

## УДК 625.42:551.242

В. Ю. УЛЬЯНОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інженерна геологія і геотехніка», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 43, ел. пошта uluanovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408

## Застосування радонометрії для виявлення зон тектонічних розломів під час проходження тунелів метрополітену в м. Дніпро

**Мета.** У цій роботі передбачено огрунтувати вибір найбільш дієвого в межах мегаполісу методу геофізичних досліджень для точного картування розломних зон у вивержених породах під час будівництва 2-ої черги метрополітену в місті Дніпро. **Методика.** Розроблено детально практичні й організаційні заходи щодо застосування радонометрії для цілей сейсмотектоніки під час будівництва 2-ої черги міського метрополітену, що у випадку продовження гірничопрхідницьких робіт в умовах наявності розломних зон сприяє подальшій безпечній експлуатації об'єкта. **Результати.** На підставі аналізу й оцінювання проведених у різні роки профільних досліджень було обрано один з еманційних методів – радонометрію, запропоновано методику її застосування, яка забезпечує в умовах щільної міської забудови та складної тектоніки регіону (наявність розломних зон) отримання необхідних якісних характеристик ґрунтового розрізу. **Наукова новизна.** У роботі вперше обґрунтовано застосування радонометрії для виявлення розломних зон у вивержених породах та оцінювання їхньої активності в межах міста. **Практична значимість.** Указана методика рекомендована для створення сейсдобезпечних умов проведення буропідричних робіт під час проходження гірничих виробок, які забезпечать максимальну швидкість будівництва. У перспективі зазначені дослідження можуть бути корисні під час створення системи вентиляції підземних споруд 2-ої черги міського метрополітену. Також результати радонометрії можна враховувати під час розміщення елементів систем геотехнічного (деформаційного) моніторингу, причому як у тунелях та інших заглиблених спорудах метрополітену, так і в наземних будівлях і спорудах. Уточнення розташування розломних зон з оцінюванням їхньої активності може прямо вплинути на вибір тих чи інших способів вимірювання деформаційних параметрів досліджуваних об'єктів, сприятиме вибору засобів обробки тунелів за їхніми якісними чи кількісними параметрами.

**Ключові слова:** геологічна будова; метрополітен; гранітоїди; тунель; радон; тектонічний розлом; радонометрія; об'ємна активність (ОА); еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА)

### Вступ

Геологічна характеристика території міста Дніпро. Правобережна частина території міста є рівниною з пагорбами, прорізаною балками та ярами. Найбільшими є балки Аптекарьська, Червоноповстанська (Поліцейська), Рибальська, Тунельна та ін. Лівобережна територія міста є низькою алювіальною піщаною рівниною, яку перетинають численні стариці, штучні та природні озера й канали.

У геоструктурному плані територія Дніпропетровського регіону є частиною Українського кристалічного масиву (переважно це правий берег р. Дніпро), що переходить у Дніпровсько-Донецьку западину (лівий берег р. Дніпро).

У геологічній будові території міста беруть участь кристалічні породи докембрію, осадова

товща кайнозою (палеоген і неоген) та відклади четвертинної системи.

Породи докембрію представлені гранітоїдами дніпровського комплексу архей-протерозойської ери. Нерівна поверхня кристалічного масиву місцями перекрита корою вивітрювання, представленою щербенисто-деревною товщею потужністю до кількох метрів, і первинними каолінами. Потужність шару каолінів у зниженнях рельєфу кристалічних порід фундаменту може досягати 20 м і більше. Такі відклади в межах міста вивчені лише точково, переважно вздовж траси метрополітену або на ділянках максимального наближення покрівлі скельних ґрунтів до денної поверхні.

Відклади кайнозою представлені потужною товщею палеогенової та неогенової систем, які залягають на розмитій поверхні докембрійського фундаменту.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Породи бучацької світи палеогену, відносно поширені в північній частині території, трансгресивно залягають на палеозойських відкладах чи докембрійських породах і навіть на продуктах їхнього вивітрювання. Вони представлені дрібно- та середньозернистими пісками з прошарками глин, вторинних каолінів та бурого вугілля. Загальна потужність відкладів збільшується в північно-східному напрямку від 0 до 50 м. Породи київської світи трансгресивно перекривають відклади бучацької світи, вони представлені тонким блакитно-сірим мергелем, а також вуглистими глинами загальною потужністю від 30 до 40 м.

Відклади харківської світи палеогену поширені повсюдно на північ від р. Дніпро. Вони представлені однорідною товщею морських кварцово-глауконітових пісків сірувато-зеленого кольору, а також глинами та пісковиками. Глини харківського ярусу сірувато-зелені, щільні, слюдисті, подекуди тонкопіщані.

Міоцен (N1) представлений відкладами полтавської світи та середньосарматським під'ярусом. Полтавська світа (N1pl) представлена світло-сірими дрібнозернистими глинистими пісками, що залягають на піщано-глинистих відкладах палеогену. Потужність відкладів зазвичай становить 7...10 м, місцями збільшується до 15 м. Середньосарматський під'ярус (N1s2) поширений на описуваній території тільки локально. Представлений строкатими глинами з прошарками дрібнозернистих пісків. Потужність відкладів становить 6...8 м.

Пліоцен-нижньочетвертинні відклади представлені товщею червоно-бурих глин (N2 – Q1). На території міста вони значно поширені й відсутні лише в заплавах річок. Середня потужність відкладів становить 9...12 м.

Четвертинну систему в межах терас р. Дніпро представлено середнім та верхнім відділами. До середнього відділу належить нижня частина алювіальних пісків, що залягають на відкладах харківської світи, загальною потужністю до 11 м. До верхнього відділу віднесені алювіальні піски другої та першої надзаплавних терас р. Дніпро й суглинки другої надзаплавної тераси. Потужність алювіальних відкладів змінюється від 8 до 30 м. Також верхню частину розрізу верхньочетвертинних відкладів складають ле-

соподібні суглинки жовтувато-бурого кольору, макропористі, часто грудкової структури, що містять стягнення й нальоти карбонатів, у верхньому шарі гумусовані. Переважають легкі та середні різниці, що переходять у супісок. До сучасного відділу належать алювіальні перевідкладені піски та суглинки долин річок, ярів і балок.

Зауважимо, що осадові товщі достатньо вивчено під час бурових робіт, виконаних у ході інженерно-геологічних досліджень у межах міста, також під час гірничопрохідницьких робіт проведених із метою влаштування метрополітену в межах гірського відводу, вивчено кристалічні породи. У ході досліджень по трасі метрополітену було виділено та детально вивчено 24 інженерно-геологічних елементи (ІГЕ). Зокрема встановлено, що в будові кристалічного фундаменту беруть участь численні види магматичних та метаморфічних гірських порід архей-протерозойської ери, а саме: гнейси, амфіболіти, мігматити, плагіограніти, лейкократові й пегматитові граніти, діорити та грандіорити. У зонах дроблення тектонічних розломів було зафіксовано кварцові матеріали. Потужність зон окварцювання становила від 5 до 13 м. Відзначено причетність таких зон до контактів гранітоїдів, а також до зон контактів гранітоїдів із метаморфічними утвореннями.

Особливо слід відзначити, що єдиною (за своєю унікальністю) роботою з вивчення інженерно-геологічних умов території міста, що й досі не втратила свого значення, є «Інженерно-геологічний атлас м. Дніпропетровськ», створений групою вчених Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту (ДІБІ, нині Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (ПДАБА)) під керівництвом А. І. Кравченка (1976–1980 рр.). Зазначений документ є історичною пам'яткою, що охороняється державою й сьогодні перебуває в музеї ПДАБА. Особливо ретельно тоді вивчили гірські породи осадового комплексу, насамперед лесові.

Тектонічна будова території міста. Основною проблемою, яка існує в наш час в умовах добудовування метрополітену, є практично повна відсутність докладної тектонічної карти міста. Через «закритість» міста в період СРСР масштабні роботи в цьому напрямі не проводи-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ли, за винятком досліджень смуги вздовж траси метрополітену. Після 1991 р. цьому перешкоджала економічна ситуація в новій державі, а також процеси реорганізації наявних профільних наукових інститутів. Усі перелічені нижче дослідження з цієї проблеми мали або локальний, уривчастий, або узагальнений та опосередкований характер. Однак потреба створення такої карти сьогодні стоїть достатньо гостро, особливо після того, як було припущено й виявлено взаємозв'язок геологічних процесів, що відбуваються у верхній частині розрізу, з глибинними процесами в кристалічному фундаменті [9].

Для виправлення ситуації, що склалася, рекомендовано достатньо цікавий, однак непрямий метод виявлення тектонічних особливостей території міста, запропонований фахівцями ДП «Дніпрокосмос» спільно з Інститутом проблем природокористування та екології НАН України. Докладне вивчення рельєфу та особливостей геоморфологічної будови, за результатами аналізу космічних знімків, дозволило припустити наявність тектонічних порушень, що визначають макро- та мікрорельєф більшої частини території міста. Було припущено зв'язок елементів тектоніки архей-протерозойської кристалічної основи з орієнтацією та рисунком яружно-балкової мережі. Як робочі матеріали були використані космічні знімки з роздільною здатністю 1 м (КА Ikonos, США) та 5 м (КА IRS, Індія), а також відповідне програмне забезпечення. На основі аналізу знімків із роздільною здатністю 5 м складено лінеamentну схему правобережної частини міста (рис. 1). Аналіз розташування лінійних елементів на знімках дозволяє дійти невтішного висновку про переважаюння напрямів тектонічних зон, які, імовірно, збігаються з виявленими лінеаментами [10]. Усього, за припущенням, існує 6 основних розломних зон із розташуванням: 0–270°, 17–287°, 35–305°, 45–315°, 62–332°, 77–347°.

Фахівці ДП «Південукргеологія» свого часу запропонували власну тектонічну схему. На цій схемі територію правобережної частини міста перетинає ряд регіональних розломів різного рангу, один із яких навіть має власну назву – Каховсько-Новомосковський. Інші розломи в межах міста не названі.

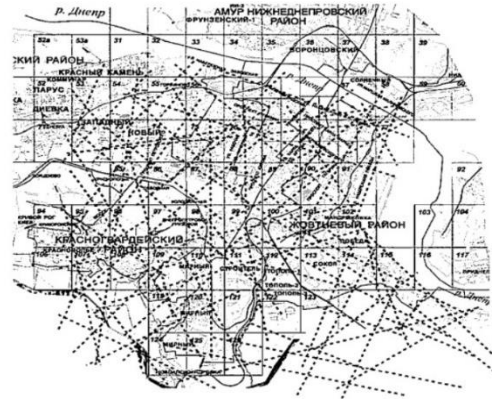


Рис. 1. Схема осевих ліній імовірних тектонічних порушень у межах правобережної частини міста за даними аналізу космічних знімків (за Волошиним та ін., 2005)

Fig. 1. Diagram of the axial lines of the assumed tectonic disturbances of the right-bank part of the city according to the analysis of satellite images (according to Voloshin et al., 2005).

Згідно з сучасними даними та базою даних активних розломів Євразії, що належить Лабораторії неотектоніки та сучасної геодинаміки РАН, центральний район міста перебуває в межах чітко вираженої неоген-четвертинної розломної зони (див. карту на рис. 2). Як видно на зазначеній карті, передбачувана розломна зона перетинає трасу метрополітену, який будують, у районі перехрестя проспекту Яворницького (колишній К. Маркса) та вул. Воскресенської (колишня Леніна).

Укладачі бази даних характеризують активність розломних зон за низкою параметрів, щодо міста заслуговують на увагу такі:

RATE – ранг швидкості молодих тектонічних рухів у межах структури;

CONF – ранг достовірності оцінювання порушення як активної структури.

*Ранг швидкості руху RATE.* Оскільки наявність пізньочетвертинних рухів обумовлює введення самої структури до сформованої бази даних, ранг RATE є обов'язковим. Його значення формують не лише на підставі конкретних даних про швидкість переміщення по розломах, а й ураховують усі ознаки, що відображають інтенсивність деформацій. Значення рангу RATE характеризує швидкість переміщення крил активних структур, що розділена на три категорії: <1 мм/р., 1...5 мм/р. та

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

>5 мм/р., котрі у виносці на карті позначені індексами 3, 2 та 1 відповідно. Таким чином, ранг RATE відображає як швидкість взаємного переміщення крил розлому, так і ступінь концентрації деформацій у межах об'єкта як елемента зони порушень.

*Критерії оцінки CONF.* За ступенем достовірності ознак активності об'єкти бази даних поділені на чотири категорії:

– *категорія А* – у матеріалах джерела наявні точні польові дані про зсуви та деформації пізньоплейстоцен-голоценових відкладів, форм рельєфу та антропогенних утворень;

– *категорія В* – характер і ступінь виразності об'єкта на детальних моделях рельєфу, космічних зображеннях та аерофотознімках;

– *категорії С і D* є непрямими, однак їх ураховують, особливо в оцінці передбачуваної активності об'єктів. Об'єкти вводять до категорії С, коли наявні перелічені вище ознаки активності або хоча б одна з них, але всі вони виражені нечітко, виявлені не цілком переконливо, визначені неточно або можуть мати різну інтерпретацію, тоді як пліоцен-четвертинні зміщення по розлому безсумнівні.

Таким чином, розломна зона, що, імовірно, перетинає трасу метрополітену, яку будують у районі перехрестя проспекту Яворницького та вулиці Воскресенської (ПК 145–146), за рангом CONF віднесена до категорії С. А за атрибутом RATE – до категорії 2, тобто з переміщенням крил розломної зони зі швидкістю 1...5 мм/р. Також слід зазначити, що розтягування розломної зони на рис. 2 цілком узгоджується з простяганням окремих фрагментів тектонічних порушень, наведених на рис. 1, і, що цілком можливо, має лінеаментний характер.

Найбільш ґрунтовний матеріал для аналізу тектонічної будови було отримано в ході досліджень під будівництво метрополітену. За даними бурових і гірничопрохідницьких робіт, поверхня фундаменту складається із субгоризонтальних майданчиків-блоків невеликої площі, що розрізняються за висотою на 20–30 м. Ступінчастий профіль поверхні фундаменту майже повторює профіль сучасного рельєфу.

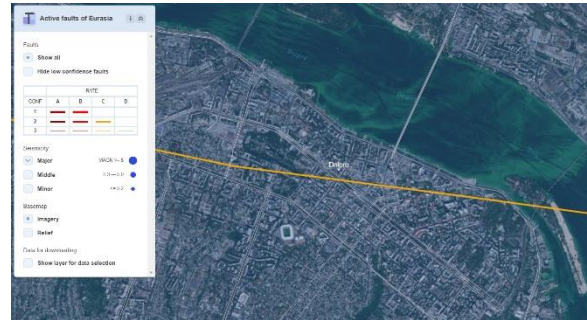


Рис. 2. Активна неоген-четвертинна розломна зона в центральній частині міста (за даними Лабораторії неотектоніки та сучасної геодинаміки РАН)

Fig. 2. Active Neogene-Quaternary fault zone in the central part of the city (according to the Laboratory of Neotectonics and Contemporary Geodynamics of the Russian Academy of Sciences)

Блоки відокремлені один від одного достатньо молодими тектонічними швами, представленими зонами дроблення, мілонітизації, каолінізації. Гірські породи на таких ділянках тріщинуваті й часто обводнені. Потужність тектонічних порушень становить від одного до декількох десятків метрів, падіння схилів у переважній більшості випадків достатньо круте (70...90°). Зони каолінізації були закладені, імовірно, в мезозої, але частина їх, мабуть, була успадкована від докембрійських структур, оскільки на деяких ділянках (свердл. 417, 426–428, 445, 446, 454–456) відзначені зони окварцювання. Наймолодшими вважають зони дроблення кристалічних порід з інтенсивною тріщинуватістю (свердл. 469, 473, 479, 478). Зони окварцювання найяскравіше виражені у свердловинах 432, 453, 460, 471.

Відповідно до схем на рис. 1, 2 трасу метрополітену, який будують, у центральній частині міста перетинають кілька розломів різного рангу, зокрема й регіональний Каховсько-Новомосковський розлом. Саме його, імовірно, було розкрито під час буріння на ділянці між зупинками «Вокзальна» та «Театральна» (колишня «Парк Чкалова»). Передбачувані розломні зони розташовані на ділянках між свердловинами 446–456, 467–473 та 477–479. Передбачувана зона тектонічного порушення розташована між свердл. 458 і 462. Але точне місце розташування розломних зон, як і взагалі їхня

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

наявність, буде встановлена тільки за умови проходження всіх тунелів 2-ої черги метрополітену, який будують. Окрім картування точного розташування розломних зон по трасі 2-ої лінії метрополітену, не меншу значимість має визначення їхньої активності, причому встановленої не опосередковано, а достовірними прямими методами.

### Мета

Основною метою роботи є обґрунтувати застосування радонометрії для точного картування розломних зон у вивержених породах Українського кристалічного масиву (УКМ), що сприяє створенню сейсдобезпечних умов проведення буропідричних робіт під час проходження гірничих виробок та підвищенню швидкості будівництва 2-ої черги метрополітену в місті Дніпро, а також оцінити методами радонометрії ступінь активності виявлених зон тектонічних розломів, щоб звести до мінімуму вплив вибухових робіт на фундаменти історичних будівель по трасі метрополітену в центральній частині міста. При цьому необхідно уточнити екологічні параметри території над виявленими розломними зонами, урахувавши щільну житлову та громадську забудову цієї частини міста.

### Методика

Як уже вказано вище, усі перелічені методи досліджень є непрямими й не дають точного уявлення про напружений стан масиву гірських порід. Відзначимо, що вони взагалі мало пристосовані для практичних цілей, особливо не придатні у випадку проходження гірничих виробок під час будівництва метрополітену, зокрема в центральній частині міста. Для геотехнічного контролю потрібні відносно точні та вичерпні дані, без яких у разі ускладнених ґрунтових умов проведення будівельних робіт створює значні труднощі [21, 25].

Однак, якщо в умовах міської забудови, де через численні перешкоди застосування традиційних геофізичних методів ускладнене й досить затратне, то, можливо, має сенс застосувати інші, у т. ч. й еманційні методи досліджень, зокрема радонометрію [20, 23].

Радон як фактор зміни напруженого стану масиву гірських порід. У складі потоку газів, що вільно розвантажуються в атмосферу Землі в зонах тектонічних розломів земної кори, поряд із метаном, вуглекислим газом, воднем і гелієм, є також інертний газ – радон ( $^{222}\text{Rn}$ ). Його фізичні та радіометричні властивості – інертність, малий період напіврозпаду (3,82 діб), наявність дочірніх продуктів розпаду – послужили основою для вивчення та використання його як одного з індикаторів під час встановлення ступеня активності таких зон. Постійне спостереження за зонами розломів особливо важливе, оскільки в них часто спостерігаються деформації земної поверхні, що призводять до порушень цілісності будівель, споруд, доріг, трубопроводів, зокрема й особливо важливих об'єктів, таких як міський метрополітен [12].

Формування аномалій радіоактивного газу радону в покривних відкладах над зонами розломів свого часу послужило теоретичною основою застосування еманційної (радонової) зйомки для картування розривних порушень на закритих площинах. У 70-і роки минулого століття був встановлений прямий зв'язок між інтенсивністю радонових аномалій та геодинамічними процесами в зонах розломів. Це стало основою нового напрямку досліджень у геології – так званого структурно-геодинамічного картування. Із вищесказаного випливає, що особливості поведінки  $^{222}\text{Rn}$  в геологічному просторі створюють умови для безперервного моніторингу за ним як за індикатором напруженого стану літосфери. Це, зокрема, підтверджено й аномально високими концентраціями  $^{222}\text{Rn}$  в періоди, що передують землетрусам.

Радіаційні вимірювання (у т. ч. й радонові) на поверхневих та підземних об'єктах під час будівництва й експлуатації метрополітенів проводяться, однак, не часто, причому здебільшого виключно з екологічною метою [2]. У зв'язку з цим заслуговує на особливу увагу досвід вимірювання радону в метрополітені м. Ташкент, траси якого рясніють аномальними тектонічними зонами у вигляді розломів, руйнувань, тріщин тощо [7]. Вибір споруд метрополітену для подібних досліджень пояснюється тим, що дозволяє досить коректно виявити зв'язок між атмосферним радоном у тектонічних аномаліях,

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

грунтовим радоном та радоном у воді. У ході виконаних у метрополітені м. Ташкент досліджень зокрема було встановлено залежність об'ємної активності радону в повітрі від геофізичних та геотектонічних характеристик ділянок розташування станцій. А також було показано, що може відбуватися істотне підживлення радоном порожнин зон тектонічних розломів та розривних порушень унаслідок конвекційно-дифузійних процесів [1]. Тектонічні аномалії земної кори, відіграючи роль своєрідних колекторів радону, можуть істотно впливати на формування та варіації радонових полів в атмосфері підземних споруд, підвальних приміщень та перших поверхів житлових і громадських будівель. Однак на тлі досліджень у сейсмічно активних регіонах, до яких, зокрема, відносять і територію Узбекистану, аномальну поведінку радону в зонах тектонічних розломів та в інших порушеннях земної кори в умовах відносної сейсмостабільності та відсутності поштовхів дослідники практично не розглядали. Закономірності таких процесів не вивчені, їх вважають неактуальними. Відомо, що, окрім досліджень, проведених у метрополітені Ташкента, радонову зйомку проводили й на об'єктах метрополітену в Санкт-Петербурзі, проте найчастіше в комплексі з іншими геофізичними роботами, зокрема спектрально-сейсмічним профілюванням (ССП).

Слід зазначити, що відомості про вимірювання радону в спорудах першої черги міського метрополітену Дніпра, на відміну, наприклад, від Києва, відсутні [22]. Відомо, що під час спорудження 2-ої черги міського метрополітену вимірювання радону також не проводять і навіть не розглядають питання про проведення таких досліджень. Вимірювання радону з екологічною метою в місті якщо і проводили, то тільки в житлових будинках і дуже обмежено, а карт радононебезпеки (на відміну від м. Кропивницького – колишнього Кіровограда, Жовтих Вод та Кам'янського – колишнього Дніпродзержинська) просто немає або вони обмежені та недосконалі. На наявних картах розташування розломних зон зазначено лише приблизно, чого зовсім недостатньо як для виконання гірничопрхідницьких робіт, так і інших робіт будівельного циклу, у тому числі

тих, які проводять із боку денної поверхні, зокрема сторонні організації з розвитку міста.

Але навіть вибіркові виміри радону показали достатньо високі значення (порівняно з вимірами по місту) в районі перетинання трасою метрополітену колишньої вул. Дзержинського (нині вул. Вернадського), якраз на стику нагірного та центральної частини міста. У цій же ділянці наявні й вузли перетинання різнорангових розломних зон.

Порядок проведення робіт. Приблизний план проведення досліджень у центральній частині міста наведено нижче. За потреби, його можна видозмінити або доповнити. Слід зазначити, що виконання робіт за цим планом можливе і після завершення будівництва 2-ої черги метрополітену.

Зауважимо, що до проведення польових та лабораторних робіт допускають лише сертифіковані організації, що мають у своєму розпорядженні відповідне обладнання та висококваліфікований персонал і за умови проходження метрологічної перевірки. Як відомо, перелік необхідного обладнання, так само як і стандартних методик проведення вимірювань у конкретних точках, досить широкий, і в цій роботі ми його не розглядаємо.

Для точного картування зон тектонічних розломів пропонуємо комплекс радонометричних досліджень, що містить, як основну складову вимірювання ґрунтового радону в шпурах по трасі будівництва метрополітену, і як додаткову – вимірювання еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) радону, яке можна здійснювати у вибраних будинках (на проспекті Яворницького, орієнтовно від залізничного вокзалу до монумента Слави). Першочерговою ділянкою робіт може бути відстань між вул. Ю. Словацького (колишня Серова) та вул. Мономаха (колишня Московська). Наступними за значимістю є такі ділянки: від вул. Барикадна до вул. С. Єфремова, від вул. Кн. Ольги (колишня Горького) до вул. Столярова.

Розташовати профіль вимірювання об'ємної активності (ОА) ґрунтового радону потрібно вздовж алеї центрального проспекту міста паралельно до лінії міського трамвая № 1, орієнтовно між осями тунелів метрополітену, який споруджують. Крок вимірювання – 100 м. Точ-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ки вимірювання повинні збігатися з пікетами, наміченими під час проведення інженерних вишукувань. За наявності за профілем протяжних заасфальтованих ділянок допускають зміщення точок до найближчих ділянок зелених насаджень (газонів), де можливе проходження шпурів. Допускають згущення точок вимірювання ОА ґрунтового радону на ділянках імовірних тектонічно активних розломних зон до кроку 50 м. Розміщення точок буріння шпурів для реєстрації ґрунтового радону потрібно узгоджувати з відповідними міськими службами на предмет відсутності комунікацій. Для уточнення зон виявлених аномалій радону за додатковим обґрунтуванням можливе проведення вимірювань щільності потоку радону за обраними профілями на основі спеціально розробленої програми робіт.

Також додатково, за необхідності, проводять і одноразове вимірювання радону в повітрі тунелів метрополітену, який будують, звичайно, за вимкненої вентиляції, а в тунелях працюючої лінії метрополітену – за додаткового обґрунтування та за окремою програмою. Під час виконання робіт проводять і температурні вимірювання.

Паралельно проводять одноразовий відбір шахтних вод на вміст радону в тунелях метрополітену, який будують. Місця відбору проб води повинні збігатися з місцями вимірів радону в повітрі тунелів. У тунелях працюючого метрополітену – лише за додаткового обґрунтування. У разі неможливості з будь-яких причин здійснити відбір проб води безпосередньо в тунелях метрополітену допускають відбір із режимних або технологічних свердловин по трасі, якщо такі наявні й перебуватимуть у робочому стані. Потрібно також забезпечити доступ до заглиблених об'єктів метрополітену, який будують, із метою відбору проб і проведення вимірювань. Під час виконання робіт вимірюють і температуру води.

Роботам із вимірювання ЕРОА радону в будівлях має передувати інженерно-технічне обстеження обраних будівель із метою вибору місць установа реєстру вальної апаратури й забезпечення її охорони на період проведення досліджень. Перелік будівель, що підлягають обстеженню, повинен бути визначений на основі геологічних і тектонічних умов району та

ділянок робіт, а також за графіком робіт будівельного циклу зі спорудження об'єктів метрополітену.

Перед вимірюванням ЕРОА радону в будівлях обов'язково проводять первинне замірювання ОА ґрунтового радону за профілем лінії метрополітену, який будують. Роботи бажано виконувати лише в теплий період року.

Моніторинг радону обраним способом проводять у будинках «червоної лінії» по обидва боки від проспекту, бажано одночасно. Освітні, медичні та дитячі установи другої лінії в обов'язковому порядку також повинні бути внесені до переліку обстежуваних будівель. Обстеження інших будівель другої лінії на цьому етапі робіт проводять за додатковим обґрунтуванням. Первинний моніторинг радону проводять у всіх доступних будинках у нижніх житлових поверхах та заселених підвалах. Надалі – лише у вибраних будинках (з ЕРОА радону вищою за нормативні значення) за спеціальною програмою, яка передбачає інтегральні вимірювання за допомогою пасивних трекових радонотрів, вимірювання потужності експозиційної дози, миттєві експрес-виміри радону, гаммаспектрометричний аналіз ґрунту на вміст радіонуклідів та ін.

Замірювання ЕРОА радону в будівлях потрібно проводити упродовж усього періоду будівництва метрополітену (особливо ретельно проведення вибухових робіт під час проходження тунелів, що вимагає ув'язування з графіком робіт на об'єктах) із періодичністю 2 рази на рік (на ділянках проходження тунелів під час проведення вибухових робіт – 1 раз на квартал). У період експлуатації новозбудованої лінії – за результатами проведення намічених робіт і додаткового обґрунтування.

Для полегшення доступу до приватних будинків і міських установ та офісів (крім закритих банківських та інших установ), розташованих на ділянці робіт, відповідні міські служби оформляють дозвіл, який не може бути оскаржений власниками в судовому чи іншому (адміністративному) порядку.

Дані вимірювань ув'язують із результатами бурових і гірничо-прохідницьких робіт у тунелях метрополітену, який будують, і подають у вигляді карти активності радону, на якій мають бути відзначені всі радонові аномалії, за-



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

безпечена їх прив'язка до виявлених або припустимих розломних зон із зазначенням ступеня активності розломів, інтенсивності радоно-виділення з надр. Виявлені флюїдопровідні канали можуть бути відображені у вигляді радіально-азимутальних еманацийних (радонових) проєкцій. Також на карті повинні бути відзначені ділянки денної поверхні по трасі будованого метрополітену, із зазначенням величин осідань (у мм) міських будель і споруд та з відображенням їхньої динаміки за період проведення будівельних робіт. Так само складають карту температурних аномалій повітряного середовища в тунелях (за вимкненої вентиляції) та підземних вод у прямках тунелів і геотехнічних свердловин.

Таким чином, у цілому ідея використання радонометрії для точного картування зон тектонічних порушень по трасі метрополітену, який будують, не нова, а її базові наукові положення досить добре опрацьовані й випробувані на практиці, причому в різних регіонах і різних геологічних умовах [5, 6, 15, 23, 24].

### Результати

Проведений комплексний аналіз наявних фондових та архівних маріалів підтвердив існування ознак неотектонічної активності на території міста. Як відзначав у своїх численних статтях геолог А. А. Кримцов, який одним із перших звернув увагу на проблеми неотектоніки, у місті існують будівлі та споруди, деформації яких не можна пояснити тільки зі звичайних позицій (осіданням лесових ґрунтів, суфозією, зсувами і т. под.) [16–19]. Усі такі споруди з деформаціями добре вписані в систему молодих порушень, визначених на підставі мікроморфоструктурного аналізу, який переважно базується на реконструкції природного рельєфу міста. До реконструйованих форм та елементів рельєфу належать: уступи, яри, улоговини, фрагменти русел. Багато з виділених таким чином неотектонічних структур типу зон дроблення, зсуву, лінійних кір вивітрювання підтверджені даними інженерно-геологічних досліджень й отримані під час проходження тунелів метрополітену.

За сучасними даними, у місті, починаючи з 1983 р., фіксують тектонічну активність. Осо-

бливо це стосується дрібноблокових структур кристалічного фундаменту. Неглибоке залягання скельних порід та широкий фактичний матеріал інженерно-геологічних досліджень, у т. ч. й по трасі метрополітену, надає унікальну можливість визначити особливості, а іноді й ступінь впливу блокових посувань на рельєф. У наш час на території міста виділено 77 неотектонічних блоків, межами між якими є зони з активними проявами в т. ч. і процесів зсувоутворення, а також деформацій будівель і споруд [11].

За А. А. Кримцовим, найновішу активність розломно-блокових структур у межах міста встановлюють за низкою ознак, а саме: різницею у висотах поверхонь скельного фундаменту сусідніх блоків, а також відображенням у породах верхнього структурного поверху (осадового). У сучасному рельєфі зони розломів виражені таким чином:

- у вигляді прямолінійних уступів терас, зокрема й пізньочетвертинних, із простяганням 290...300°;

- у вигляді великих ерозійних форм (балок, улоговин) із простяганням на 40...50°, рідше 80...90° й 0...10°.

У породах осадового чохла до порушень належать різкі зміни генетичних типів, потужностей і фацій четвертинних відкладів.

За матеріалами інженерних досліджень по трасі метрополітену, до зон найновішої активізації тектонічних процесів належать ті, які розмежовують блоки, що помітно відрізняються за висотою поверхні фундаменту (більше ніж на 20 м). Такі уступи розкриті свердловинами 413, 469–471, 478–479. Це Мандриківський, Нагірний і Центральноміський неотектонічні блоки розмірами від 2,5 до 10 км. Великі блоки розділені порушеннями більш низьких порядків на дрібні блоки з розмірами перших сотень метрів. Неотектонічна активність дрібних блоків може бути наслідком перерозподілу напружень як у зонах контактів мегаблоків, так і всередині окремих блоків. Градієнти сучасних підняття у межах міста складають до кількох міліметрів на рік. Це чітко підтверджує і висотне розташування в розрізі морських сарматських відкладів.

Установлення характеру та ступеня впливу дрібноблокових неотектонічних рухів на формування рельєфу й поширення осадових відк-



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ладів різноманітного віку дозволяє більш повно оцінювати інженерно-геологічні умови території міста, а також типізувати їх на морфотектонічній основі. Виконані дослідження дозволили зробити практичні висновки, а саме:

- оскільки деякі розломні зони чітко виражені в рельєфі завдяки своїй найновішій активності, то цілком можливі й сучасні посування блоків із повним набором факторів впливу на міцність підземних і наземних споруд;

- наявність активних розломів у рельєфі міста дозволяє виділяти їх геоморфологічними методами, якщо в умовах міської території через численні перешкоди неможливе вживання більшості геофізичних методів.

На жаль, завершити свої дослідження з низки причин А. А. Кримцову так і не вдалося, послідовників у нього також не виявилось, тому про проведення подібних досліджень після 1991 р. відомості не знайдено.

Після завершення будівництва 1-ої лінії метрополітену, відзначеної, до речі, низкою аварій, найбільш вивченим районом міста, починаючи з 1997 р., стає ж/м Тополя–1. Не вдаючись у подробиці геологічних подій, які сталися на цьому масиві достатньо широко й докладно висвітлених у численних наукових роботах, звернемо увагу на їх передбачувану неотектонічну складову. Із цієї точки зору низка дослідників відзначила:

- чіткі прояви диференційованих сучасних тектонічних рухів земної кори за досліджуванний період із 1960 р. по теперішній час;

- сучасну активність блокових будов осадкового чохла в просторі та часі, тісно пов'язану з характером коливально-інверсійних розломно-блокових рухів докембрійського кристалічного фундаменту;

- істотну просторово-часову та інверсійну активність розломів, яка вплинула на «оформлювання» морфоструктур осадкового чохла та віддеркалоє динаміку геоблоків кристалічного фундаменту на етапі сучасного рельєфоутворення, формування яружно-балкової сітки й деструкції плато;

- переважання вертикальних тектонічних рухів блокових будов фундаменту й осадкового чохла, які, безсумнівно, корелюються з активними зсувними процесами в балках Зустрічна, Тунельна, Єпаторійська та ін. [4, 28, 29].

Таким чином, подібні процеси, здається, притаманні й останній частині міської території на правобережжі. На погляд автора цього дослідження, найбільш активно деформаційні процеси можуть спостерігатися у вузлах перетинання неотектонічних розломів, котрі мають місце і по трасі будованого метрополітену. Дослідження стійкості тунелій метрополітену в зонах розломів за різних кутів нахилу їхніх площин відомі, однак здебільшого вони стосуються пухких ґрунтів [13, 34]. Безсумнівно, що спостереження в тунелях будованого міського метрополітену за замірами тріщинуватості скельних порід в міру заглиблення гірничих виробок поповнять базу даних щодо їхньої азимутальної орієнтації. Однак слід ураховувати, що через застосування виключно вибухових робіт під час проходження тунелів частина цієї інформації може виявитися непоказною.

Зокрема, за результатами картування розломних зон еманційним (радоновим) методом (на прикладі вимірювань у кристалічних породах деяких регіонів, у т. ч. й Тіманського краю), були зроблені досить цікаві висновки, а саме:

- розломні зони чітко відображаються в полі радону підвищеними значеннями його об'ємної активності (ОА);

- максимальні значення активності радону відповідають тектонічним порушенням, які найближче підходять до денної поверхні;

- уздовж лінії розлому значення ОА можуть змінюватися, а також вони змінюються в різний час у межах однієї ділянки розлому;

- ширина зони підвищених значень активності радону завжди більша за саму зону розлому [26].

Як можна уявити, аналогічні або подібні особливості вимірювань, імовірно будуть наявні й під час робіт на території міста.

Крім того, було встановлено, що саме до розломних зон у Північномууйському залізничному тунелі БАМу, що в Забайкаллі, належать усі виявлені наднормативні аномалії вмісту радону в повітрі гірничих виробок, а також надвисокі концентрації радону в субтермальних підземних водах [8]. З усього вищевикладеного випливає, що, крім тектонічної складової, траса метрополітену як об'єкт підвищеної екологіч-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ної небезпеки, відповідно до вимог нормативних документів, повинна бути обов'язково всебічно досліджена і з цього боку [3]. Тому великої уваги вимагає питання про виділення радону з численних зон тектонічних порушень по трасі метрополітену вже в ході експлуатації його 1-ої черги як наслідок впливу вібрації під час руху поїздів.

Більш широке застосування зазначеного методу для практичних цілей геодинаміки та сейсмотектоніки досі стримується недосконалістю вітчизняної нормативної бази, яка потребує серйозного оновлення. Зокрема, свого часу спеціалісти КП «Кіровгеологія» спільно з НТК «Інститут монокристалів» НАН України вказали на доцільність розробки «Методики виділення небезпечних за радоном територій та окремих населених пунктів». Ця методика включає містить такі положення:

- визначення експозиції радону з надр за даними аерогаммаспектрометрії з наземним вимірюванням виявлених аномалій;

- контрольне визначення забруднення повітря будівель радоном та його дослідно-помислової розробки (ДПР);

- аспіраційний метод досліджень із використанням інтегральних та твердотільних детекторів;

- використання геологічної, геофізичної, гідрогеологічної, геоморфологічної та іншої інформації для прогнозування потенційно радононебезпечних зон [14].

Проте роботу над цим нормативним документом, із низки причин, так і не було завершено. Крім цього, україно необхідний нормативний документ із радонометрії для потреб геодинаміки, відсутність якого стримує проведення подібних робіт на майданчиках розміщення особливо важливих об'єктів, до яких, зокрема належать і АЕС.

Маловивченим залишається питання впливу «роїв» землетрусів малої та середньої інтенсивності (максимум 4 бали за шкалою МСК–64 для умов міста) на позаобробний простір у вже збудованих тунелях, розташованих у межах наявних та можливих тектонічних порушень, а також характер прояву геодформаційних процесів у вигляді зсувів за межами гірських блоків активних розломів, якщо такі будуть виявлені в ході припущених досліджень.

Оцінювання активності розломних зон можливе також і за допомогою термометрії, проте це питання, за всієї його актуальності, відносно мало розроблене, незважаючи на те, що термометрію застосовують, хоча й обмежено, під час геотехнічного моніторингу вже збудованих тунелів [24, 30].

Отже, проблематика вимірювання радону в залізничних тунелях, зокрема і в тунелях метрополітену, і досі вкрай актуальна та відображена в численних публікаціях [31, 32, 34, 35].

### Наукова новизна та практична значимість

У цій роботі вперше обґрунтовано застосування радонометрії для виявлення розломних зон у вивержених породах Українського кристалічного щита в межах міста Дніпро для створення сейсмобезпечних умов проведення буропідричних робіт під час проходження гірничих виробок, а також для оцінювання активності виявлених тектонічних зон, що створюють загрозу проведенню вибухових робіт, із метою зменшення шкідливого впливу на фундаменти історичних будівель.

У перспективі зазначені дослідження можна проводити під час створення системи вентиляції підземних споруд 2-ої черги міського метрополітену.

Також результати радонометрії можна враховувати у випадку розміщення елементів систем геотехнічного (деформаційного) моніторингу, причому як у тунелях та інших заглиблених спорудах метрополітену, так і в наземних будівлях та спорудах. Зауважимо, що уточнення розташування розломних зон з оцінюванням їхньої активності прямо впливає на вибір тих чи інших способів вимірювання деформаційних параметрів досліджуваних об'єктів, крім того, є підставою вибору засобів обробки тунелів, які визначають їхні якісні чи кількісні параметри.

Як було вказано, більш широке застосування цього методу для практичних цілей геодинаміки та сейсмотектоніки неможливе через недосконалість вітчизняної нормативної бази, яка потребує негайного оновлення.

### Висновки

Проаналізовано доступні фондові та архівні матеріали про геологічну будову, інженерно-геологічні умови та тектоніку міста Дніпро, а також матеріали проведених різними науковими та виробничими колективами досліджень по трасі метрополітену 1-ої черги. Належним чином проаналізовано матеріали аналогічних досліджень, проведених під час будівництва метрополітенів в інших країнах.

Незважаючи на те, що на сьогодні повна тектонічна карта міста Дніпро відсутня, за сучасними даними, у місті, починаючи з 1983 р., фіксується тектонічна активність. Особливо це стосується дрібноблокових структур кристалічного фундаменту. Ураховуючи неглибоке залягання скельних порід, у тому числі й по трасі метрополітену, визначено особливості впливу блокових рухів на рельєф, їхній ступінь.

На території міста виділено 77 неотектонічних блоків, межі між якими є зонами активності, у яких проявляються, зокрема, і процеси зсуву, а також деформації будівель і споруд.

Геоморфологічний метод виявлення розломних зон разом із дешифруванням аерофотознімків і знімків із космічних апаратів як непрямий метод не дає точного уявлення про напружений стан масиву гірських порід. Ураховуючи, що такі методи малозастосовні для практичних цілей, особливо в частині проходження гірничих виробок під час будівництва метрополітену в місцях щільної забудови, а стан розломних зон в усіх джерелах зазначено лише приблизно, цього цілком замало для проведення робіт будівельного циклу.

Оскільки застосування традиційних геофізичних методів у місцях щільної забудови

також є ускладненим і затратним, пропонуємо застосовувати еманційні методи досліджень, зокрема радонометрію.

Для вирішення проблем, пов'язаних із тектонікою центральної частини міста, важливою є належна розробка методичних та організаційних питань застосування радонометрії, що сприятиме правильному проведенню гірничих робіт в умовах щільної міської історичної забудови. Це можна враховувати й під час проектування майбутніх ліній метрополітену.

Розроблені заходи із застосуванням радонометрії передбачають обробку даних вимірювань, що представлені у вигляді карти радонової активності із зазначенням усіх радонових аномалій та їх прив'язкою до виявлених або припущених розломних зон. Карта відображає виявлені флюїдопровідні канали в межах смуги досліджень у вигляді радіально-азимутальних еманційних (радонових) проєкцій, а також температурні аномалії, ділянки денної поверхні по трасі метрополітену, який будують, із зазначенням величин осідань (у мм) міських будівель і споруд та їх динаміку за період проведення будівельних робіт.

Потребує вивчення проблема впливу землетрусів малої та середньої інтенсивності на позаобробний простір у вже збудованих тунелях, розташованих у зонах наявних та можливих тектонічних порушень, характер прояву геодформаційних процесів за межами гірських блоків активних розломів, а також питання екологічного контролю за виділеннями радону із зон тектонічних порушень в ході експлуатації 2-ої черги метрополітену внаслідок вібрації від руху потягів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акимов В. А., Яфасов А. Я. Тектонический фактор в формировании радоновых полей в атмосфере Ташкентского метрополитена. *Атомная энергия*. 2001. Т. 90, Вып. 2. С. 115–121.
2. Акимов В. А. *Исследование динамик радонового газа на территории Ташкентского метрополитена* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Институт ядерной физики. Ташкент, 2001. 25 с.
3. Алексеев В. Б., Смирнов В. В. Исследование процессов накопления радона в подземных помещениях метрополитена. *АНРИ*. 1996/97. № 3 (9). С. 85–88.
4. Антонов Ю. Р., Левенко А. С. Опасные геологические процессы в Днепропетровске. *Экополис : Экологический журнал Днепропетровского городского Совета*. 2002–2003. № 1. С. 33–37.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

5. Бугаев Е. Г., Спивак А. А., Соловьев С. П. Перспективы использования геофизических полей при выборе площадки и обосновании стабильности геодинамических и сейсмологических условий при эксплуатации АС. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2013. № 4 (70). С. 10–17.
6. Божежа Д. Н., Прилуков В. В., Пидлисна И. С., Петрановская М. А. Применение мобильных геофизических методов для обследования инженерно-геологических условий. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. 2014. Вип. 11. С. 154–162.
7. Булат А. Ф., Слащев И. Н. Использование продуктов распада радона как информативных параметров для оценки геомеханического состояния горных пород. *Геотехническая механика*. 2017. № 132. С. 3–16.
8. Булнаев С. А., Тарасов С. А., Тарасов И. А., Мироманов И. А., Мироманов М. А. Радон в Северо-Муйском железнодорожном тоннеле. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАН*. 2007. Т. 31, № 5. С. 101–111.
9. Вольман Ю. К., Новик Н. Н., Останин А. М. Тектонические предпосылки катастрофического развития природных и техноприродных геосистем. *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2005. Т. 1, Вып. 1. С. 47–55.
10. Волошин В. И., Шапарь А. Г., Переметчик Н. Н. Исследование опасных экзогенных процессов на территории города Днепропетровска с использованием спутниковых снимков. *Космічна наука і технологія*. 2005. Т. 11, № 5-6. С. 51–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2005.05.051>
11. Волошин В. И., Переметчик Н. Н., Шапарь А. Г. Прогнозирование проявлений опасных геологических процессов в городе Днепропетровске с использованием методов аэрокосмического дистанционного зондирования Земли. *Космічна наука і технологія*. 2004. Т. 10, № 5-6. С. 194–196. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2004.05.194>
12. Гендлер С. Г., Яковенко А. А. Оценка радиационной обстановки в подземных сооружениях Санкт-Петербургского метрополитена. *Записки Горного института*. 2013. Т. 206. С. 146–149.
13. Гусев В. Н., Лонжид Э. Б. Прогноз зоны влияния от проходки тоннеля существующих наклонных контактов горных пород. *Естественные и технические науки*. Москва. 2018. № 5 (119). С. 90–94.
14. Евдокимов Д. М., Солодовникова Л. Н. Выделение радоноопасных зон по данным аэрогамма-спектрометрии. *Метрологія-2012*. 2012. С. 584–591.
15. Иванов Л. А., Иванова Д. Л., Савченко А. В., Туманов В. В., Трифонов А. С. Условия применения геофизических методов для оценки современной активности разрывных нарушений. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. № 13, Ч. 2. С. 320–331.
16. Крымцов А., Афанасьев О., Свічкарь К. Ярусність рельєфу міста Дніпропетровська. *Геоморфологія в Україні : новітні напрямки і завдання*. 1999. С. 134–136.
17. Крымцов А. А., Афанасьев О. Е., Шевченко Б. Е. Историко-географическое районирование как один из аспектов урбоэкологических исследований городской среды г. Днепропетровска. *Грані*. 2001. № 3 (17). С. 22–29.
18. Крымцов А. А., Зеленская Л. И. Реконструкция природного рельефа Днепропетровска (экологический аспект). *Физическая география и геоморфология*. 1991. Вип. 32. С. 154–160.
19. Крымцов А. О. Сучасна тектоніка, екзогенні процеси і деформація споруд у місті Дніпропетровську. *Журнал з геології, географії та геоecології*. 2002. С. 1–4.
20. Лебедев М. О., Романевич К. В. Инженерно-геофизические исследования при реконструкции подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 5. С. 97–110. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110>
21. Маслак В. А., Безродный К. П., Лебедев М. О., Лаптев Н. А. Геотехнический мониторинг при щитовой проходке наклонного тоннеля Санкт-Петербургского метрополитена. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2010. Вып. 2. С. 152–159.
22. Орлюк М., Марченко А., Яцевський П. Зв'язок радонових і магнітних аномалій на території Українського щита та міста Києва. *Геодинаміка*. 2018. № 1 (24). С. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.080>
23. Седин В. Л., Ульянов В. Ю., Бикус Е. М. Шкала оценки активности тектонических разломов земной коры по интенсивности радоновыделения из недр на площадках строящихся и действующих АЭС. *Геориск*. 2015. № 4. С. 48–52.
24. Семинский К. Ж., Семинский А. К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации. *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Вып. 7 (3). С. 477–493. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0218>

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

25. Стрилец А. П., Пчёлкин Г. Д. Обоснование сейсмобезопасной масса групп шпуровых зарядов при проведении взрывных работ на строительстве тоннелей метро. *Сборник научных трудов НГУ «Днепровская политехника»*. 2019. № 58. С. 119–132. DOI: <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.119>
26. Удоратин В. В., Езимова Ю. Е., Магомедова А. Ш. Объемная активность радона в пределах разломных зон Кировско-Кажимского и Печоро-Колвинского авлакогенов. *Литосфера*. 2017. Т. 17, № 6. С. 136–152. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-136-152>
27. Ульянов В. Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах. *Проблемы недропользования*. 2015. № 1. С. 103–107.
28. Шаталов Н. Н. Тектонические предпосылки техногенно-природной катастрофы в городе Днепр. *Доповіді НАН України*. 2019. № 2. С. 68–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.02.068>
29. Швецов В. А., Меркин В. Е., Пискунов А. А., Петропавловских О. К., Лашков М. В. Нештатные ситуации при строительстве объектов метрополитена. Причины и ликвидация последствий. *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2014. Вып. 5 (24). С. 1–18.
30. Шумакова Е.М. Геодинамика как одна из возможных причин повышения температуры воздуха в зимний период бассейне Волги. *Учёные записки РГГМУ*. 2019. № 55. С. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-55-59-73>
31. Maestre C. R., Yepes Ch. S., Echarri V. I. The Radon Gas in Underground Constructions. Railway Tunnel of Alicante (Spain). *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.5. P. 393–395. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.5.20190>
32. Mao H., Zhu M., Wu F., Huang H. Detection and Control of Radon and its Progenies in a Tunnel. *2019 International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2019)*. 2019. Vol. 136. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913604005>
33. Ghafari M., Nahazanan H., Md Yusoff Z., Nik Daud N. N. A novel experimental study on the effects of soil and faults' properties on tunnels induced by normal and reverse faults. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 11. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113969>
34. Purnell C. J., Frommer G., Chan K., Auch A. A. Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004. Vol. 108. Iss. 4. P. 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch035>
35. Tan B., Yang G., Fu S., Xu, C. Study on radon concentration variation during subway construction. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020. Vol. 191. Iss. 4. P. 409–422. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa168>

V. Y. ULYANOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Engineering Geology and Geotechnics», Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756 33 43, e-mail uluanovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408

## Rationale for the Use of Radonometry to Identify the Areas of Tectonic Faults During the Passage of Subway Tunnels in Dnipro

**Purpose.** The article is aimed to substantiate the choice of the most effective method of geophysical research within the metropolis for more accurate mapping of fault zones in erupted rocks for the purposes of 2nd stage subway construction in the city of Dnipro. **Methodology.** Practical and organizational measures for radonometry for seismotectonics during the 2nd stage construction of the city subway were developed in detail, which in case of continued mining operations in the ravine-beam system contributes to further safe operation of the facility. **Findings.** Based on the analysis and evaluation of all profile studies conducted in the city in different years, one of the emanation methods was chosen – radonometry, and the method for its implementation was proposed, which provides dense urban development and complex tectonic structure of the region (fault zones) to obtain the necessary quality characteristics of soil incision. **Originality.** This paper for the first time provides a rationale for radonometry to identify fault zones in erupted rocks and assess their activity within the city. **Practical value.** The given technique is recommended for ensuring seismically safe conditions of drilling and blasting works during the passage of mine workings, which will ensure the maximum construction speed. In the future, these studies may be required when creating a ventilation system for underground structures of the 2nd stage of the city subway. Also, the radonometry results can be taken into account when placing elements of geotechnical (deformation) monitoring systems, both in

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

tunnels and other deep-seated subway structures, and in buildings and structures. Clarification of the position of fault zones with the assessment of their activity can directly affect the choice of certain methods of measuring the deformation parameters of the observed objects, facilitate the choice of means of tunnel processing, highlight their qualitative or quantitative parameters.

*Keywords:* geological structure; subway; granitoids; tunnel; radon; tectonic fault; radonometry; volumetric activity; equivalent equilibrium volumetric activity

## REFERENCES

1. Akimov, V. A., & Yafasov, A. Ya. (2001). Tectonic factor in the formation of radon fields in the atmosphere of the Tashkent metro. *Atomic energy*, 90(2), 115-121. (in Russian)
2. Akimov, V. A. (2001). *Issledovanie dinamik radonovogo gaza na territorii Tashkentskogo metropolitena* (Extended abstract of PhD dissertation). Institute of nuclear physics. Tashkent, Uzbekistan. (in Russian)
3. Alekseev, V. B., & Smirnov, V. V. (1996/97). Issledovanie protsessov nakopleniya radona v podzemnykh pomeshcheniyakh metropolitena. *ANRI*, 3(9), 85-88. (in Russian)
4. Antonov, Yu. R., & Levenko, A. S. (2002-2003). Opasnye geologicheskie protsessy v Dnepropetrovske. *Ekopolis: Ekologicheskii zhurnal Dnepropetrovskogo gorodskogo Soveta*, 1, 33-37. (in Russian)
5. Bugaev, E., Spivak, A., & Soloviev, S. (2013). Prospects of use of geophysical fields at a choice of a site and justification of stability of geodynamic and seismic conditions at pns operation. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 4(70), 10-17. (in Russian)
6. Bozhezha, D. N., Prilukov, V. V., Pidlisna, I. S., & Petranovskaya, M. A. (2014). Mobile geophysical methods application for the engineering-geological conditions examination of problem area in city. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 2, 154-162. (in Ukrainian)
7. Bulat, A. F., & Slashchev, I. N. (2017). The use of radon decay products as informative parameters for evaluation of the rocks geomechanical condition. *Geo-Technical Mechanics Collected of Scientific Papers*, 132, 3-16. (in Russian)
8. Bulnaev, S. A., Miromanov, M. A., & Tarasov, I. A. (2007). Radon v Severo-Muyskom zheleznodorozhnom tonnele. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 5(31), 101-111. (in Russian)
9. Wolfman, Yu. M., Novik, N. N., & Ostanin, A. M. (2005). The tectonic preconditions of natural and technonatural geosystems development. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 1(1), 47-55. (in Russian)
10. Voloshin, V. I., Shapar, A. G., & Peremetchik, N. N. (2005). Study of dangerous exogenous processes located on Dnepropetrovsk city territory using satellite images. *Space Science and Technology*, 11(5-6), 51-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2005.05.051> (in Russian)
11. Voloshin, V. I., Levenko, A. S., & Peremetchik, N. N. (2004). Forecast of manifestations of dangerous geological processes in Dnipropetrovsk with the use of methods of aerospace remote sensing of the Earth. *Space Science and Technology*, 10(5-6), 194-196. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2004.05.194> (in Russian)
12. Gendler, S. G., & Yakovenko, A. A. (2013). Evaluation of radiation environment in underground construction of Saint Petersburg subway. *Journal of Mining Institute*, 206, 146-149. (in Russian)
13. Gusev, V. N., Longzhid, E. B. Prediction of the zone of influence from the tunneling of existing inclined contacts of rocks. *Natural and technical sciences*, 5(119), 90-94. (in Russian)
14. Evdokimov, D. M., & Solodovnikova, L. N. (2012). Detection of radon-hazardous zones according to aerogamma-spectrometry data. *Metrology-2012*, 584-591. (in Russian)
15. Ivanov, L. A., Ivanova, D. L., Savchenko, A. V., Tumanov, V. V., & Trifonov, A. S. (2013). Conditions of Employing Geophysical Methods to Estimate Present Activity of Faults. *Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine*, 13(II), 320-331. (in Russian)
16. Krymtsov, A., Afanasyev, O., & Svichkar, K. (1999). Jarusnistj reljefu mista Dnipropetrovsjka. *Geomorphology in Ukraine: new directions and tasks*, 134-136. (in Ukrainian)
17. Krymtsov, A. A., Afanasyev, O. E., & Shevchenko, B. E. (2001). Istoriko-geograficheskoe rayonirovanie kak odin iz aspektov urboekologicheskikh issledovaniy gorodskoy sredey g. Dnepropetrovska. *Grani*, 3(17), 22-29. (in Russian)
18. Krymtsov, A. A., & Zelenskaya, L. I. (1991). Rekonstruktsiya prirodnogo relefa Dnepropetrovska (ekologicheskii aspekt). *Physical geography and geomorphology*, 38, 154-160. (in Russian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

19. Krimtsov, A. A. (2002). Suchasna tektonika, ekzoghenni procesy i deformacija sporud u misti Dnipropetrovsjku. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 1-4. (in Ukrainian)
20. Lebedev, M. O., & Romanevich, K. V. (2019). Engineering and geophysical research in reconstruction of underground structures. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 5, 97-110.  
DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110> (in Russian)
21. Maslak, V., Bezrodny, K., Lebedev, M., & Laptev, N. (2010). Geotechnical monitoring during shield driving of an inclined tunnel in St. Petersburg metro. *Izvestiya TulGU. Sciences of Earth*, 2, 152-159. (in Russian)
22. Orlyuk, M., Marchenko, A., & Yatsevskiy, P. (2018). The link of radon and magnetic anomalies on the territory of Ukrainian shield and Kyiv. *Geodynamics*, 1(24), 80-90.  
DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.080> (in Ukrainian)
23. Sedin, V. L., Ulyanov, V. U., & Bicus, K. M. (2015). Scale assessment of active tectonic faults of the crust on the intensity of radon exhalation from the depths to the construction site and the existing energy facilities. *Georisk*, 4, 48-52. (in Russian)
24. Seminsky, K. Z., & Seminsky, A. K. (2016). Radon in groundwaters in the baikal region and transbaikalia: variations in space and time. *Geodynamics & Tectonophysics*, 7(3), 477-493.  
DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0218> (in Russian)
25. Strilets, O., & Pchelkin, G. (2019). Substantiation of the seismically safe mass of the group of drill charges during explosive works on the construction of metro tunnels. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 58, 119-130. DOI: <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.119> (in Russian)
26. Udoratin, V. V., Ezimova, Yu. E., & Magomedova, A. S. (2017). Volumetric activity of radon within fault zones of Kirov-Kazhim and Pechora-Kolvin aulacogens. *Lithosphere*, 17(6), 136-152.  
DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-136-152> (in Russian)
27. Ulyanov, V. Yu. (2015). Organizatsiya i metodika provedeniia monitoringa radona na ploshchadkakh AES vaseismichnykh regionakh. *Problems of subsoil use*, 1, 103-107. (in Russian)
28. Shatalov, N. N. (2019). Tectonic preconditions of the technological and natural catastrophe in the city of Dnepr. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 68-77.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.02.068> (in Russian)
29. Shvetsov, V., Merkin, V., Piskunov, A., Petropavlovskih, O., & Lashkov, M. (2014). Emergency situations during construction underground facilities. Causes and liquidation of consequences. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 5(24), 1-18. (in Russian)
30. Shumakova, E. M. (2019). Geodynamics as one of the reasons for the increase in winter air temperature in the Volga river basin. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 55, 59-73.  
DOI: <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-55-59-73> (in Russian)
31. Maestre, C. R., Yepes, Ch. S., & Echarri, V. I. (2018). The Radon Gas in Underground Constructions. Railway Tunnel of Alicante (Spain). *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.5), 393-395.  
DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.5.20190> (in English)
32. Mao, H., Zhu, M., Wu, F., & Huang, H. (2019). Detection and Control of Radon and its Progenies in a Tunnel 2019 *International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2019)* (Vol. 136, pp. 1-3).  
DOI: <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913604005> (in English)
33. Ghafari, M., Nahazanan, H., Md Yusoff, Z., & Nik Daud, N. N. (2020). A Novel Experimental Study on the Effects of Soil and Faults' Properties on Tunnels Induced by Normal and Reverse Faults. *Applied Sciences*, 10(11), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113969> (in English)
34. Purnell, C. J., Frommer, G., Chan, K., & Auch, A. A. (2004). Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects. *Radiation Protection Dosimetry*, 108(4), 353-364. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch035> (in English)
35. Tan, B., Yang, G., Fu, S., & Xu, C. (2020). Study on radon concentration variation during subway construction. *Radiation Protection Dosimetry*, 191(4), 409-422. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa168> (in English)

Надійшла до редколегії : 02.06.2021

Прийнята до друку: 02.10.2021