



О. Лящук\*, Ю. Андрущенко, Л. Лящук

Головний центр спеціального контролю Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, смт. Городок, 12265, Україна

\* Автор для кореспонденції: alex\_liashchuk@ukr.net

## Радон як можливий індикатор сейсмічності регіону Західної Антарктиди

**Реферат.** На Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (УАС «Академік Вернадський») з 2003 року проводяться вимірювання концентрації приповерхневого радону. Аномальні концентрації радону є досить цінним індикатором тектонічної активності та можуть бути разом з іншими провісниками потенційними ознаками ймовірного землетрусу. Метою роботи є пошук взаємозв'язків між аномальними значеннями концентрації приповерхневого радону та проявами тектонічної активності. При проведенні вимірювань застосовувалися дозиметричні методи реєстрації розпаду ізотопів та дочірніх продуктів. При аналізі даних застосовувалися методи статистичного аналізу. В процесі проведення досліджень був проаналізований каталог землетрусів, що відбулися за час інструментальних спостережень концентрації радону та визначені сейсмічні області, що мають вплив на район розташування УАС «Академік Вернадський». Були визначені відстані, на яких імовірні прояви геофізичних аномалій в рамках запропонованої моделі та оцінений очікуваний вплив сейсмічності на вихід радону в місці спостереження. Результатом проведених досліджень є виявлення кореляції між концентрацією радону в точці спостережень та тектонічною активністю в регіоні на відстанях до 1100 км при магнітудах  $M > 7$ . На менших відстанях до землетрусу можлива реєстрація радонових аномалій при  $M > 6$ . В деяких випадках відзначено зростання концентрації радону за добу—дві до землетрусу, що може бути використано як потенційний провісник, однак стійкої повторюваності таких подій не спостерігалось. Відзначено, що для правильної інтерпретації результатів вимірювання концентрації радону необхідний аналіз метеорологічних параметрів.

**Ключові слова:** радон, землетрус, провісник, сейсмічність, метеопараметри

### 1 Вступ

На Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (УАС «Академік Вернадський») з 2003 року проводяться вимірювання концентрації приповерхневого радону. Результати цих інструментальних спостережень були використані

в ряді наукових праць, де розглядалася їх придатність як індикатора забруднення атмосфери при перенесенні повітряних мас континентального походження в Антарктиду (Plić et al., 2005) та вивчалися зв'язки між зміною концентрації радону і геомагнітними аномаліями, викликаними неотектонічною активністю (Rusov et al., 2006).

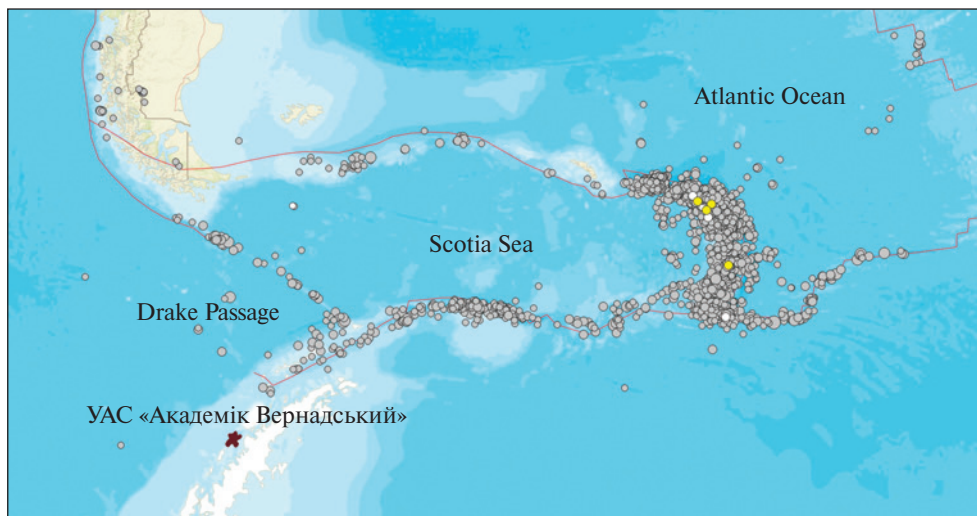
Слід зазначити, що дослідження еманції газів, зокрема радону, із земної кори з різним ступенем активності використовується в сейсмоактивних регіонах світу для пошуку ймовірних провісників землетрусів. Реєстрація радону в приземній атмосфері є одним з найбільш технологічних методів геофізичних досліджень, що використовується з цією метою. Радон як радіоактивний газ, що безперервно генерується в процесі радіоактивного розпаду, завжди присутній в гірському масиві. Його середній вміст постійний і визначається концентрацією урану. Відносно невеликий період напіврозпаду радону (3.82 доби), може розглядатись як позитивний чинник. Аномальна концентрація радону в точці вимірювання є одним з індикаторів зміни геодинамічної рівноваги, що дозволяє розглядати радон як можливий показник прояву тектонічної активності.

Позитивні кореляції між проявами радонових аномалій і землетрусами вперше були відмічені в процесі вимірювання концентрації ґрунтового радону в районі японського міста Тотторі (Okabe, 1956). В подальшому аналогічні вимірювання проводилися під час досліджень локальної сейсмічності до і після відомого землетрусу 1966 року в районі міста Ташкент (Уломов, Мавашев, 1967; Султанходжаев и др., 1974). На сьогодні радонові спостереження активно продовжують розвиватися в Японії, США, Росії, Європі (Planinić et al., 2004; Petraki et al., 2015; Hwa Oh, Kim, 2015; Goto et al., 2017; Сухоруков, Спивак, 2017; Riggio, Santulin, 2015). Численні дослідження підкреслюють наявність помітних аномалій концентрації радону в підземних водах під час землетрусів (Ingebritsen, Manga, 2014; Biagi et al., 2001), а у (Cicerone et al., 2009) повідомлено про кореляцію між концентрацією радону і регіональною варіацією напруженості. В роботі Koike et al. (2014) повідомляється про виявлену сильну кореляцію між концентрацією радону в ґрунтовому газі та накопиченою енергією недавніх навколишніх землетрусів, що пояснюється збільшенням порового тиску на глибині навколо джерела радону в результаті наведеної напруженості та деформації. Цією ж групою дослідників виконаний лабора-

торний експеримент для перевірки зростання викидів радону в результаті напружень стиснення (Koike et al., 2015). В огляді (Woith, 2015) розглянуто тектонічні напруги, відповідальні за відкриття і закриття тріщин та мікротріщин, які полегшують міграцію радону з кори на поверхню за допомогою рідин-носіїв, таких як ґрунтові води або інші ґрунтові гази. Попередні висновки підтверджує і робота по Венчунському землетрусу (Alam et al., 2020).

Загалом результати досліджень показують, що в глобальному масштабі радон може бути використаний у якості потенційного сейсмічного індикатора для сейсмічно активних районів. Однак для кожного такого регіону присутні певні геологічні та географічні особливості, що мають враховуватися на менших масштабах. У зв'язку з цим актуальними питаннями є оцінка впливу землетрусів сейсмічно активного району моря Скоша на вихід радону в регіоні УАС «Академік Вернадський», виявлення радонових аномалій перед землетрусами, оцінка відстаней до них та їх енергій.

На сейсмічність району розташування УАС «Академік Вернадський» найбільший вплив спричиняє сейсмічно активний регіон Південно-Антильського хребта, що оперізує море Скоша та протоку Дрейка і включає в себе острів Південну Джорджію та Південні Сандвічеві острови, Південні Шетландські та Південні Оркнейські острови. УАС «Академік Вернадський» розташована на відстані 1500 км від центру сейсмічної області. Регіон умовно можна розділити на декілька частин, що відрізняються інтенсивністю та глибиною землетрусів, головна і найактивніша з яких припадає на острівну дугу Південних Сандвічевих островів. Для дослідження сучасної активності тектонічних структур зазначеного сейсмоактивного регіону достатньо ефективно можуть використовуватися лише найближчі сейсмічні станції, розташовані на території Південної Америки та Антарктичного півострова. Світовою мережею фіксуються лише землетруси з магнітудами  $M > 4.5$  (рис. 1). На УАС «Академік Вернадський» сейсмічні спостереження ведуться з 2000 року за допомогою трикомпонентної цифрової



**Рисунок 1.** Прояви сейсмічності в регіоні Антарктичного півострова за період проведення радонових спостережень 2003—2020 рр.

**Figure 1.** Seismicity of the Antarctic Peninsula region during the period of radon observations 2003—2020

сейсмічної станції Guralp CMG-40TDE. Разом з тим в регіоні моря Скоша доволі часто відбуваються землетруси з магнітудами  $M > 6.0$  (максимальна зафіксована магнітуда  $M = 7.7$ ), що дає змогу оцінити кореляцію потужних землетрусів з еманациями радону в районі УАС «Академік Вернадський».

Характеристики радону є чутливим індикатором просторово-часових варіацій природних факторів, що включають коливання атмосферних температури, тиску і опадів; зміни радіологічних і фізико-механічних властивостей порід; наявності структурних особливостей порід; геодинамічного стану порід. Огляд можливих механізмів утворення радонових аномалій для випадків вулканічної та сейсмічної активності наведено у (Лящук і др., 2008). Разом з тим, можливі радонові аномалії не є уособленими і залежать від багатьох факторів, що проявляються в результаті всіх видів деформації гірського масиву включно зі складним процесом підготовки землетрусу.

Концентрація радону і характер її зміни визначається геологічною будовою регіону. Проникність масиву, наявність в ньому зв'язаних пор і тріщин, помітно залежать від напружено-деформованого стану масиву. Очевидно, що при

стисненні масиву проникність його знижується, а при розтяганні збільшується. Відповідно змінюється коефіцієнт дифузії радону. З цієї причини динамічні зміни концентрації радону в приповерхневому шарі ґрунту відобразатимуть динамічні зміни напружено-деформованого стану гірського масиву в значному об'ємі. Вказані чинники є основою для дослідження кореляції варіацій виділення радону та сейсмічних подій.

Виявлення і можлива реєстрація аномальних ефектів у геофізичних полях залежить як від енергії, що накопичується, так і часу, коли починають відбуватися зміни. За умови, що на пункті спостереження істотний вплив може бути відчутний лише з однієї сейсмічної зони, як у випадку УАС «Академік Вернадський», та у зв'язку з віддаленістю пункту спостереження від інших сейсмоактивних регіонів, можна допустити, що один з параметрів майбутньої події, а саме місце майбутньої події, відомий.

Відомо (Kasahara, 1981), що час прояву провісника  $T_{long}$  (у добах), що характеризує повільні тектонічні процеси, в рамках статистичного аналізу даних глобальних каталогів землетрусів, проведених різними авторами (Rikitake, 1976; Tsubokawa, 1973; Whitcomb et al., 1973), виявляє ліній-

ний (логарифмічний) зв'язок з магнітудою  $m$  землетрусу, що готується:

$$\lg T_{long} = \begin{cases} 0.79 \cdot m - 1.88 \\ 0.69 \cdot m - 1.57 \\ 0.80 \cdot m - 1.92 \\ 0.76 \cdot m - 1.83. \end{cases} \quad (1)$$

Слід додати, що модель утворення об'ємно-напруженої передсейсмічної зони землетрусу (Добровольський, 1991) і дислокаційна модель Флейшера (Fleisher, 1981) по суті якісно близькі за змістом і прогностичними висновками з дилатансними моделями (Scholz et al., 1973; Mjachkin et al., 1975), але відрізняються можливістю модельної оцінки радіусу  $R$  дії поля напруги, що індукується осередком майбутнього землетрусу з магнітудою  $M$ :

$$\lg R \cong \begin{cases} 0.43 m \\ 0.48 m. \end{cases} \quad (2)$$

Підставляючи конкретні значення до виразу (2), можемо оцінити максимальний радіус  $R$  дії поля напруги майбутнього землетрусу для різних значень магнітуди  $M$  (табл. 1).

При порогових магнітудах згідно таблиці пункт спостереження може знаходитись від епіцентру землетрусу на відстанях у декілька сотень кілометрів і більше. У разі збільшення енергії майбутнього землетрусу збільшується й інтервал часу прояву провісника. При цьому потрібно підкрес-

**Таблиця 1.** Радіус  $R$  дії поля напруги майбутнього землетрусу для різних значень магнітуди  $M$

**Table 1.** The radius  $R$  of action of a future earthquake for various values of magnitude  $M$

$M$	$R = 10^{0.43M}$ , км	$R = 10^{0.48M}$ , км
5.0	142	251
5.5	231	436
6.0	380	758
6.5	688	1318
7.0	1024	2291
7.7	2046	4965

лити, що наведені співвідношення носять статистичний характер і визначають час і відстань до епіцентру з невисокою точністю, беручи до уваги розкид значень параметрів.

## 2 Апаратура та методика вимірювань

Для проведення вимірювань на УАС «Академік Вернадський» був встановлений радіометр радону РРА-01М-03, який призначений для проведення вимірювань об'ємної активності радону-222 і торону-220 в повітрі робочих приміщень, а також на відкритому повітрі, в рамках своїх експлуатаційних параметрів. Додатково за даними радіометра можна контролювати параметри зовнішнього середовища: температуру, відносну вологість і атмосферний тиск.

Діапазон вимірювань об'ємної активності радону-222 становить інтервал від 20 до 20000 Бк/м<sup>3</sup>, рівень власного фону не більше 7 Бк/м<sup>3</sup>, поріг основної відносної похибки вимірювань не перевищує 30% при довірчій ймовірності 0.95. Є можливість зберігати не менш як 1500 вимірювань, підключення до персонального комп'ютеру через СОМ-порт.

Прилад був встановлений в спеціально збудованій споруді, до якої підведене електричне живлення, та знаходився у дерев'яному ящику із просверленими отворами, що забезпечували природну вентиляцію. Патрон-осушувач встановлювався у заглиблення в породі. Радіометр знаходився в режимі безперервних вимірювань. При цьому 5 хвилин працювала мікроповітродувка (0.8 л/хв), після чого протягом 20 хвилин відбувався вимір об'ємної активності. Далі відбувалося автоматичне відключення ресурсів живлення крім внутрішнього таймера та індикатора. По завершенню обраного інтервалу часу процес вимірювання повторювався. Для даного типу приладу найменший можливий інтервал між вимірами становить 85 хвилин. Дані з приладу зчитувалися один раз на тиждень. Під час зчитування замінювався силікагель в патроні-осушувачі. У 2017 році радіометр РРА-01М-03 вийшов із ладу та був замінений у 2019 році на AlphaE виробництва SAPHYMO GmbH (Німеч-

чина). В якості детектора в ньому використовується дифузійна камера з кремнієвим діодом. Діапазон вимірювання складає  $20 \text{ Бк/м}^3 - 10 \text{ МБк/м}^3$ . Час вимірювання регульований від 10 хвилин до 12 годин, був вибраний одногодинний інтервал. В радіометрі встановлено метеоблок, що дозволяє додатково вимірювати значення температури, тиску та вологості. Батарея живлення дозволяє працювати приладу автономно до 6 місяців, внутрішня пам'ять зберігає 8500 наборів даних. Радіометр станом на початок 2020 року встановлений у сейсмічному павільйоні.

Для виявлення аномалій в часових рядах концентрації радону використовувались методи аналізу, що розглянуті у роботі (Лящук, Павлович, 2010). Також для виявлення аномалій в радонових рядах можна використовувати відомий факт, що зі збільшенням сейсмічної активності в регіоні має збільшуватись і виділення радону і торону через тріщини в гірських породах. Але еманція незмінних вивержених порід (граніт, базальт та ін.) загалом не дуже велика. Набагато більший

вплив на отримувані дані визначається ексхалляцією — виведенням ізотопів радону з поверхні порід. Підвищення атмосферного тиску знижує ексхалляцію, точно так як і промерзання ґрунту. Циклонічна діяльність впливає на рівень сейсмічного фону на станції, що в свою чергу впливає на рівень активності радону. Серед атмосферних факторів найбільший вплив на рівень концентрації радону чинять опади у вигляді дощу і тривала суха та вітряна погода. Найбільший вплив на вимірювану величину щільності потоку радону із земної поверхні і в меншій мірі на величину вимірюваної об'ємної активності підґрунтового радону мають часові варіації атмосферних температури і тиску.

### 3 Результати і обговорення

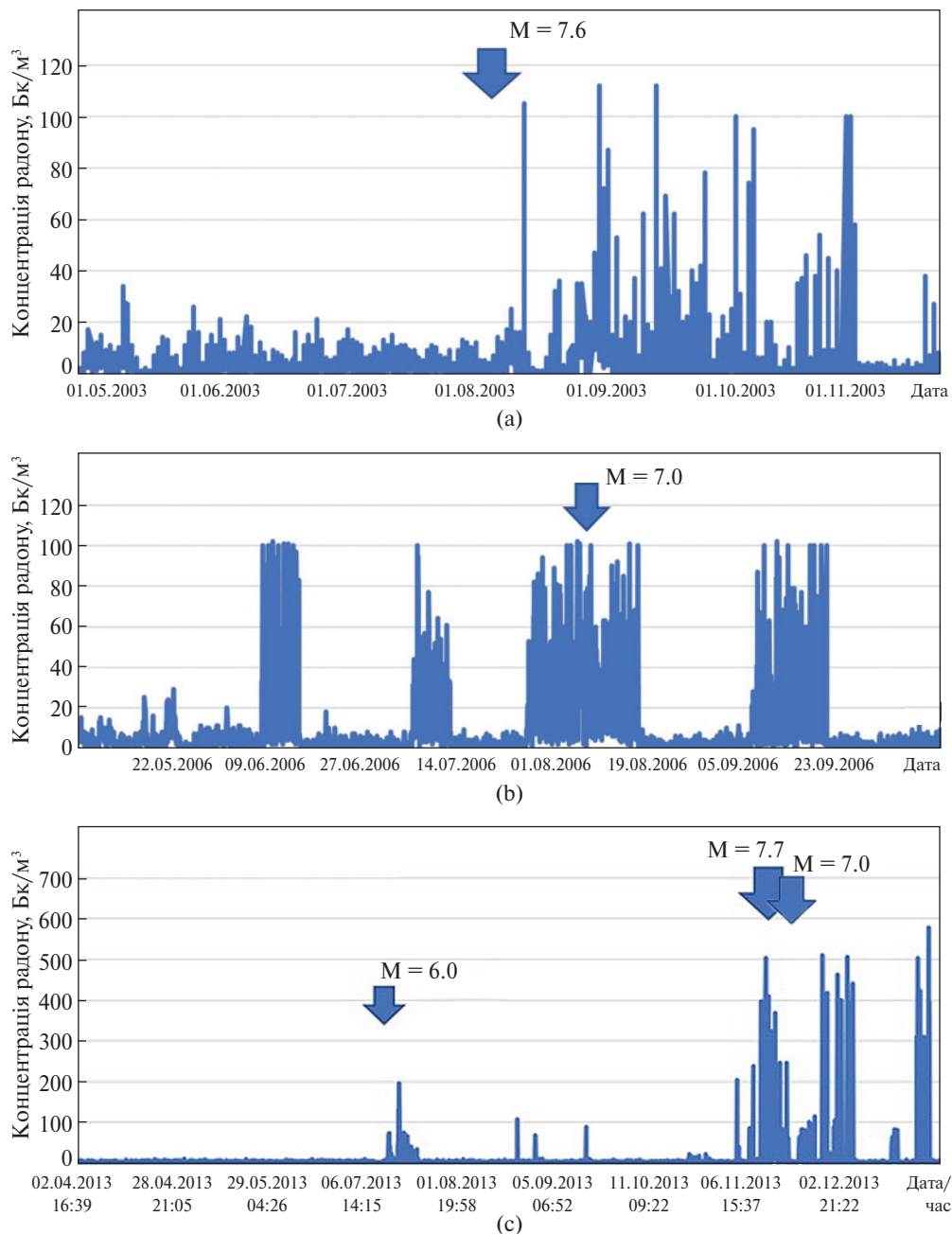
Для обробки брали дані, отримані в інтервали часу, що припадали на час землетрусу та передували йому. При цьому враховували відстані від епіцентру події до УАС «Академік Вернадський»

Таблиця 2. Перелік зареєстрованих землетрусів

Table 2. List of registered earthquakes

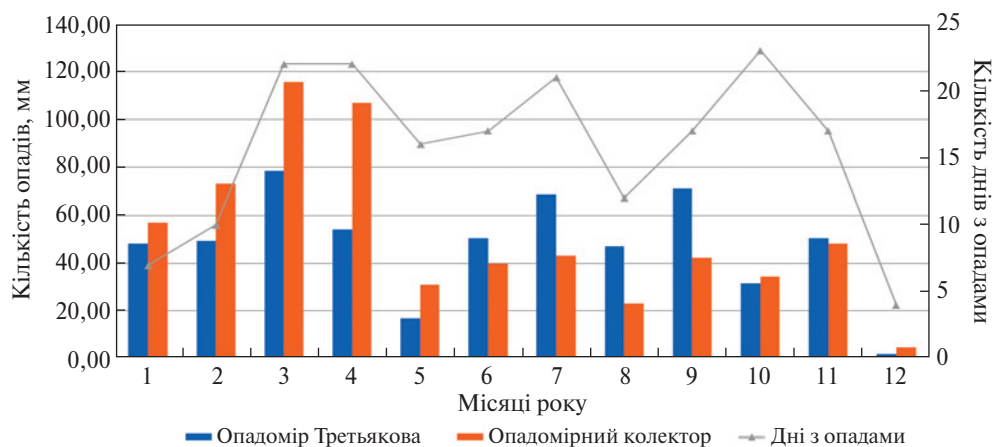
Дата і час	Широта, ° пд.	Довгота, ° зх.	Глибина, км	Магнітуда	Відстань, км	Регіон
11.12.2018 02:26	58.5446	26.3856	133	7.1	2079	Південні Сандвічеві о-ви
19.08.2016 07:32	55.2852	31.8766	10	7.4	2065	Південна Джорджія
28.05.2016 09:46	56.2409	26.9353	78	7.2	2216	Південна Джорджія та Південні Сандвічеві о-ви
25.11.2013 06:27	53.9451	55.0033	12	7.0	1356	Фолклендські о-ви
<b>17.11.2013 09:04</b>	<b>60.2738</b>	<b>46.4011</b>	<b>10</b>	<b>7.7</b>	<b>1057</b>	<b>Море Скоша</b>
15.07.2013 14:03	60.857	25.07	11	7.3	1997	Південні Сандвічеві о-ви
30.06.2008 06:17	58.227	22.099	8	7.0	2300	Південні Сандвічеві о-ви
20.08.2006 03:41	61.029	34.371	13	7.0	1555	Море Скоша
02.01.2006 06:10	60.957	21.606	13	7.4	2152	Південні Сандвічеві о-ви
<b>04.08.2003 04:37</b>	<b>60.532</b>	<b>43.411</b>	<b>10</b>	<b>7.6</b>	<b>1171</b>	<b>Море Скоша</b>
2013.07.16 19:42	63.378	62.543	9	5.7	223	Узбережжя о-ва Лоу (220 км на північний схід від УАС «Академік Вернадський»)
2012.01.15 14:22	60.882	55.965	10	6.0	639	Південні Шетландські о-ви
2012.01.15 13:40	60.948	56.113	8	6.6	628	Південні Шетландські о-ви
2009.10.27 00:05	59.955	65.163	10	6.0	589	Протока Дрейка





**Рисунок 2.** Концентрація радону на УАС «Академік Вернадський» (а) (2003), з відміченим стрілкою землетрусом  $M = 7.6$  у морі Скоша (Південні Оркнейські о-ви), відстань від УАС «Академік Вернадський» до епіцентру землетрусу — 1171 км. (б) (2006)  $M = 7.0$  у морі Скоша, відстань — 1555 км. (с) (2013)  $M = 7.7$  у морі Скоша (Південні Оркнейські о-ви), відстань — 1057 км;  $M = 7.0$  у районі Фолклендські о-ви, відстань — 1356 км;  $M = 6.0$  у протоці Дрейка, відстань — 589 км

**Figure 2.** Radon concentration at the Akademik Vernadsky station (a) (2003) with a marked earthquake  $M = 7.6$  in the Scotia Sea (near South Orkney Islands), the distance from the Akademik Vernadsky station to the earthquake epicenter — 1171 km. (b) (2006)  $M = 7.0$  in the Scotia Sea, distance — 1555 km. (c) (2013)  $M = 7.7$  in the Scotia Sea (near the South Orkney Islands), distance — 1057 km;  $M = 7.0$ , Falkland Islands, distance— 1356 km;  $M = 6.0$  in the Drake Passage, distance— 589 km



**Рисунок 3.** Місячні суми опадів, відібраних за допомогою опадомірного колектора та опадоміра Третякова, і кількість днів з опадами в районі УАС «Академік Вернадський» у 2013 р.

**Figure 3.** Monthly precipitation amounts collected using the Tretyakov sediment collector and sediment gauge and the number of precipitation days in the area of the Akademik Vernadsky station, 2013

згідно табл. 1. Для початку були відібрані землетруси з магнітудою  $M \geq 7$ . За час спостережень у регіоні, що розглядається, відбулося 10 таких подій. Діапазон відстаней 1057–2300 км. Перелік землетрусів наведено у табл. 2.

Серед зазначених землетрусів лише три відбулися в районі моря Скоша (Південні Оркнейські острови), відстань до яких складає 1–1.5 тис. км. У визначений інтервал потрапляє також землетрус з району Фолклендських островів. Діаграми розподілу концентрації радону у часі з позначеннями відповідних землетрусів наведені на рис. 2.

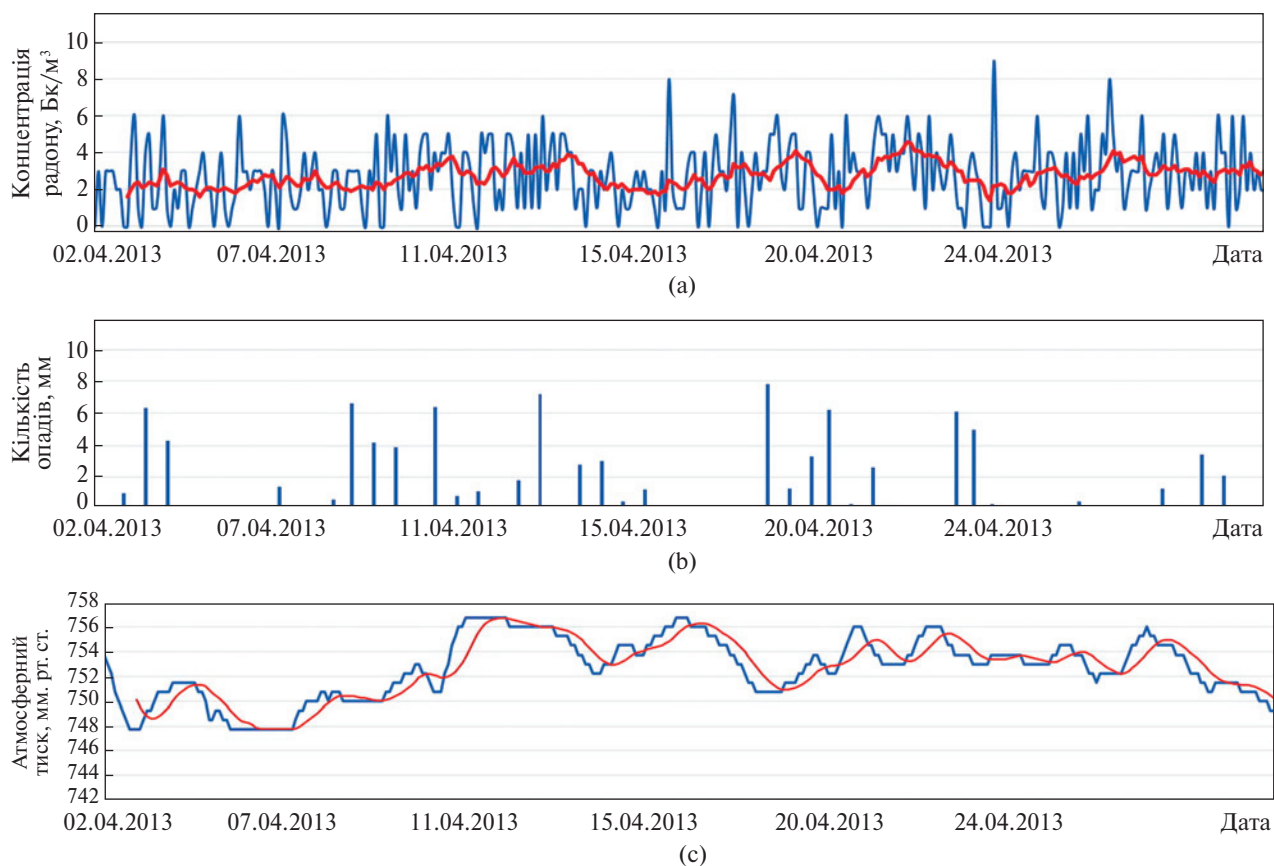
З рис. 2 видно, що концентрація радону іноді збільшується і корелює з моментом землетрусу, при цьому підвищеному рівню передують певні затишся (рис. 2а, с), коли рівень концентрації радону тривалий час нижче середнього. Час затишся складає 40–70 діб, що корелює з часом підготовки землетрусу. Однак слід зазначити, що наведені низькі значення концентрації радону можуть залежати і від промерзання гірських порід, так як час затишся у вказаних випадках припадає на зимовий сезон, коли температури повітря мінімальні. В той же час на рис. 2б такої залежності не спостерігається, разом з тим наявні сплески концентрації радону, які близькі за часом проходження циклонів. Для більших відста-

ней (землетруси в районі Сандвічевих островів) візуальних змін на графіку концентрації радону не спостерігається. Можна бачити лише зміни, які імовірно пов'язані із циклонічною діяльністю. Таким чином, перша частина виразу (2) є більш доцільною для практичного застосування.

Розраховані коефіцієнти кореляції атмосферного тиску з концентраціями радону перед та під час подій землетрусів, що задовольняють умову (2). Перед землетрусом використовувалося часові вікна тривалістю 40 діб, на час землетрусу — вікно тривалістю 7 діб. Для землетрусу в районі моря Скоша 2003 року коефіцієнт кореляції складає 0.24 перед та 0.02 під час, для землетрусу 2013 року відповідні коефіцієнти кореляції склали 0.31 та 0.14. Такі величини кореляцій є дуже низькими, що не дозволяє за наявною інформацією прослідкувати можливі зв'язки «землетрус — збільшення потоку радону».

Для подій 2013 року, на який припало 3 потужних землетруси, розглянемо наявні дані про місячні суми опадів, зібрані за допомогою опадомірного колектора та опадоміра Третякова, а також дані про кількість днів з опадами за кожен місяць (рис. 3).

Порівняння з часовим рядом концентрації радону (рис. 2с) не виявляє видимого збігу за часом



**Рисунок 4.** Концентрація радону та лінія тренду змінного середнього (а), кількість опадів (б) і атмосферний тиск та його лінія тренду змінного середнього (с) у сейсмоспокійний період квітня 2013 року

**Figure 4.** Radon concentration and its trend line of variable average (a), precipitation (b), and atmospheric pressure and its trend line of variable average (c) in the seismic calm period of April 2013

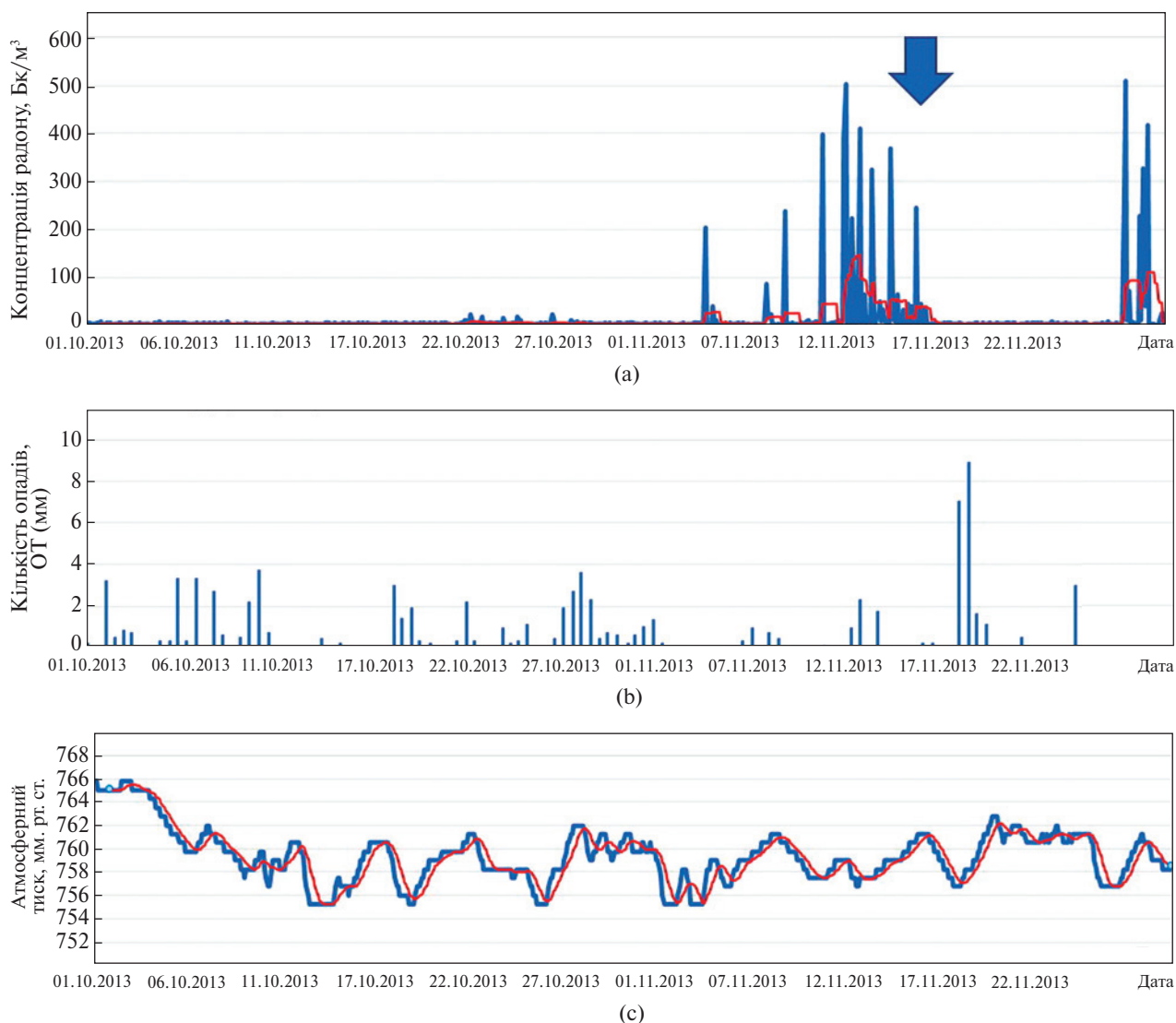
перед та на момент землетрусу. Слід зауважити, що синхронні коливання опадів та концентрації радону можуть проявлятися на менших часових масштабах та при менших рівнях амплітуд та мати локальний характер. Однак підготовка землетрусу магнітуди  $M > 7$  триває досить довгий час, і кількість опадів може не відігравати такого впливу як ріст деформацій земної кори та поровий тиск. Показовими є результати вимірювань концентрації радону та кількості опадів мережею радіометрів перед та під час землетрусу  $M_w = 7.9$  у Веньчуані (Alam et al., 2020).

Наведемо графік варіацій концентрації радону за інтервал часу, коли сейсмічних подій не відбувалося (рис. 4). На рисунку 6 також наведе-

но діаграми атмосферного тиску та кількості опадів. На графіках варіацій концентрації радону та атмосферного тиску додатково відмічені лінії тренду змінного середнього. За цими вимірюваннями коефіцієнт кореляції складає 0.35.

Розглянемо варіації коливання концентрації радону на УАС «Академік Вернадський» разом із параметрами атмосферного тиску та кількості опадів на момент найпотужнішого за час спостережень землетрусу в регіоні моря Скоша. Коефіцієнт кореляції між рівнем радону та атмосферним тиском для цієї події становить 0.31. Значні опади припадають на інтервали часу, коли рівень концентрації радону невисокий. Опади, як зазначено у роботах (Burnett et al., 2010; Mercier et



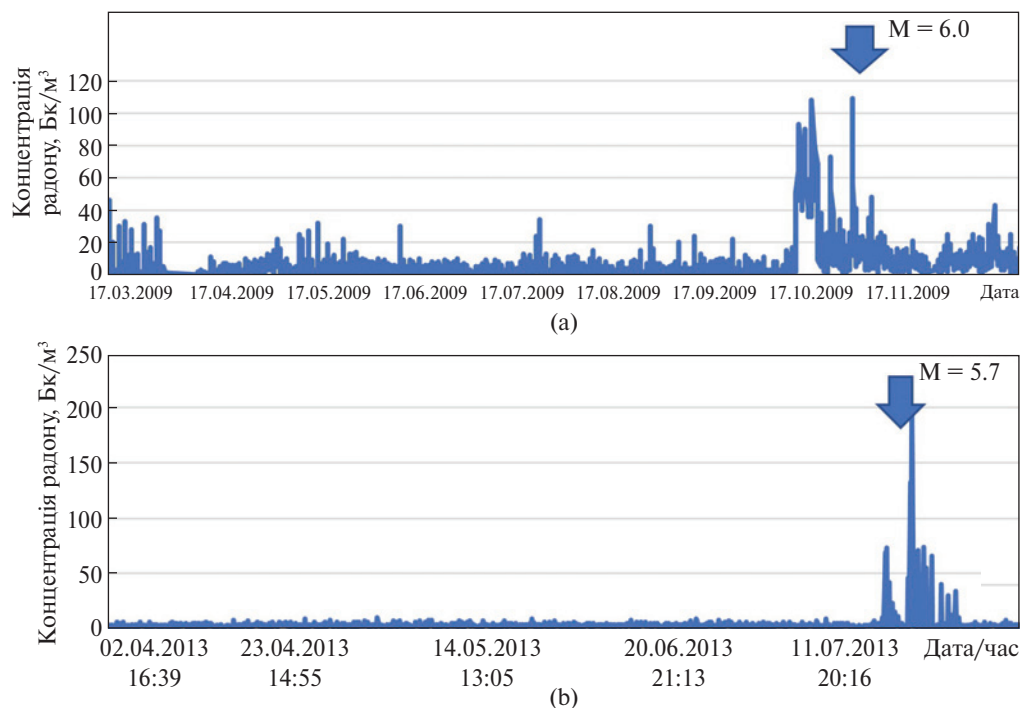


**Рисунок 5.** Концентрація радону та лінія змінного середнього (а), кількість опадів (б) та атмосферний тиск та його лінія змінного середнього (с) у період сейсмічної активності в регіоні моря Скоша у жовтні–листопаді 2013 року

**Figure 5.** Radon concentration and line of variable average (a), precipitation (b), and atmospheric pressure and line of variable average (c) during seismic activity in the region of the Scotia Sea region in October–November 2013

al., 2009), відіграють головну роль у варіаціях атмосферного  $\gamma$ -фону і призводять до короточасних стрибкоподібних сплесків в реєстрованих характеристиках поля  $\gamma$ -випромінювання у 2 і більше разів. Термін «radon washout» (вимивання радону) визначає вимивання  $\gamma$ -випромінюючих дочірніх продуктів розпаду радону і торону опадами на земну поверхню. Однак, у випадку, що

розглядається (рис. 5), очікуваного значущого зв'язку між інтенсивністю опадів та альфа-випроміненням радону в приповерхневому шарі не виявлено. Причиною цього може бути недостатньо розвинені методика відбору даних та засоби вимірювань. Разом з тим на графіку помітне підвищення концентрації радону з 28.11.2013, що не може бути пояснено сейсмічними чи метео-



**Рисунок 6.** Концентрація радону на УАС «Академік Вернадський». (а) (2009) землетрус  $M = 6.0$  в протоці Дрейка. Відстань від УАС «Академік Вернадський» до епіцентру землетрусу 589 км. (б) (2013) землетрус  $M = 5.7$  поблизу о. Лоу (Південні Шетландські острови). Відстань — 220 км  
**Figure 6.** Radon concentration at the Akademik Vernadsky station. (a) (2009) earthquake  $M = 6.0$  in Drake Passage. The distance from the Akademik Vernadsky station to the earthquake epicenter 589 km. (b) (2013) with marked earthquake  $M = 5.7$  near Low Island (South Shetland Islands). Distance from the Akademik Vernadsky station to the earthquake epicenter — 220 km

рологічними чинниками і вимагає подальшого додаткового вивчення.

Для відстаней  $R < 1000$  км розглянемо землетруси з рівнем до  $M = 5.5$ . Впродовж періоду спостережень відбулося 4 землетруси, що відповідають встановленому критерію (табл. 2, нижня частина).

Для двох землетрусів у цей період спостерігався сплеск концентрації радону за декілька діб до початку події. Цьому передувало тривале затишшя з низьким рівнем концентрації радону (рис. 6).

Для землетрусу у протоці Дрейка 2009 року (рис. 6a) коефіцієнт кореляції «подія-концентрація радону» складає 0.38 перед та 0.43 під час події. Для землетрусу 2013 року (рис. 6b) поблизу о. Лоу відповідні коефіцієнти кореляції складають 0.29 та 0.34. Для події землетрусу (2009) в протоці Дрейка були визначені і порівняні часові варіації

атмосферного тиску та концентрації радону. Дані були попередньо відфільтровані, для чого побудовані лінії тренду змінного середнього. За цими даними існують аномальні флуктуації концентрації радону при нормальних метеорологічних умовах, що може свідчити про те, що аномалії імовірно були індуковані тектонічними процесами. Для землетрусів Південних Шетландських островів, характерних ознак, як у випадку попередніх землетрусів, не спостерігалось.

Таким чином, виміряні аномальні значення концентрації радону в точці спостережень іноді корелюють з проявами тектонічної активності в регіоні. Сейсмічна подія у деяких випадках припадає на час початку збільшення концентрації радону, що може свідчити про можливість зміни напружено-деформованого стану гірських порід

та, як результат, прискореного виходу газу на поверхню. В деяких випадках концентрація радону зростає за декілька діб до землетрусу, що може розглядатись разом з іншими імовірними показниками, що іноді передують землетрусу, як провісник, однак стійкої повторюваності не спостерігається. Відмічені також сплески концентрації радону, що не можуть бути пов'язані з сейсмічністю в регіоні та метеорологічною обстановкою в пункті реєстрації.

#### 4 Висновки

Визначено кореляції між радоновими аномаліями і сейсмічною активністю для декількох подій землетрусів в районі моря Скоша, район Західної Антарктиди («дуга моря Скоша»), за спостереженнями на УАС «Академік Вернадський». Інтерпретація отриманих кореляцій потребує повного розуміння механізму утворення приповерхневого радону. Сейсмічно посиленна деформація кори і поровий тиск у насичених ґрунтах та породах є найбільш ймовірними факторами, що призводять до збільшення концентрації радону в процесі розвитку землетрусу. Однак до варіацій концентрації радону іноді можуть призводити і метеорологічні фактори, серед яких важливу роль відіграють опади.

Загалом результати дослідження показують, що радон може бути використаний разом з іншими відомими провісниками як потенційний індикатор сейсмічно активного району моря Скоша. Для правильної інтерпретації результатів спостережень за рівнем концентрації радону і прогнозу його поведінки необхідний також аналіз метеорологічних параметрів. Встановлене на УАС «Академік Вернадський» нове сучасне метеорологічне та сейсмічне обладнання в перспективі може дати новий матеріал для подальших досліджень в цьому напрямку.

Тривале зниження концентрації радону, не пов'язане з метеорологічними чинниками, може вказувати на ймовірну підготовку сейсмічної події. Тривалість такої аномалії має бути пов'язана з магнітудою землетрусу, що готується. Даний

ефект може краще проявлятися при  $M > 7.0$  на відстанях до 1100 км, та при  $M > 6$  на менших відстанях. Різке збільшення концентрації радону за декілька діб до землетрусу після тривалого затишення може вказувати на початок розвитку землетрусу. Збільшення концентрації радону відразу після землетрусу, за умови відсутності метеорологічних аномалій, імовірно може бути пов'язане із скиданням напруги в гірському масиві. Необхідно відзначити, що така поведінка радону на досить великій відстані від епіцентру землетрусу має бути обумовлена структурою земної кори в даному регіоні. Вказана поведінка більше відповідає моделі (Добровольський, 1991), однак для підтвердження цього необхідна більша кількість статистичного матеріалу та продовження спостережень.

У подальшому результати дослідження можуть бути використані для створення прогностичної експертної системи в регіоні Західної Антарктиди, для чого може бути залучений весь унікальний геофізичний комплекс УАС «Академік Вернадський».

*Внесок авторів.* Ідея, розробка концепції: ОЛ, ЮА. Збір та підготовка даних: ЛЛ. Формальний аналіз: ОЛ. Дослідження: ОЛ, ЮА. Візуалізація: ЛЛ. Реферат: ЮА. Написання, початковий план: ОЛ. Написання, рецензування та редагування: ОЛ. Всі автори прочитали і згодні з публікацією даної версії рукопису.

*Конфлікт інтересів.* Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

*Подяка.* Автори висловлюють щире подяку керівництву Державної установи Національний антарктичний науковий центр та Головного центру спеціального контролю за надану можливість проведення досліджень, геофізикам 8–24 УАЕ за забезпечення якісних вимірювань, редакції журналу та рецензентам за цінні зауваження та пропозиції. Робота виконана в рамках Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки.

## Посилання

Добровольский И.П. 1991. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Институт Физики Земли АН СССР. 217 с.

Ляшук А.И., Павлович В.Н. 2010. Решение задач мониторинга опасных геофизических явлений программно-аппаратным геофизическим комплексом Украинской антарктической станции Академик Вернадский. Український антарктичний журнал. № 9. С. 82–90.

Ляшук А.И., Павлович В.Н., Руссов В.Д. 2008. Мониторинг концентрации радона как предвестник землетрясений в районе гор Вранча. Геофизический журнал. Т. 30. № 2. С. 63–74.

Султанходжаев А.Н., Тыминский В.Г., Уломов В.И., Файзуллин И.С. 1974. Об использовании радона для прогнозирования землетрясений. Узбекский геологический журнал. № 2. С. 44–49.

Сухоруков М.В., Спивак А.А. 2017. Пространственно-временные особенности поля радона в связи с тектоническими структурами. Успехи современного естествознания. № 1. С. 94–99.

Уломов В.И., Мавашев Б.З. 1967. О предвестнике сильного тектонического землетрясения. Доклады АН СССР. Т. 176. № 2. С. 35–37.

Alam, A., Wang, N., Zhao, G., Barkat, A.: Implication of Radon Monitoring for Earthquake Surveillance Using Statistical Techniques: A Case Study of Wenchuan Earthquake, *Geofluids*, 2429165, doi:10.1155/2020/2429165, 2020.

Biagi, P.F., Ermini, A., Kingsley, S.P., Khatkevich, Y.M., Gordeev, E.I.: Difficulties with interpreting changes in ground water gas content as earthquake precursors in Kamchatka, Russia, *Journal of Seismology*, 5 (4), 487–497, doi:10.1023/A:1012015317086, 2001.

Burnett, J.L., Croudace, I.W., Warwick, P.E.: Short-lived variations in the background gamma-radiation dose, *Journal of Radiological Protection*, 30 (3), 525–532, doi: 10.1088/0952-4746/30/3/007, 2010.

Cicerone, R.D., Ebel, J.E., Britton, J.: A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 476 (3–4), 371–396, doi:10.1016/j.tecto.2009.06.008, 2009.

Fleisher R.L.: Dislocation model for radon response to distance earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 8 (5), 477–480, doi:10.1029/GL008i005p00477, 1981.

Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori Y., Ihara, H., Mukai, T.: Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and after the 2011 northern Wakayama Earthquake (M<sub>l</sub> 5.5), *Radiation Protection Dosimetry*, 174 (3), 412–418, doi: 10.1093/rpd/ncw142, 2017.

Hwa Oh, Y., Kim, G.: A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor, *Scientific Reports*, 5, 13084, doi:10.1038/srep13084, 2015.

Ilić, R., Rusov, V.D., Pavlovych, V.N., Vaschenko, V.M., Hanžič, L., Bondarchuk, Y.A.: Radon in Antarctica, *Radiation*

*Measurements*, 40 (2–6), 415–422, doi:10.1016/j.radmeas.2005.03.022, 2005.

Ingebritsen, S.E., Manga, M.: Hydrogeochemical precursors, *Nature Geoscience*, 7, 697–698, doi:10.1038/ngeo2261, 2014.

Kasahara, K.: *Earthquake mechanics*, Cambridge University Press, 284 pp., doi:10.1002/eqe.4290110112, 1981.

Koike, K., Yoshinaga, T., Ueyama, T., Asaue, H.: Increased radon-222 in soil gas because of cumulative seismicity at active faults, *Earth, Planets and Space*, 66, 57, doi:10.1186/1880-5981-66-57, 2014.

Koike, K., Yoshinaga, T., Suetsugu, K., Kashiwaya, K., Asaue, H.: Controls on radon emission from granite as evidenced by compression testing to failure, *Geophysical Journal International*, 203 (1), 428–436, doi:10.1093/gji/ggv290, 2015.

Mercier, J.-F., Tracy, B.L., d'Amours, R., Chagnon, F., Hoffman, I., Korpach, E.P., Johnson, S., Ungar, R.K.: Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (7), 527–533, doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.03.002, 2009.

Mjachkin, V.I., Brace, W.F., Sobolev, G.A., Deiterich, J.H.: Two models for earthquake forerunners, *Pure and Applied Geophysics*, 113 (1), 169–181, doi:10.1007/BF01592908, 1975.

Okabe, S.: Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Memoirs of the College of Science; Kyoto Imperial University*, 28 (2), 99–115, 1956.

Petraki, E., Nikolopoulos, D., Panagiotaras, D., Cantzos, D., Yannakopoulos, P., Nomicos, C., Stonham, J.: Radon-222: A Potential Short-Term Earthquake Precursor, *Journal of Earth Science and Climatic Change*, 6, 282, doi:10.4172/2157-7617.1000282, 2015.

Planinić, J., Radolić, V., Vuković, B.: Radon as an earthquake precursor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 530 (3), 568–574, doi:10.1016/j.nima.2004.04.209, 2004.

Riggio, A., Santulin, M.: Earthquake forecasting: A review of radon as seismic precursor, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56 (2), 95–114, doi:10.4430/bgta0148, 2015.

Rikitake, T.: *Earthquake Prediction*, Elsevier Scientific Publishing Company, 357 pp., 1976.

Rusov, V.D., Maksymchuk, V.Yu., Ilić, R., Pavlovych, V.M., Bakmutov, V.G., Saranuk, D.N., Vaschenko, V.M., Skvarč, J., Hanžič, L., Kosenko, S.I.: The peculiarities of cross-correlation between two secondary precursors — radon and magnetic field variations, induced by tectonic activity, *Ukrainian Antarctic Journal*, 4–5, 160–181, 2006.

Scholz, C.H., Sykes, L.R., Aggarwal, Y.P.: *Earthquake Prediction: A Physical Basis*, Science, 181, 4102, 803–810, doi: 10.1126/science.181.4102.803, 1973.



Tsubokawa, I.: On relation between duration of precursory geophysical phenomena and duration of crustal movement before earthquake, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 19 (2), 116–119, 1973.

Whitcomb, J.H., Garmany, J.D., Anderson, D.L.: Earthquake prediction: variation of seismic velocities before the San Francisco Earthquake, *Science*, 180 (4086), 632–635, doi:10.1126/science.180.4086.632, 1973.

Woith, H.: Radon earthquake precursor: A short review, *The European Physical Journal Special Topics*, 224, 611–627, doi:10.1140/epjst/e2015-02395-9, 2015.

## References

Dobrovolskiy, I.P.: *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [Theory of tectonic earthquake preparation], Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 217 pp., 1991.

Liashchuk, A.I., Pavlovich, V.N.: Reshenie zadach monitoringa opasnykh geofizicheskikh yavleniy programmno-apparatnyim geofizicheskim kompleksom Ukrainy antarkticheskoy stantsii Akademik Vernadskiy [Solving the problems of monitoring hazardous geophysical phenomena by the hardware-software geophysical complex of the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station], *Ukrainian Antarctic Journal*, 9, 82–90, 2010.

Liashchuk, A.I., Pavlovich, V.N., Russov, V.D.: Monitoring kontsentratsii radona kak predvestnik zemletryaseniya v rayone gor Vrancha [Monitoring of radon concentration as a harbinger of earthquakes in the Vrancea mountains], *Geophysical Journal*, 30 (2), 63–74, 2008.

Sultankhodzhayev, A.N., Tyminskiy, V.G., Ulomov, V.I., Fayzullin, I.S.: Ob ispolzovanii radona dlya prognozirovaniya zemletryaseniya [On the use of radon for earthquake prediction], *Uzbekskiy geologicheskii zhurnal* [Uzbek Geophysical Journal], 2, 44–49, 1974.

Sukhorukov, M.V., Spivak, A.A.: Prostranstvenno-vremennyye osobennosti polya radona v svyazi s tektonicheskimi strukturami [Spatio-temporal features of the radon field in connection with tectonic structures]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya* [The successes of modern science], 1, 94–99, 2017.

Ulomov, V.I., Mavashev, B.Z.: O predvestnike silnogo tektonicheskogo zemletryaseniya [About the harbinger of a strong tectonic earthquake], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 176 (2), 35–37, 1967.

Alam, A., Wang, N., Zhao, G., Barkat, A.: Implication of Radon Monitoring for Earthquake Surveillance Using Statistical Techniques: A Case Study of Wenchuan Earthquake, *Geofluids*, 2429165, doi:10.1155/2020/2429165, 2020.

Biagi, P.F., Ermini, A., Kingsley, S.P., Khatkevich, Y.M., Gordeev, E.I.: Difficulties with interpreting changes in groundwater gas content as earthquake precursors in Kamchatka, Russia, *Journal of Seismology*, 5 (4), 487–497, doi:10.1023/A:1012015317086, 2001.

Burnett, J.L., Croudace, I.W., Warwick, P.E.: Short-lived variations in the background gamma-radiation dose, *Journal of Radiological Protection*, 30 (3), 525–532, doi: 10.1088/0952-4746/30/3/007, 2010.

Cicerone, R.D., Ebel, J.E., Britton, J.: A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 476 (3–4), 371–396, doi:10.1016/j.tecto.2009.06.008, 2009.

Fleisher R.L.: Dislocation model for radon response to distance earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 8 (5), 477–480, doi:10.1029/GL008i005p00477, 1981.

Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori Y., Ihara, H., Mukai, T.: Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and after the 2011 northern Wakayama Earthquake (M<sub>J</sub> 5.5), *Radiation Protection Dosimetry*, 174 (3), 412–418, doi: 10.1093/rpd/ncw142, 2017.

Hwa Oh, Y., Kim, G.: A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor, *Scientific Reports*, 5, 13084, doi: 10.1038/srep13084, 2015.

Ilić, R., Rusov, V.D., Pavlovych, V.N., Vaschenko, V.M., Hanžič, L., Bondarchuk, Y.A.: Radon in Antarctica, *Radiation Measurements*, 40 (2–6), 415–422, doi:10.1016/j.radmeas.2005.03.022, 2005.

Ingebritsen, S.E., Manga, M.: Hydrogeochemical precursors, *Nature Geoscience*, 7, 697–698, doi:10.1038/ngeo2261, 2014.

Kasahara, K.: *Earthquake mechanics*, Cambridge University Press, 284 pp., doi:10.1002/eqe.4290110112, 1981.

Koike, K., Yoshinaga, T., Ueyama, T., Asaue, H.: Increased radon-222 in soil gas because of cumulative seismicity at active faults, *Earth, Planets and Space*, 66, 57, doi:10.1186/1880-5981-66-57, 2014.

Koike, K., Yoshinaga, T., Suetsugu, K., Kashiwaya, K., Asaue, H.: Controls on radon emission from granite as evidenced by compression testing to failure, *Geophysical Journal International*, 203 (1), 428–436, doi:10.1093/gji/ggv290, 2015.

Mercier, J.-F., Tracy, B.L., d'Amours, R., Chagnon, F., Hoffman, I., Korpach, E.P., Johnson, S., Ungar, R.K.: Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (7), 527–533, doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.03.002, 2009.

Mjachkin, V.I., Brace, W.F., Sobolev, G.A., Deiterich, J.H.: Two models for earthquake forerunners, *Pure and Applied Geophysics*, 113 (1), 169–181, doi:10.1007/BF01592908, 1975.

Okabe, S.: Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Memoirs of the College of Science; Kyoto Imperial University*, 28 (2), 99–115, 1956.

Petraki, E., Nikolopoulos, D., Panagiotaras, D., Cantzos, D., Yannakopoulos, P., Nomicos, C., Stonham, J.: Radon-222: A Potential Short-Term Earthquake Precursor, *Journal of Earth Science and Climatic Change*, 6, 282, doi:10.4172/2157-7617.1000282, 2015.

Planinić, J., Radolić, V., Vuković, B.: Radon as an earthquake precursor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics*



Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 530 (3), 568–574, doi:10.1016/j.nima.2004.04.209, 2004.

Riggio, A., Santulin, M.: Earthquake forecasting: A review of radon as seismic precursor, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56 (2), 95–114, doi:10.4430/bgta0148, 2015.

Rikitake, T.: *Earthquake Prediction*, Elsevier Scientific Publishing Company, 357 pp., 1976.

Rusov, V.D., Maksymchuk, V.Yu., Ili, R., Pavlovych, V.M., Bakhmutov, V.G., Saranuk, D.N., Vaschenko, V.M., Skvarč, J., Hanžič, L., Kosenko, S.I.: The peculiarities of cross-correlation between two secondary precursors — radon and magnetic field variations, induced by tectonic activity, *Ukrainian Antarctic Journal*, 4–5, 160–181, 2006.

Scholz, C.H., Sykes, L.R., Aggarwal, Y.P.: Earthquake Prediction: A Physical Basis, *Science*, 181, 4102, 803–810, doi:10.1126/science.181.4102.803, 1973.

Tsubokawa, I.: On relation between duration of precursory geophysical phenomena and duration of crustal movement before earthquake, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 19 (2), 116–119, 1973.

Whitcomb, J.H., Garmany, J.D., Anderson, D.L.: Earthquake prediction: variation of seismic velocities before the San Francisco Earthquake, *Science*, 180 (4086), 632–635, doi:10.1126/science.180.4086.632, 1973.

Woith, H.: Radon earthquake precursor: A short review, *The European Physical Journal Special Topics*, 224, 611–627, doi:10.1140/epjst/e2015-02395-9, 2015.

Received: 16 April 2020

Accepted: 12 June 2020

**O. Liashchuk\*, Yu. Andrushchenko, L. Liashchuk**

The Main Center of Special Monitoring, State Space Agency of Ukraine, Gorodok, 12265, Ukraine

\* Corresponding author: alex\_liashchuk@ukr.net

### **Radon as a possible indicator of West Antarctic seismicity**

**Abstract.** The measurements of near-surface radon concentration have been carried out at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station (Akademik Vernadsky station) since 2003. Abnormal concentrations of radon could serve as a possible valuable indicator of tectonic activity, along with other evidence, potential signs of an expected earthquake. The aim of the work is to find the relationship between the abnormal values of the surface radon concentration, which correlate with tectonic activity. During the measurements, dosimetric methods for detecting the decay of isotopes and daughter products were used. When analyzing the data, statistical analysis methods were used. The sequence of earthquakes that occurred during instrumental observations of radon concentration, has been analyzed. The potential seismic regions affecting the location of the Akademik Vernadsky station were determined. The distances were determined at which geophysical anomalies are likely to occur within the framework of the proposed model and the expected effect of seismicity on the radon yield at the observation site is estimated. The result of the studies shows low correlation between the concentration of radon at the observation point and tectonic activity in the region at distances up to 1100 km with a magnitude of  $M > 7$ . At shorter distances to an earthquake, radon anomalies can be expected at  $M > 6$ . In some cases, the increase in radon concentration in day—two before the earthquake has been observed. That can be used as a potential predictor, however, no stable recurrence of such events was measured. It is noted that for the correct interpretation of the radon concentration measurements, the analysis of meteorological parameters can be necessary.

**Keywords:** radon, earthquake, predictor, seismicity, meteorological parameters