних методик оцінки радононебезпеки. У зв'язку з відсутністю умов проведення радонових досліджень згідно з установленою в Європейському Союзі методикою (наземні вимірювання щільністю 1x1 км), застосування дистанційних методів оцінки радононебезпеки може бути корисним для ефективного визначення потенційно небезпечних радонових ділянок – це дозволить зменшити кількість необхідних наземних вимірювань та спростити процес розробки відповідних протирадонових заходів.

2. Встановлено, що незважаючи на наявні правила радіаційної безпеки в Україні, що є значно жорсткішими, ніж в країнах ЄС, обсяги досліджень та ступінь опрацювання радонової проблеми в Україні в цілому значно поступаються передовим європейським країнам – про це, зокрема, свідчить відсутність в Україні національного плану дій щодо радону.

3. Зважаючи на те, що Київ знаходиться у межах східного схилу Українського щита (для якого характерні підвищені концентрації урану в надрах, а також досить велика кількість тектонічних порушень), дослідження рівнів радонової небезпеки в межах міста є нагальним завданням.

4. На підставі методики визначення потенційно радононебезпечних територій з використанням геопросторового аналізу в програмному середовищі ArcGIS 10 вперше дистанційно проаналізовано ступінь радононебезпеки для міста Києва. Зібрано базу геологічних та геоморфологічних даних, що послужило основою для даного дослідження: у якості вихідних даних було використано картографічні дані OpenStreetMap, а також зображення рельєфу супутника ALOS з набору AW3D30.

5. Запропоновано розглянути карту щільності лінеаментів 4-го порядку та карту щільності розломів. На отриманих картах виділено основні аномальні зони (з максимальною кількістю лінеаментів/розломів відповідно). Після чого проведено

ідентифікацію ділянок з одночасно високими показниками щільності лінеаментів та розломів. Сформовано результуючу карту Києва з описом районів, що піддаються найбільшому радоновому впливу.

6. Встановлено, що найбільший рівень ризику радонової небезпеки міста Києва спостерігається переважно у правобережних районах, зокрема Святошинський, Солом'янський (зокрема, масив Відрадний) та Голосіївський (станція метро «Виставковий центр» та Жуків острів). В цілому передбачається, що територія західної частини Києва (правий берег) є більш радононебезпечною, що також підтверджується більшою концентрацією розломів.

СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ

ДЖЕРЕЛ

1. Джур Є. О., Крикун Ю. А. Нові радіаційно-захисні матеріали. Матер. міжнар. симп. Дніпро, 2001. С. 14.
2. Запрудін В. Ф., Соколов І. А., А. С. Беліков та ін. Радонова безпека житлових будівель / ред. І. А. Соколов. Дніпропетровськ: Придніпровська держ. академія будівництва та архітектури. 2008. 311 с.
3. Bronevitskiy S. P. Method of organizational and technological design to reduce the dose of radiation on construction sites. Construction of Ukraine. Kyiv. 1996. № 2. P. 45– 46.
4. Лось І. П., Зеленський А. В., Бузинний М. Г. Рівні опромінення населення України за рахунок природних джерел радіоактивності Інформ. бюлетень. Аварія на ЧАЕС. Київ, 1992. Т. 1, вип. 2. 382–386 с.
5. Дудар Т. В. Методологічні засади екологічної безпеки територій з техногенно-підсиленими джерелами природного походження: дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 21.06.01 "Екологічна безпека". Київ, 2020. 332 с.
6. Директива Ради 2013/59/Євратом від 5 грудня 2013 року про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання, і скасування директив 89/618/Євратом, 90/641/Євратом, 96/29/Євратом, 97/43/Євратом і 2003/122/Євратом. Європейське співтовариство з атомної енергії, Європейський Союз. 2013. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_006-13 (дата звернення: 14.12.2023).
7. Павленко Т. О. Наукове обґрунтування системи радіаційного захисту населення України від радону. Дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 5.26.05 "Інженерна екологія". Київ, 1996. 125 с.
8. Rovenská K. N., Fojtíková I., Martell M. et al. Radon Action Plans in European Member States and the UK. Dealing with Radon Risk on Workplaces: NORM X symposium & RICOMET conference (Utrecht, May 9 – 13, 2022). Utrecht. 2022. 15 P.

9. Marshall L. J., Marshall V. R. Ernest Rutherford, the «True discoverer» of Radon Bulletin for the History of Chemistry. 2003. Vol. 28 № 2. P. 76-83.

10. Martin K. Radon Gas Detection via Vegetation Spectra Responses Using Spaceborne Remote Sensing: A Tool for Uranium Exploration: A Thesis Submitted to the College of Graduate and Postdoctoral Studies In Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Science In the Department of Geography and Planning. Saskatoon, 2019. 59 p. URL: <https://harvest.usask.ca/bitstream/handle/10388/12284/MARTIN-THESIS-2019.pdf> (Last accessed: 14.12.2023).

11. Dubois G. An overview of radon surveys in Europe. European Commission. JRC. Italy, 2005. 168 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/260095238_An_overview_of_radon_surveys_in_Europe (Last accessed: 14.12.2023)

12. Ionizing radiation: Sources and biological effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations. New York, 1982. 768 p.

13. Prichard H. M., Gesell T. F. Radon in the Environment. Advances in Radiation Biology. 1984. Volume 11. P. 391-428. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-035411-5.50014-9> (Last accessed: 14.12.2023)

14. Tommasino L., RADIOCHEMICAL METHODS | Radon. Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition). 2005. P. 32-44. URL: <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00520-3> (Last accessed: 14.12.2023)

15. Castren O., Asikainen M., Annanmäki M. and Stenstrand K. High natural radioactivity of bored wells as a radiation hygienic problem in Finland. Proceedings of the 4th International Congress of the International Radiation Protection Association. Paris, 1977. pp. 1033-1036.

16. Edelstein M. R., Makofske W. J. Radon's Deadly Daughters: Science, Environmental Policy, and the Politics of Risk. Lanham: Rowman & Littlefield Publishers, 1998. 361 p.

17. Field R. W., Steck D. J., Smith B. J. et al. Residential Radon Gas Exposure and Lung Cancer: The Iowa Radon Lung Cancer Study. American Journal of Epidemiology. 2000. Vol. 151, No. 11. P. 1091-2000. URL:

https://cheec.uiowa.edu/sites/cheec.uiowa.edu/files/Residential%20Radon%20Gas%20Exposure%20and%20Lung%20Cancer_Iowa%20Study.pdf (Last accessed: 14.12.2023)

18. Neuberger J. S., Lynch C. F., Kross B. C. et al. Residential radon exposure and lung cancer: evidence of an urban factor in Iowa. *Health Physics*. 1994. Vol. 66, Issue 3. P. 263-269. URL: <https://doi.org/10.1097/00004032-199403000-00005> (Last accessed: 14.12.2023)

19. Leonard B. E. *Human Lung Cancer Risks From Radon: Influence From Bystander and Adaptive Response Non-Linear Dose Response Effects*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. 198 p.

20. Vaillant L., Bataille C. Management of radon: A review of ICRP recommendations. *Journal of Radiological Protection: official journal of the Society for Radiological Protection*. 2012. Vol. 32, Issue 3. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0952-4746/32/3/R1> (Last accessed: 14.12.2023)

21. Жук Л. В., Васійчук В. О., Гончарук В. Є., Качан С. І. Проблема радонового ризику в екології. *Екологічна безпека та природокористування*. 2013. Вип. 12. С. 43-50. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebp_k_2013_12_7

22. Taylor J., Symonds P., Shrubsole C. et al. Radon and housing research in England and Wales. *WHO Collaborating Centre for Housing and Health Newsletter*. 2017. Vol. 27. P. 9-14. URL: https://www.researchgate.net/publication/328743633_Radon_and_housing_research_in_England_and_Wales (Last accessed: 14.12.2023)

23. Жовинський Е. Я., Крюченко Н. О., Жук О. А., Клос В. Р. *Геохімічні аспекти визначення територій екологічного ризику*. Київ: Геохім. та рудоутв, 2016. Вип. 37. С. 100—105.

24. *Health Risk of Radon*. United States Environmental Protection Agency. 2023. URL: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon> (Last accessed: 14.12.2023).

25. Clavensjo B., Akerblom G. *Radon Book. Measures against Radon*. Stockholm: Formas, 1994. 131 p.

26. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising

Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Official Journal of the European Union. 17.1.2014. 73 p. URL: <http://eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=oj:l:2014:013:0001:0073:en:pdf> (Last accessed: 14.12.2023)

27. Тимошенко Е. А. Проблема надходження радону в житлові приміщення та шляхи придушення радонового ризику в екологічно безпечному будинку: збірник наукових праць «Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування». Дніпро, 2015. Вип. 81. С. 249-255 (Серія «Створення високотехнологічних екокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку»). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2015_81_39 (дата звернення: 14.12.2023).

28. Dudar T. V. Methodological principles of the environmental safety for the territories having technologically enhanced radiation sources of natural origin. Dissertation abstract for obtaining the degree of Doctor of Science. Kyiv, 2020. 44 p.

29. Dudar T. V., Titarenko O. V., Nekos A. N. et al. Geospatial modeling of radon-prone area. Nuclear and Radiation Safety. – Kyiv. – P. 28-37. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.3\(87\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.3(87).04) (Last accessed: 14.12.2023)

30. Уткін В. І., Юрков А. К. Динаміка виділення радону із масиву гірських порід як короткостроковий предвісник землетрусу. Геологія та геофізика, 2010, т. 51, № 2, с. 277-286.

31. Остапчук В. В. Порівняльний аналіз густини потоку радону з будівельних матеріалів різних видів. Студентський вісник НУВГП. Рівне: НУВГП, 2018. Ч. 1(9). С. 95-98. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/11716/> (дата звернення: 14.12.2023).

32. Лебедь О. О., Дейнека О. Ю., Рибалко О. В., Попова Є. А. Визначення залежності об'ємної активності радону від висоти в житлових будинках м. Рівного. Рівне: Вісник НУВГП, Серія «Технічні науки». Випуск 4 (48). 2009. С. 131–138.

33. Baskaran M. Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies. Springer Geochemistry. 2016. 260 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-21329-3> (Last accessed: 14.12.2023).

34. Pinault J., Baubron J. Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature data: a new approach for radon concentration modelling. *Journal of Geophysical Research* 1996. Vol. 101, No. 2. P. 3157-3171.
35. Szabó K. Z., Jordan G., Horváth Á., Szabó C. Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 129. P. 107–120. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.12.009> (Last accessed: 14.12.2023).
36. Garcia-Talavera M., Garca-Perez A., Rey C., Ramos L. Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information. *Journal of Radiological Protection*. 2013. Vol. 33. P. 605–620. URL: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/3/605> (Last accessed: 14.12.2023).
37. Haider L. M., Shareef N. R., Darwoysh H. H., Mansour H. L. Study of the effect of electromagnetic fields on indoor and outdoor radon concentration. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 7 p. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1003/1/012104> (Last accessed: 14.12.2023).
38. Orlyuk M. The link of radon and magnetic anomalies on the territory of Ukrainian shield and Kyiv. *Scientific journal "Geodynamics"*. 2018. Vol. 1, No. 24. P. 80-90. URL: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.080> (Last accessed: 14.12.2023).
39. Al-Zoughool M., Krewski D. Health effects of radon: A review of the literature. *International Journal of Radiation Biology*. 2009. Vol. 85, Issue 1. P. 57-69. URL: [10.1080/09553000802635054](https://doi.org/10.1080/09553000802635054) (Last accessed: 14.12.2023).
40. World Health Organization. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva. 2009. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health> (Last accessed: 14.12.2023).
41. Lecomte JF., Solomon S., Takala J. et al. ICRP Publication 126: Radiological Protection against Radon Exposure. International Commission on Radiological Protection. 2014. Vol. 43, Issue 3. URL: <https://doi.org/10.1177/0146645314542212> (Last accessed: 14.12.2023).

42. Radiation protection and safety of radiation sources. International Basic Safety Standards: General Safety Requirements Part 3. International Atomic Energy Agency. Vienna. 2014.

43. Bochicchio F., Fenton D., Fonseca H. et al. National Radon Action Plans in Europe and Need of Effectiveness Indicators: An Overview of HERCA Activities. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19, Issue 7. 17 p. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074114> (Last accessed: 14.12.2023).

44. Trevisi R., Leonardi F., Buresti G. et al. Radon levels in dwellings and workplaces: a comparison with data from some European countries. Journal of the European Radon Association. 2022. Vol. 3. 13 p. URL: <https://doi.org/10.35815/radon.v3.7581> (Last accessed: 14.12.2023).

45. Лось І. П. Існуючі дози опромінення населення України. Ядерна та радіаційна безпека. 2009. Т.12, №1. С. 18-22.

46. Сердюк А. М., Павленко Т. О., Риган М. М. та ін. Радіологічні наслідки аварії на Чорнобильській АЕС крізь призму проблем протирадіаційного захисту населення України. Довкілля та здоров'я. 2016. № 1. С. 22-30. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dtz_2016_1_6 (дата звернення: 14.12.2023).

47. Komov I. L. Monitoring of radon in Ukraine. Proceedings of the International Radon Symposium – Volume II. American Association of Radon Scientists and Technologists, 2003. 24 p.

48. Cinelli G., Tollefsen T., Bossew P. et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation. Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Volume 196. P. 240-252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.008> (Last accessed: 14.12.2023).

49. Gruber V., Baumann S., Alber O. et al. Comparison of radon mapping methods for the delineation of radon priority areas – an exercise. Journal of the European Radon Association. 2021. Volume 2. 14 p. URL: <https://doi.org/10.35815/radon.v2.5755> (Last accessed: 14.12.2023).

50. Pavlenko T. A., Los I. P., Aksenov N. V. Exposure doses due to indoor Rn-222 in Ukraine and basic directions for their decrease. Radiation Measurements, 1997. Vol. 28, Issue 1. P. 733-738.

51. Orliuk M. I., Marchenko A. V., Yatsevskiy P. I. Radon and geomagnetic anomalies in Ukraine. *Dopovidi NAS of Ukraine*, 2018. Vol. 5. P. 60-66.

52. Pavlenko T., German O., Fruziuk M. et al. The Ukrainian Pilot Project “Stop Radon”. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 2014. Vol. 29, Issue 2. P. 1-7.

53. Molchanov O., Soroka Y., Buzinny M. et al. Dispersion of radon in the atmosphere around old uranium mill tailings. *Nukleonika*, 2010. Vol. 55, Issue 4. P. 535-538.

54. Як радон впливає на здоров'я громадян? Офіційний портал Києва: Київська міська державна адміністрація. URL: https://kyivcity.gov.ua/bezpeka_ta_pravoporiadok/pam_yatky/yak_radon_vplivaye_na_zdorovya_gromadyan/ (дата звернення: 14.12.2023).

55. Bronevitskiy S. P. Method of organizational and technological design to reduce the dose of radiation on construction sites *Construction of Ukraine*. Kyiv. 1996. № 2. P. 45–46.

56. Radon-prone Areas: the Ukrainian Shield case study / T.V. Dudar et al. 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, 13-16 May 2019.

57. Лебедь О. О., Мислінчук В. О., Андрєєв А. А. Радон: моніторинг та Геоекологічний аналіз його впливу на екосистему міста Рівного. Монографія. Рівне: РМАНУМ, 2017. 208 с.

58. Діденко П. І. Вплив радону на населення України. Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. Київ: Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», 2012. № 4. С. 60—67.

59. Боротьба з радоном у житловому секторі. Сайт з питань ядерної безпеки, радіаційного захисту та нерозповсюдження ядерної зброї. 2021. URL: <https://www.uatom.org/2021/07/28/borotba-z-radonom-u-zhitlovomu-sektori.html> (дата звернення: 14.12.2023).

60. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Державні гігієнічні нормативи. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [Чинний від 2000-12-07]. Міністерство охорони здоров'я (МОЗ), 1997. 100 с.
61. Аксьонов М. В., Павленко Т. О., Фризюк М. А. та ін. До питання оцінки рівнів радону для здійснення протирадонових заходів. *Environment & health*. 2017. № 4. С. 22-26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dtz_2017_4_7
62. Brenner D. J. ICRP Publication 65: Protection Against Radon-222 at Home and at Work. *International Journal of Radiation Biology*. 1993. Vol. 66. URL: <https://doi.org/10.1080/09553009414551371> (Last accessed: 14.12.2023).
63. Комов І. Л., Фролов О. С., Діденко П. І. та ін. Основні проблеми радонової безпеки. Київ: Логос, 2005. 351 с.
64. Komov I., Frolov O., Didenko P. et al. Methods and facilities for the assessment of the radon-hazard potential. Kyiv: Logos, 2004. 416 p.
65. Grzywa-Celińska A., Krusiński A., Mazur J. et al. Radon-The Element of Risk: The Impact of Radon Exposure on Human Health. *Toxics*. 2020. Vol. 8, Issue 4. 20 p. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics8040120> (Last accessed: 14.12.2023).
66. Radon: Radon Research Program, FY 1992. – Washington: US Department of Energy – Oak Ridge Institute for Science and Education, 1993.
67. Орлюк М. І., Онищук І. І., Роменець А. О. та ін. Магнітні та радонові аномалії на території міста Києва: екологічний аспект. *Геофизический журнал*. 2021. № 1, Т. 43. С. 227-250. URL: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225551> (дата звернення: 14.12.2023).
68. Апостолов О. А. Вдосконалена методика лінеаментного аналізу для оцінки перспективності території на пошуки покладів вуглеводні: дис. на здобуття наук. ступеня канд. геол. наук : спец. 05.07.12 "Дистанційні аерокосмічні дослідження". Київ, 2021. 196 с. URL: <https://www.casre.kiev.ua/images/files/paper-apostolov.pdf> (дата звернення: 14.12.2023).
69. Макаров В. І. Лінеаменти (проблеми та напрямки досліджень за допомогою аерокосмічних засобів та методів). *Дослідження Землі з космосу*. 1984. №4. С. 109-115.

70. Словник із дистанційного зондування Землі / за ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. Київ: СМП АВЕРС, 2004. 170 с.

71. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. Відомості Верховної Ради України. 1992 р. 08 груд. (№ 49). Ст. 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

72. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Міністерство охорони здоров'я України. № 7 від 10.12.1998. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

73. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання: Закон України від 14.01.1998 № 15/98-ВР. Дата оновлення: 17.09.2023. Відомості Верховної Ради України (ВВР). 1998. (№ 22) Ст. 115. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

74. ДСТУ 8604:2015. Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги [Чинний від 2017-07-01]. Київ. ДП «УкрНДНЦ» України, 2017. 10 с.

75. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення [Чинний від 2019-03-01]. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». 2018.

76. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Чинний від 1999-12-01]. Міністерство охорони здоров'я України, Головний державний санітарний лікар України. 1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

77. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями [Чинний від 2018-02-14]. Міністерство соціальної політики України. 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

78. Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)" [Чинний від 1999-12-01]. Міністерство охорони здоров'я

України, Головний державний санітарний лікар України. 1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

79. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. Дата оновлення: 27.11.2023. Відомості Верховної Ради. 2013 (№ 34-35), Ст. 458. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17/conv#n53> (дата звернення: 14.12.2023).

80. Правила пожежної безпеки України: затв. наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417. Дата оновлення: 07.04.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text> (дата звернення: 14.12.2023).

81. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [Чинний від 01.06.2017]. Український науково-дослідний інститут цивільного захисту УкрНДЦЗ. 2016. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619?doc_type=2 (дата звернення: 14.12.2023).

82. ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека [Чинний від 01.09.2022]. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». 2021.