

# Autoreferat

## 1. Imię i nazwisko.

Lidia FIJAŁKOWSKA-LICHWA

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

**Stopień doktora:** w dziedzinie nauk technicznych

Dyscyplina: Górnictwo i geologia inżynierska

Specjalność: Izotopy w środowisku

Podmiot nadający stopień: Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii

Rok uzyskania stopnia doktora: 2012

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Krótkookresowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w podziemnych obiektach turystycznych.*

*Od października 2007 do marca 2012 roku byłam słuchaczką studiów doktoranckich. W czerwcu 2008 roku otworzyłam przewód doktorski.*

### Studia podyplomowe:

Specjalność: Menedżer projektu badawczo-rozwojowego (B+R)

Uczelnia: Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu

Rok ukończenia: 2013

*W maju 2013 roku ukończyłam z wynikiem bardzo dobrym studia podyplomowe.*

### Jednolite studia magisterskie:

Kierunek: Górnictwo i geologia inżynierska

Specjalność: Gospodarka zasobami ziemi i ochrona środowiska

Uczelnia: Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii

Rok obrony pracy magisterskiej: 2007

Tytuł pracy magisterskiej: *Zasoby potencjalnie leczniczych wód radonowych Masywu Ślęży.*

*W lipcu 2007 roku ukończyłam z wynikiem bardzo dobrym jednolite studia magisterskie. Za osiągnięte wyniki w nauce zostałam wyróżniona nagrodą Dziekana Wydziału.*

## 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

W lipcu 2013 roku wygrałam otwarty konkurs na stanowisko Adiunkta w Zakładzie Geologii Inżynierskiej i Środowiskowej Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Jako pracownik Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej byłam zatrudniona na stanowisku:

- **Adiunkta badawczo-dydaktycznego od 1 października 2022 roku – obecnie**
- Adiunkta dydaktycznego od 1 maja 2019 roku do 30 września 2022 roku
- Starszego wykładowcy od października 2018 roku do 30 kwietnia 2019 roku
- Adiunkta od października 2013 roku do 30 września 2018 roku.

Od kwietnia 2012 roku do września 2013 roku byłam pracownikiem Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej zatrudnionym na stanowisku:

- Asystenta naukowo-badawczego od października 2012 roku do 30 września 2013 roku
- Samodzielnego referenta technicznego od kwietnia do października 2012 roku.

W ciągu 10 lat kariery zawodowej przez 5 lat pracowałam na stanowisku dydaktycznym. Mimo to nieprzerwanie prowadziłam badania naukowe z zakresu **górnictwa**. Wraz ze zmianą stanowiska od października 2022 roku widnieję w systemie POLon jako pracownik naukowy prowadzący działalność badawczo-naukową w dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (100%).

**4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.**

Podstawą ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego jest zbiór, **10-ciu powiązanych tematycznie publikacji** wydanych w czasopismach z listy filadelfijskiej oraz ujętych w bazie Journal Citation Reports. Łączna punktacja cyklu na dzień złożenia wniosku to: 590 pkt (wg MNiSW), 21,2 pkt (zgodnie z IF). **Cykl publikacji zawiera 4 prace autorskie ( $\Sigma IF=7,9$ ), 5 dwuautorskich ( $\Sigma IF=11,7$ ) i jedną wieloautorską (czterech autorów, z  $IF=1,6$ ). Jestem pierwszym, jak i korespondencyjnym autorem każdej z prac.** Cykl publikacji stanowią artykuły oryginalne powstałe w latach 2014–2023. Wszystkie prace zostały opublikowane w międzynarodowych czasopismach wiodących w popularyzacji zagadnień naukowych dotyczących występowania promieniowania jonizującego w środowisku i jego oddziaływania na organizm człowieka. Jest to 6 czasopism takich wydawnictw jak: Springer, Elsevier i Oxford Academic o renomie uznanej od dziesięcioleci w kraju i na świecie. Wszystkie z artykułów uzyskały pozytywną opinię edytora prowadzącego i zostały zakwalifikowane do procesu recenzji przeprowadzonego w systemie *double-blind review proces*. Pozytywne recenzje w mojej opinii potwierdzają ich wysoki poziom merytoryczny, oryginalność stawianych tez, zasadność podejmowanych badań, dobrze dobraną metodologię, poprawność formułowanych wniosków i sposób ich prezentacji. Wykaz publikacji cyklu wraz ze szczegółowymi danymi naukometrycznymi zebrałam w tabelach 1A i 1B.

Tab. 1A. Wykaz publikacji wchodzących w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych.

| Nr  | Autorzy                       | Rok  | Tytuł  | Czasopismo/DOI   | IF* | MNiSW* | Wkład w powstanie publikacji [%] |
|---|-------------------------------|------|--|--|-----|--------|----------------------------------|
| <b>Prace własne - autorskie</b>               |                               |      |  |  |     |        |                                  |
| 1   | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> | 2014 | Short-term radon activity concentration changes along the underground educational tourist route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts, SW Poland). | Journal of Environmental Radioactivity. 135, 25–35.<br>doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.014             | 2,3 | 70     | 100                              |
| 2   | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> | 2015 | Estimation of radon risk exposure in selected underground workplaces in the Sudetes (southern Poland).   | Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 8, 334 – 353.<br>doi.org/10.1016/j.jrras.2015.02.003 | 1,7 | 20     | 100                              |
| 3   | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> | 2016 | Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned Uranium Mine ‘Podgórze’ in Kowary (Sudety Mts, Poland).                          | Journal of Environmental Radioactivity. 165, 13–23.<br>doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.08.016             | 2,3 | 70     | 100                              |
| 4   | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> | 2020 | The assessment of lining structure impact on radon behaviour inside selected underground workings under the cour d’honneur of Książ castle.                | Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 326, 1199–1211.<br>doi.org/10.1007/s10967-020-07391-3  | 1,6 | 40     | 100                              |
| <b>Prace współautorskie i 1 wieloautorska</b> |                               |      |  |  |     |        |                                  |

|    |  |      |   |  |     |     |    |
|----|--|------|---|--|-----|-----|----|
| 5  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.,</b><br>Przylibski, T.A.                                       | 2016 | First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland).           | Journal of Environmental Radioactivity. 165: 253 – 269.<br>doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.10.010 | 2,3 | 70  | 85 |
| 6  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.,</b><br>Przylibski, T.A.                                       | 2020 | A comprehensive characteristic of <sup>222</sup> Rn activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of bear cave in Kletno, Poland.                    | Radiation Protection Dosimetry. 1–19<br>doi:10.1093/rpd/ncz263                                   | 1,0 | 40  | 75 |
| 7  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.,</b><br>Przylibski, T.A.                                       | 2021 | Assessment of occupational exposure from radon in the newly formed underground tourist route under Książ castle, Poland.  | Radiation and Environmental Biophysics<br>doi.org/10.1007/s00411-021-00903-z                     | 1,7 | 70  | 75 |
| 8  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.,</b><br>Przylibski, T.A.                                       | 2022 | Monthly and quarterly correction factors for determining the mean annual radon concentration in the atmosphere of underground workplaces in Poland.   | Environmental Geochemistry and Health<br>doi.org/10.1007/s10653-022-01280-2                      | 4,4 | 100 | 80 |
| 9  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.,</b><br>Przylibski, T.A.,<br>Norenberg, M.,<br>Maciejewski, P. | 2023 | Intercomparison of equipment measuring radon activity concentration in the air—an example from a hydrotechnical structure in Dobromierz (SW Poland).  | Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry<br>doi.org/10.1007/s10967-023-08882-9           | 1,6 | 40  | 80 |
| 10 | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.,</b><br>Przylibski, T.A.                                       | 2023 | Radon ( <sup>222</sup> Rn) as a tracer in natural ventilation efficiency assessment in underground workings – an example of „St John Mine” tourist complex in Krobica (the Sudetes, SW Poland). | Journal of Environmental Radioactivity. 265. 107225<br>doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107225     | 2,3 | 70  | 70 |

\* na IX. w roku zgłoszenia wniosku habilitacyjnego

Tab. 1B. Dane naukometryczne publikacji wchodzących w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych.

| Nr                              | Autorzy                       | Tytuł  | Czasopismo/ Rok  | IF* | MNiSW* | Liczba cytowań<br>wg<br>Google<br>Scholar | Liczba cytowań<br>wg Scopus | Liczba cytowań<br>wg Web of<br>Science |
|---------------------------------|-------------------------------|--|--|-----|--------|---|-----------------------------|--|
| <b>Prace własne - autorskie</b> |                               |  |  |     |        |   |                             |  |
| 1                               | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> | Short-term radon activity concentration changes along the underground educational tourist route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts, SW Poland). | Journal of Environmental Radioactivity. 135, 25–35. 2014               | 2,3 | 70     | 31  | 19                          | 19                                     |
| 2                               | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> | Estimation of radon risk exposure in selected underground workplaces in the Sudetes (southern Poland).   | Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 8, 334 – 353. 2015 | 1,7 | 20     | 6   | 0                           | 4                                      |

|   |   |   |  |             |            |           |           |           |
|---|---|---|--|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 3   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L.</b>   | Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned Uranium Mine 'Podgórze' in Kowary (Sudety Mts, Poland).   | Journal of Environmental Radioactivity. 165, 13–23. 2016               | 2,3         | 70         | 16        | 13        | 10        |
| 4   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L.</b>   | The assessment of lining structure impact on radon behaviour inside selected underground workings under the cour d'honneur of Książ castle.   | Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 326, 1199–1211. 2020 | 1,6         | 40         | 5         | 3         | 3         |
|   |   |   | <b>Σ</b>   | <b>7,9</b>  | <b>200</b> | <b>58</b> | <b>35</b> | <b>36</b> |
| <b>Prace współautorskie i 1 wieloautorska</b>               |   |   |  |             |            |           |           |           |
| 5   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L., Przylibski, T.A.</b>                                 | First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland).           | Journal of Environmental Radioactivity. 165: 253 – 269. 2016           | 2,3         | 70         | 11        | 9         | 7         |
| 6   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L., Przylibski, T.A.</b>                                 | A comprehensive characteristic of <sup>222</sup> Rn activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of bear cave in Kletno, Poland.                    | Radiation Protection Dosimetry. 1–19 2020                              | 1,0         | 40         | 4         | 4         | 4         |
| 7   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L., Przylibski, T.A.</b>                                 | Assessment of occupational exposure from radon in the newly formed underground tourist route under Książ castle, Poland.  | Radiation and Environmental Biophysics 2021                            | 1,7         | 70         | 3         | 3         | 3         |
| 8   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L., Przylibski, T.A.</b>                                 | Monthly and quarterly correction factors for determining the mean annual radon concentration in the atmosphere of underground workplaces in Poland.   | Environmental Geochemistry and Health 2022                             | 4,4         | 100        | 3         | 2         | 2         |
| 9   | <b>Fijałkowska–Lichwa, L., Przylibski, T.A., Norenberg, M., Maciejewski, P.</b> | Intercomparison of equipment measuring radon activity concentration in the air— an example from a hydrotechnical structure in Dobromierz (SW Poland).   | Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2023                  | 1,6         | 40         | 0         | 0         | 0         |
| 10  | <b>Fijałkowska–Lichwa, L., Przylibski, T.A.</b>                                 | Radon ( <sup>222</sup> Rn) as a tracer in natural ventilation efficiency assessment in underground workings – an example of „St John Mine” tourist complex in Krobica (the Sudetes, SW Poland). | Journal of Environmental Radioactivity. 265. 107225 2023               | 2,3         | 70         | 0         | 0         | 0         |
|   |   |   | <b>Σ</b>   | <b>13,3</b> | <b>390</b> | <b>21</b> | <b>18</b> | <b>16</b> |
| <b>Sumaryczna liczba wskaźników cyklu publikacji wynosi</b> |   |   |  | <b>21,2</b> | <b>590</b> | <b>79</b> | <b>53</b> | <b>52</b> |

\* stan na IX. w roku zgłoszenia wniosku habilitacyjnego

Tab. 2. Dane naukometryczne prac recenzowanych wchodzących w skład dorobku naukowego wnioskodawcy.

| Nr | Autorzy   | Rok  | Tytuł   | Wydawca/DOI  | IF*  | MNiSW* | Liczba cytowań wg Google Scholar | Liczba cytowań wg Scopus | Liczba cytowań wg Web of Science |
|----|---|------|---|--|------|--------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1  | Przylibski, T.A.,<br><b>Fijałkowska, L.</b> , Bielecka, A.  | 2008 | Potencjalnie lecznicze wody radonowe Masywu Słęzy.  | Przegląd Geologiczny. 56, 8/2, 763–771.  | brak | 40     | Nieindeksowane                   |                          |                                  |
| 2  | Przylibski, T.A., Bartak, J.,<br>Kochowska, E.,<br><b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> ,<br>Kozak, K., Mazur, J.                                    | 2010 | New SRDN–3 probes with a semi-conductor detector for measuring radon activity concentration in underground spaces.  | Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 289, 599–609. DOI 10.1007/s10967-010-0574-9    | 1,6  | 40     | 17                               | 14                       | 14                               |
| 3  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b>   | 2010 | Radon w medycynie i jego oddziaływanie na organizm człowieka.   | Ekonatura. 4, 8–9.   | brak | brak   | Nieindeksowane                   |                          |                                  |
| 4  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> ,<br>Przylibski, T.A  | 2011 | Short-term <sup>222</sup> Rn activity concentration changes in underground spaces with limited air exchange with the atmosphere.  | Natural Hazards and Earth System Sciences. 11, 4, 1179–1188. doi:10.5194/nhess-11-1179-2011      | 4,6  | 100    | 17                               | 17                       | 17                               |
| 5  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b>   | 2012 | Zagrożenie radonowe w wybranych podziemnych trasach turystycznych Sudetów.  | Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie. 8. 24-30.                                | brak | 5,0    | Nieindeksowane                   |                          |                                  |
| 6  | <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b>   | 2012 | Historia badań związanych z występowaniem radonu w obiektach podziemnych Polski.  | Ekonatura. 3, 29–30.   | brak | brak   | Nieindeksowane                   |                          |                                  |
| 7  | Przylibski, T. A., Gorecka, J., Kula, A.,<br><b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> ,<br>Zagożdżon, K.,<br>Zagożdżon, P., Miśta, W.,<br>Nowakowski, R. | 2014 | <sup>222</sup> Rn and <sup>226</sup> Ra activity concentrations in groundwaters of southern Poland – new data and selected genetic relations.   | Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 301, 3, 757–764. DOI 10.1007/s10967-014-3215-x | 1,6  | 40     | 30                               | 22                       | 21                               |
| 8  | Przylibski, T.A.,<br>Wyłomańska, A., Zimroz, R.,<br><b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b>   | 2015 | Application of spectral decomposition of <sup>222</sup> Rn activity concentration signal series measured in Niedzwiedzia Cave to identification of mechanisms responsible for different time-period variations. | Applied Radiation and Isotopes. 104, 74–86. dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.06.029            | 1,6  | 70     | 18                               | 15                       | 15                               |

|   |   |      |   |   |      |      |                |     |     |
|---|---|------|---|---|------|------|----------------|-----|-----|
| 9   | Przylibski, T. A., Kaczorowski, M., <b>Fijałkowska-Lichwa L.</b> , Kasza, D., Zdunek, R., Wronowski, R.   | 2020 | Testing of <sup>222</sup> Rn application for recognizing tectonic events observed on water-tube tiltmeters in underground Geodynamic Laboratory of Space Research Centre at Książ (the Sudetes, SW Poland). | Applied Radiation and Isotopes. Vol 163, 108967. doi.Org/10.1016/J.apradiso.2019.108967   | 1,6  | 70   | 8              | 7   | 7   |
| 10  | Przylibski T.A., <b>Fijałkowska-Lichwa L.</b>   | 2021 | Podsumowanie wyników badań promieniowania jonizującego w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie.   | w: Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie: 55 lat badań, ochrony i edukacji / red. Wojciech Ciężkowski, Artur Sawicki, Krzysztof Stefaniak. Nowa Ruda: Wydawnictwo Drukarnia Kokociński. 2021. s. 107-112. | brak | 5,0  | Nieindeksowane |     |     |
| 11  | Goliáš, V., Hájková, L., Lipanský, T., Černík, T., Kohn, P., Ježek, J., Procházka, R., Przylibski, T. A., Dohnal, J., Strnad, L., Kowalska, A., <b>Fijałkowska-Lichwa, L.</b> , Mišta, W., Nowakowski, R. | 2022 | Exploration and Investigation of High-Level Radon Medicinal Springs in the Crystalline Units: Lúgicum.  | Water. 14, 200. doi.org/10.3390/w14020200   | 3,4  | 100  | 1              | 1   | 0   |
| Σ   |   |      |   |   | 14,4 | 470  | 98             | 76  | 74  |
| Sumaryczna liczba wskaźników całego dorobku naukowego wynosi obliczona jako: (ΣTab. 1B + ΣTab. 2) |   |      |   |   | 35,6 | 1060 | 177            | 129 | 126 |

\* stan na IX. w roku zgłoszenia wniosku habilitacyjnego

Tab. 3. Cytowania prac z dorobku naukowego wnioskodawcy, łącznie z cyklem publikacji.

| Nazwa bazy  | Liczba cytowań* | Indeks Hirscha h-index* |
|---|-----------------|-------------------------|
| <b>Web of Science Core Collection</b><br>– z uwzględnieniem autocytowań | 126             | 6                       |
| <b>Scopus</b> – z uwzględnieniem autocytowań                            | 129             | 7                       |
| <b>Google Scholar</b> – z uwzględnieniem autocytowań                    | 177             | 8                       |

\* stan na IX. w roku zgłoszenia wniosku habilitacyjnego

Mój wkład w powstanie pięciu prac współautorskich i jednej wieloautorskiej wchodzących w cykl publikacji jest znaczny i wynosi od 70% do 85% (Tab. 1A). **Wskazany procent udziału w realizacji prac współautorskich wynika z faktu, że byłam twórcą hipotezy badawczej, pomysłodawcą badań, wykonawcą analiz wyników, w tym:**

- zestawienia wyników pomiarów w zbiorze danych
- statystycznej analizy danych, wraz z interpretacją
- materiału ilustrującego przeprowadzone analizy (tabel, wykresów, rysunków)
- pierwszej wersji każdego manuskryptu wraz z wnioskami.

Pełniłam rolę autora korespondencyjnego, odpowiedzialnego za proces redakcyjny (w tym: wykonanie abstraktów graficznych, napisanie listów polecających do redakcji czasopism, złożenie manuskryptów według wymogów wydawnictwa), a po recenzji – edycję manuskryptów i korektę zgodnie z uwagami recenzentów. Szczegółowy opis mojego zaangażowania w powstanie każdej z współautorskich prac cyklu zawierają oświadczenia wskazane jako: *Contributions* lub *Author contributions* znajdujące się w publikacjach.

**Mój indywidualny procentowy udział w powyższych pracach, towarzyszących powstaniu współautorskich publikacji cyklu został potwierdzony w oświadczeniach współautorów** (dołączone do autoreferatu jako zał. 4). Byłam pomysłodawcą publikacji nr 10, a publikacja nr 9 powstała, dzięki realizacji zadania badawczego, którym kierowałam w konkursie Miniatura–5 (zał. 5.1).

W moim dorobku naukowym gromadzonym w czasie trwania kariery zawodowej znajduje się poza pracami z cyklu publikacji także: 10 artykułów, 10 rozdziałów w książce, 10 materiałów konferencyjnych, 9 referatów, 1 komunikat oraz 17 raportów (w tym 10 będących efektem realizacji prac zleconych). Wykaz prac recenzowanych, nie włączonych do cyklu publikacji stanowiącego osiągnięcie naukowe zestawiałam w tabeli nr 2. Cytowania całego dorobku naukowego przedstawiłam w tabeli nr 3. Prace nie ujęte w tabelach 1 i 2 przedstawiłam w załączniku nr 2.

### **Tytuł osiągnięcia naukowego:**

**Charakterystyka zmienności stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w wybranych obiektach podziemnych Polski i jej wpływ na ocenę narażenia radiacyjnego**

### **Charakterystyka tematu badań**

Podstawowym celem naukowym prac przedstawionych w cyklu publikacji (Tab. 1) jest wykorzystanie wyników długookresowych pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  prowadzonych w obiektach podziemnych SW części Polski w identyfikacji charakteru jego zmian w różnych interwałach czasu. Cel główny podzieliłam na cele szczegółowe, którym przypisałam trzy podstawowe obszary badawcze. Merytoryczny opis badań wskazanych w powiązonym tematycznie cyklu publikacji przedstawiłam w czterech rozdziałach: wprowadzenie, metodyka badawcza, rezultaty badań i podsumowanie. W rozdziale poświęconym результатам badań zawarłam powołania rysunków i tabel pochodzących z dziesięciu publikacji naukowych cyklu. Rozdział dotyczący metodyki badawczej potraktowałam jako wspólny dla trzech obszarów badań cyklu. Uwzględniłam w nim opis przyrządów pomiarowych, zasady doboru i specyfikacji stanowisk pomiarowych oraz stosowane metody analizy danych.

Cele szczegółowe trzech tematycznie powiązanych obszarów badań przedstawionych w cyklu publikacji to:

#### **1. Kompleksowa analiza charakteru zmienności stężenia aktywności $^{222}\text{Rn}$ w obiektach podziemnych**

- charakterystyka zmian sezonowych w obiektach o naturalnej wentylacji
- charakterystyka zmian sezonowych w obiektach wyposażonych w system wentylacji mechanicznej
- identyfikacja wpływu obudowy górniczej na przebieg zmian sezonowych w obiektach o naturalnej wentylacji
- charakterystyka zmian krótkookresowych w obiektach wyposażonych w system wentylacji mechanicznej
- charakterystyka zmian krótkookresowych w obiektach o naturalnej wentylacji i różnym pochodzeniu – obiekt naturalny, antropogeniczny
- identyfikacja charakteru i przebiegu zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w okresach przejściowych występujących jesienią i wiosną
- identyfikacja wpływu stopnia izolacji obiektu od atmosfery, w tym także obudową górniczą, na przebieg zmian krótkookresowych

## 2. Ocena kontrolna warunków panujących w obiektach podziemnych w aspekcie przepisów ochrony radiologicznej w Polsce

- określenie ryzyka narażenia na promieniowanie jonizujące na podstawie dawki efektywnej oszacowanej dla pracowników i osób z ogółu ludności
- określenie średniego rocznego poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$
- wskazanie rozwiązań dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego osób zwiedzających i z obsługi na trzech etapach tworzenia nowego obiektu użyteczności publicznej (podziemnej trasy turystycznej)
- opracowanie bazy współczynników korekcyjnych stanowiących pierwsze użyteczne narzędzie w określaniu poziomu wielkości (lub rzędu wielkości) stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w ciągu roku w obiektach podziemnych
- zweryfikowanie specyfikacji prowadzenia pomiarów w miejscu pracy ustalonej przez Głównego Inspektora Sanitarnego (GIS) na podstawie pomiarów porównawczych w warunkach terenowych
- rozszerzenie bazy podziemnych miejsc pracy na Dolnym Śląsku, w których prowadzone są długookresowe pomiary dozymetryczne i środowiskowe

## 3. Wykorzystanie pomiarów stężenia aktywności $^{222}\text{Rn}$ w obiektach podziemnych w badaniach znacznikowych ruchów powietrza, na granicy litosfera – atmosfera

- charakterystyka zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w odniesieniu do ruchów powietrza pomiędzy wnętrzem obiektu a atmosferą
- określenie warunków wymiany powietrza z otoczeniem, głównie w okresach przejściowych
- wskazanie zaleceń dla właściwego przewietrzania wyrobisk w okresach o utrudnionej wymianie powietrza obiektu z atmosferą na przykładzie sztolni w Krobicy.

## Wprowadzenie

W Polsce promieniotwórczość naturalna, związana z obecnością radonu, w obiektach podziemnych, głównie turystycznych jest zagadnieniem znanym od lat 70-tych ubiegłego stulecia (Ciężkowski, 1978, 1989; Ogorzałek, 2009). Spośród istniejących w Polsce ponad dwustu obiektów podziemnych udostępnionych do zwiedzania turystom zaledwie w około siedemdziesięciu z nich prowadzone są pomiary stężenia aktywności radonu (Przylibski, 1996, 1999, 2001, 2015; Przylibski i Ciężkowski, 1999, Przylibski i in., 2020; Chibowski and Komosa, 2001; Skowronek i in., 2004; Olszewski, 2006, 2019; Olszewski i in., 2005, 2010, 2015; Walczak i in., 2017; Kozak i in., 2010, 2013; Wysocka, 2007, 2011; Fijałkowska–Lichwa, 2014, 2016, 2020; Fijałkowska–Lichwa i Przylibski, 2011, 2016, 2020; Tchorz–Trzeciakiewicz i Solecki, 2011; Tchorz–Trzeciakiewicz i Parkitny, 2015). Najczęściej są to pomiary o charakterze naukowym, które nie zawsze obejmują pełny rok kalendarzowy. Tylko nieliczne z nich wykorzystuje się do szerokiej dyskusji obejmującej trzy tematycznie powiązane obszary badawcze, przedstawione w cyklu publikacji.

Źródłem wiedzy na temat charakterystyki zmian sezonowych w obiektach podziemnych w Polsce jest Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie. Pierwsze rezultaty w tym zakresie opublikowano już w 1999 roku, początkowo tylko jako zmienność średniego miesięcznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  (Przylibski i Ciężkowski, 1999), później także w odniesieniu do zmian średniej miesięcznej temperatury powietrza atmosferycznego (Przylibski, 1999).

Na początku obecnego stulecia, tj.: od maja 2008 roku celem pomiarów długookresowych stała się obserwacja zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w krótszych interwałach (doba, godzina). Nowe możliwości w pomiarach dało zastosowanie detektorów półprzewodnikowych sprzężonych z elektroniką zapewniającą automatyczną rejestrację wyników w odstępach 1 godziny (Przylibski i in., 2010). **Moje prace stanowią pierwsze źródło wiedzy o rozpoczętych w tym kierunku badaniach w Polsce.**

Pomiary stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zapewniające obserwację zmian krótkookresowych zapoczątkowałam w kilku obiektach turystycznych Sudetów: Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, Sztolni Fluorytowej w Kletnie, Kopalni Złota w Złotym Stoku oraz sztolniach nr 19 i 19a w



Kowarach. **Wskazałam, że krótkookresowa zmienność stężenia aktywności radonu jest wyraźna w okresach przejściowych w obiektach dobrze izolowanych od atmosfery.** Modelowym przykładem w tym zakresie była dobrze znana w ujęciu zmian sezonowych Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie. Ustaliłam, że głównym narzędziem kontrolującym ruch powietrza między jej wnętrzem a atmosferą jest średnia dobowa temperatura powietrza atmosferycznego. Wahania poziomu stężenia  $^{222}\text{Rn}$  są związane z jej spadkiem lub wzrostem odpowiednio poniżej lub powyżej średniej rocznej temperatury powietrza wewnątrz jaskini (około  $6^{\circ}\text{C}$ ). Proces ten był szczególnie dobrze widoczny wiosną, a w nieco mniej wyraźnej formie także jesienią. W tych porach roku skutek działania konwekcyjnych ruchów powietrza wartości stężenia aktywności radonu podlegały dużym wahaniom. Gdy dochodziło do zatrzymania procesu naturalnej (konwekcyjnej) wymiany powietrza wartości stężenia aktywności radonu były duże i mało zmienne. Taką sytuację obserwowałam w jaskini latem. Natomiast spadek temperatury powietrza atmosferycznego poniżej średniej rocznej temperatury panującej w jaskini uruchamiał naturalną konwekcję, dzięki której radon wraz z prądami powietrza był wynoszony do atmosfery. Takie warunki występowały w jaskini zimą. Dzięki dalszym pracom zidentyfikowałam kilka praktycznych wniosków dotyczących obiektów wyposażonych w system wentylacji mechanicznej. Szczególnie w cieplejszych okresach roku niewłaściwe operowanie systemem wentylacji mechanicznej takie, jak jej wyłączenie w ciągu dnia, tj. od 9:00 do 17:00 wiosną oraz od 8:00 do 17:00 latem sprzyjało występowaniu większych wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiekcie. Modelowym przykładem tego zjawiska jest sztolnia Fluorytowa w Kletnie. Wyrazistszym z uwagi na poziom wartości stężenia  $^{222}\text{Rn}$  (koncentracje największe w kraju (maksimum –  $1072 \text{ kBq/m}^3$ ) są sztolnie nr 19 i 19a w Kowarach. Na ich przykładzie wskazałam, że system wentylacji mechanicznej pracujący przez około 10 godzin w ciągu dnia nie jest w stanie obniżyć wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  do poziomu bezpiecznego i zalecanego przez międzynarodowe organizacje (IAEA, 2014; ICRP, 2011, 2014, 2017). Uzyskałam wyniki, potwierdzające, że wraz z wyłączeniem systemu następuje gwałtowny wzrost stężenia aktywności radonu do wartości utrzymujących się praktycznie na niezmiennym, bardzo wysokim poziomie, wynoszącym średnio kilka (Kletno) i kilkadziesiąt (Kowary)  $\text{kBq/m}^3$ . Moje badania pozwoliły także doprecyzować rozpoznany już w charakterystyce zmian sezonowych, proces konwekcji w sztolniach należących do kompleksu Kopalnia Złota w Złotym Stoku. Nagromadzenie i wzrost stężenia aktywności radonu następuje w ich wnętrzu w ciągu dnia. Stan ten utrzymuje się do dziesięciu godzin wiosną i latem oraz siedmiu zimą tylko w jednej sztolni - Czarnej tego obiektu. W sztolni Gertruda w każdej z czterech pór roku kalendarzowego można spodziewać się wysokich koncentracji promieniotwórczego radonu, a co za tym idzie całorocznie występujących utrudnień w wymianie powietrza z otoczeniem. Uzyskane rezultaty badań stały się dla mnie motorem napędowym do dalszych prac, w tym poszukiwaniu metod i rozwiązań o istotnym znaczeniu w optymalizacji warunków wentylacji, jak i czasu pracy pod ziemią.

Szczegółowe pomiary stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w celu oceny ryzyka zagrożenia zdrowia pracowników i zwiedzających podziemne obiekty turystyczne w Polsce aż do 2019 roku były rzadkością. Wynikało to głównie z braku odpowiednich przepisów prawa, a co za tym idzie braku konieczności wykonywania takich pomiarów. Nie określano również średniego rocznego poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , mimo znanych i zalecanych wytycznych w tym zakresie. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej proponowała, aby wartością dopuszczalną było stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wynoszące średnio od  $300 \text{ Bq/m}^3$  do  $600 \text{ Bq/m}^3$  w ciągu roku (ICRP, 2011, 2014, 2017). Natomiast Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej sugerowała, aby średnie roczne stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  nie przekraczało  $1000 \text{ Bq/m}^3$  (IAEA, 2014). Nie prowadzono również kontroli istniejącego zagrożenia. Jedyne dostępne źródłem wiedzy dozymetrycznej były średnie kwartalne wartości stężenia aktywności radonu i dawki promieniowania. Były one uzyskiwane z komercyjnych pomiarów prowadzonych w środowisku pracy przez Instytut Medycyny Pracy w Łodzi (Olszewski i in., 2005, 2015, Olszewski, 2019).

Sytuacja zmieniła się po nowelizacji przepisów ochrony radiologicznej w Polsce wynikającej z wdrożenia do wytycznych krajowych zapisów dyrektywy Rady 2013/59 Euratom (EU Council Directive, 2013). Nowe przepisy wprowadziły dopuszczalną w ciągu roku średnią wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  na poziomie  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Zobowiązały również kierowników jednostek do kontroli średniorocznego poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w miejscach pracy (art. 23c ust. 1 Ustawy, Dz.U. 2021.1941). Dodatkowo Główny Inspektor Sanitarny: GIS wydał rekomendacje dla specyfikacji prowadzenia pomiarów, stosowanych metod pomiaru i przyrządów pomiarowych wraz z listą laboratoriów specjalizujących się w pomiarach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w miejscach pracy (Opracowanie GIS, 2021). Koordynacją jego działań zajął się Zespół do spraw krajowego planu działania w przypadku narażenia na radon (Obwieszczenie, 2021, poz. 169).

Wraz z wejściem w życie nowych przepisów w Polsce kontroli zaczęły podlegać wszystkie miejsca pracy, w tym także podziemne obiekty nie będące zakładami górniczymi. W wyniku przekroczenia rekomendowanej przepisami polskiego prawa (art. 23b Ustawy) średniorocznej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  równej  $300 \text{ Bq/m}^3$ , pracodawca (kierownik jednostki) musi wprowadzić szereg działań zaradczych takich jak: ograniczenie narażenia pracowników, udzielenie im pisemnej informacji o zwiększonej ekspozycji na radon, przedstawić wyniki prowadzonych pomiarów radiologicznych (art. 23c ust. 2 i art. 23c ust. 3 Ustawy).

Cykl prac jasno pokazuje, że prowadzenie pomiarów w miejscu pracy zgodnie z przepisami prawa wciąż jest zadaniem skomplikowanym logistycznie, a jednocześnie kosztownym i długotrwałym. W Polsce do ustalenia średniego rocznego poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zobowiązanych jest co najmniej 200 podziemnych tras turystycznych, i blisko 1000 miejsc pracy pod ziemią. Ta skala pokazuje jak dużym wyzwaniem jest przeprowadzenie pomiarów z odpowiednią dokładnością, niezbędną do otrzymania wysokiej jakości wyników. A co za tym idzie jak trudna jest ocena i kontrola miejsc, które do tej pory nie były objęte żadnymi pomiarami radiologicznymi w środowisku pracy. Konsekwencje takich zaniechań będą widoczne jeszcze przez długi czas. W pierwszej kolejności zmierzają z nimi laboratoria, których liczba w skali kraju jest niewielka, a akredytacje i rekomendacje do wykonywania pomiarów radonu posiada zaledwie 5 z nich (Obwieszczenie, 2021, poz. 169; pkt. 4).

Mając na uwadze, że problem braku pomiarów nie zniknie wraz z wprowadzeniem przepisów **wskazałam, kilka praktycznych i łatwych rozwiązań dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego i komfortu pracy w środowisku obiektów podziemnych.** W mojej opinii cykl prac jest przydatnym źródłem wiedzy głównie dla kierowników obiektów podziemnych, na których spoczywają regulowane przepisami prawa obowiązki. Najważniejszym z nich jest zapewnienie bezpiecznych warunków pracy. **Usprawnienia w tym zakresie dostosowałam do konkretnego obiektu pod względem genezy, sposobu wentylacji, stopnia izolacji od atmosfery, poziomu stężenia aktywności radonu, charakterystyki jego zmienności oraz harmonogramu pracy. Jako pierwsza w kraju wykonałam bazę współczynników korekcyjnych (przeliczeniowych) będącą w mojej opinii pomocnym narzędziem wyboru optymalnego okresu w ciągu roku, w którym to wykonanie pierwszych, nawet krótkich pomiarów daje możliwość otrzymania wiarygodnych wyników do oszacowania średniego rocznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiekcie podziemnym. Jak również daje możliwość wyznaczenia średniorocznego poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w oparciu o wyniki pomiarów prowadzone w ciągu każdego miesiąca czy też kwartału roku kalendarzowego. Uważam, że jest to narzędzie optymalnie dostosowane do przepisów ochrony radiologicznej. Wartości współczynników korekcyjnych (przeliczeniowych) charakteryzuje wysoka dokładność przypadająca w okresach wzmożonej aktywności stężenia  $^{222}\text{Rn}$ .**

Poza szeroką dyskusją i praktycznymi rozwiązaniami w aspekcie oceny i kontroli ryzyka narażenia z uwagi na zwiększony poziom stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiektach podziemnych w cyklu prac **przedstawiłam również zupełnie nowe i pierwsze wnioski. Dotyczą one wykorzystania radonu jako znacznika efektywności wymiany powietrza obiektu podziemnego z atmosferą, na przykładzie sztolni w Krobicy. Zagadnienie to doskonale**

wpisuje się w cykl tematyczny publikacji. **Określa warunki właściwego przewietrzania wyrobisk w okresach o utrudnionej wymianie powietrza, jakie występują we wszystkich dobrze izolowanych obiektach podziemnych w Polsce.** Wykorzystanie radonu w aspekcie oceny naturalnej wentylacji (przewietrzania) obiektu podziemnego, w którym cyrkulacja powietrza odbywa się w całym systemie wyrobisk, a o intensywności wentylacji (krotności wymiany powietrza w obiekcie) decydują czynniki atmosferyczne jest zagadnieniem nowym w badaniach w kraju, lecz powszechnie dyskutowanym zagranicą. **Wobec czego szerokie rozpoznanie kolejnego z rozwiązań (metod oceny) dla zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu pracy w obiektach podziemnych, jak i dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego osób zwiedzających podziemne obiekty turystyczne jest moim zdaniem aspektem kluczowym i wysoce użytecznym.**

### Metodyka badawcza

Pomiary przeprowadziłam w kilku obiektach podziemnych Dolnego Śląska. Były to: Sztolnia Fluorytowa w Kletnie, sztolnie nr 19 i 19a w Kowarach, nowo odkryte partie Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, podziemia zamku Książ (partie turystyczne – trasa i nieturystyczne stanowiące podziemne laboratorium geodynamiczne), sztolnie w Krobicy oraz korytarz techniczny zapory wodnej w Dobromierzu. Najkrótsze pomiary przeprowadziłam w korytarzu technicznym i sztolniach w Kowarach. W pierwszym obiekcie były to niemal 3 kwartały, w drugim pół roku. **W pozostałych obiektach pomiary w trybie ciągłym trwały od co najmniej jednego roku do niemal ośmiu lat (podziemne laboratorium geodynamiczne w Książu).** Wybierając obiekty do badań zwróciłam uwagę na:

- sposób wentylacji – naturalna (konwekcyjna) i wymuszona prowadzona okresowo, z uwagi na mało wydajną naturalną wymianę powietrza z atmosferą
- pochodzenie (obiekt antropogeniczny, obiekt naturalny, obiekt hydrotechniczny)
- litologię podłoża skalnego – masyw skalny w obrębie skał zawierających  $^{226}\text{Ra}$  w ilości od 32 do 77 Bq/kg
- stopień izolacji obiektu od atmosfery (spękany górotwór, wyrobisko w obudowie górniczej)
- lokalizację w obszarze podatnym na występowanie największych w Polsce koncentracji radonu (Sudety należące do krystalicznego masywu czeskiego w południowo-zachodniej części Polski, na granicy z Republiką Czeską)
- sposób zwiedzania podziemnych tras wyłącznie z przewodnikiem w godzinach otwarcia obiektu zazwyczaj między 9:00 a 18:00, a w okresie wakacyjnym do 20:00
- dostępność obiektu hydrotechnicznego i podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu tylko w godzinach zgodnych z harmonogramem czasu pracy: od poniedziałku do piątku 7:00–15:00
- nowo odkryte partie Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie dostępne wyłącznie dla grotolarów
- możliwość ciągłego nadzorowania sprzętu pomiarowego (poza godzinami pracy obiekty były zamknięte)
- możliwość zachowania niezmienności warunków panujących w przestrzeni obiektu, wynikających głównie ze zmian w organizacji pracy, przez co konieczne byłoby przenoszenie stanowisk pomiarowych, długotrwałe otwieranie obiektów powodujące niekontrolowaną zmianę warunków wentylacji, wyłączanie zasilania oraz wykonywanie innych działań mogących mieć wpływ na wynik pomiaru
- możliwość umieszczenia detektorów, na wysokości około 1,5 metra nad posadzką (spągami) i w odległości około 20 cm od ściany w sposób bezpieczny, nie wpływający na prace osób zatrudnionych lub postronnych przebywających w obiekcie
- dobór miejsca pomiaru tak, aby otrzymany wynik pomiaru był reprezentatywny dla całej przestrzeni obiektu
- sposób ustawienia stanowiska pomiarowego, zapewniający swobodny i niezakłócony przepływ powietrza wokół detektorów ustawionych na wysokości strefy oddychania pracowników i zwiedzających.

**W pomiarach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu w podziemnych obiektach turystycznych wykorzystałam 8 detektorów półprzewodnikowych znanych jako sondy radonowe SRDN-3 i SRDN-3a oraz 1 detektor AlphaE (AlphaE S/N AE001330) z oferty niemieckiej firmy Bertin stosowany w pomiarach od 2021 roku. Wybrałam przyrządy dedykowane do pomiarów długookresowych, zarówno sprawdzone, jak i nowe. Mają one zastosowanie w praktycznie każdych warunkach (brak zasilania z sieci energetycznej, duża wilgotność, niskie temperatury) jakie najczęściej panują w obiektach podziemnych. Sondę SRDN-3 zasilają 2 baterie litowe typu LSH-20, 13Ah, zapewniając bezpieczeństwo pomiaru stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  przez co najmniej 12 miesięcy. AlphaE podłączony do sieci elektrycznej pozwalał na prowadzenie ciągłych pomiarów przez 6 miesięcy, natomiast po odłączeniu zasilania zewnętrznego i pracy na akumulatorze do 30 dni.**

Pomiar z wykorzystaniem sond i detektora odbywał się praktycznie bezobsługowo. Wyniki zapisywane były w pamięci mikrokomputera sondy i detektora w trybie ciągłym co godzinę. Do miejsca i charakteru prowadzonych pomiarów dostosowana została także konstrukcja mierników. Zapewniała ona odporność na korozję, zapylenie, uszkodzenia mechaniczne związane z transportem do miejsca pomiarów, jak i iskrobezpieczność w związku z możliwością występowania gazów wybuchowych w warunkach pomiarów.

Sondy radonowe przeszły kalibrację w komorze radonowej Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie w stężeniach równych odpowiednio:  $720\pm 50\text{ Bq/m}^3$ ,  $4160\pm 160\text{ Bq/m}^3$ ,  $8980\pm 310\text{ Bq/m}^3$ ,  $20320\pm 620\text{ Bq/m}^3$  oraz  $55240\pm 1300\text{ Bq/m}^3$  (Przylibski i in., 2010). Dla wskazanych wartości stężenia niepewność pomiaru detektorów wyniosła odpowiednio: 15,5, 9,0, 6,8, 5,5 oraz 5,1%. Dla mniejszych wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w zakresie od  $\leq 100$  do  $\leq 500\text{ Bq/m}^3$  niepewność pomiaru dochodziła nawet do 20% (Przylibski i in., 2010).

**AlphaE było urządzeniem nowym, po raz pierwszy zastosowanym w pomiarach, w tym pomiarach porównawczych w Polsce.** Urządzenie działa na podobnej zasadzie jak sondy radonowe SRDN-3. Radon dostaje się do wnętrza komory przez otwory wlotowe. Promieniowanie alfa emitowane podczas rozpadu  $^{222}\text{Rn}$  jest rejestrowane przez detektor półprzewodnikowy z diodą krzemową jako impulsy napięcia, które po wzmacnieniu zostają zliczone i przeliczone na wymagane jednostki, zgodnie z przeprowadzoną kalibracją. W przypadku AlphaE podgląd podstawowych ustawień w menu jest możliwy przez przywołanie funkcji na wyświetlaczu urządzenia, a ich zmianę wraz z odczytem danych umożliwia podłączenie do komputera w panelu komunikacyjnym oprogramowania Trace/AlphaE. Natomiast dostęp do wyników zgromadzonych w pamięci sondy radonowej jest możliwy po jej podłączeniu do przenośnego programatora PSR-2.

Detektor AlphaE zakupiłam z certyfikatem fabrycznej kalibracji przeprowadzonej w laboratorium wzorcującym producenta z zastosowaniem gazoszczelnej komory oraz z urządzeniem referencyjnym AlphaGUARD S/N EF 1851. Jako potwierdzenie poprawności jego działania otrzymałam certyfikat o numerze 6.13-98-4068479 zgodnie z którym niepewność pomiarowa została określona na  $\pm 10\%$ , a dokładność zapisu pojedynczego wyniku jest równa  $0,1\text{ Bq/m}^3$ . Urządzenie jest dostosowane do pomiaru w zakresie  $20\text{ Bq/m}^3 - 10\text{ MBq/m}^3$ , przy czym dla wykrywalności na poziomie  $\text{LLD} < 100\text{ Bq/m}^3$  wymagany czas pomiaru to 12 godzin (Instrukcja, 2020).

**W każdym z obiektów ustawiłam od jednego do sześciu stanowisk pomiarowych.** Największą sieć pomiarową (6 stanowisk) założyłam w podziemiach zamku Książ. Pięć z nich uruchomiłam w nieturystycznej części obiektu – podziemnym laboratorium geodynamicznym, natomiast jedno stanowisko w części turystycznej. W nowo odkrytych partiach jaskini, w Sztolni Fluorytowej w Kletnie, Kopalni Złota w Złotym Stoku oraz sztolniach nr 19 i 19a umieściłam po 2 stanowiska pomiarowe. W sztolni w Krobicy oraz w korytarzu technicznym zapory wodnej w Dobromierzu uruchomiłam jedno stanowisko pomiarowe. **Każde ze stanowisk wyposażylam w jeden detektor półprzewodnikowy – sondę radonową SRDN-3 lub SRDN-3a. Dodatkowo w korytarzu technicznym w Dobromierzu na stanowisku pomiarowym umieściłam jednocześnie: sondę radonową SRDN-3a, detektor AlphaE oraz**

### 3 detektory śladowe CR-39. Do pomiarów w tym obiekcie wykorzystałam również jako urządzenie referencyjne monitor radonu AlphaGUARD.

W metodyce wyznaczania dawki efektywnej od promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu skorzystałam z wytycznych UNSCEAR (2000). Wartość współczynnika równowagi promieniotwórczej pomiędzy  $^{222}\text{Rn}$ , a produktami jego rozpadu ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$ ) przyjąłam na poziomie  $F = 0,4$ . Dawkę od promieniowania jonizującego dla radonu i jego pochodnych wyznaczyłam według równania dla wnętrza budynków, gdyż warunki te są podobne, jak dla wyrobisk podziemnych (UNSCEAR, 2000):

$$E_i = C_{Rn-222} \cdot F \cdot E_{iCF} \quad (1)$$

gdzie:

$E_i$  – dawka efektywna na skutek wchłonięcia  $^{222}\text{Rn}$  i jego pochodnych drogą inhalacyjną, [mSv],

$C_{Rn-222}$  – stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ],

$F$  – współczynnik równowagi promieniotwórczej, [-],

$E_{iCF}$  – współczynnik konwersji na dawkę, przyjąłam za UNSCEAR (2000) wartość 0,000009 [ $\text{mSv}/\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ].

Aby uwzględnić dawkę od radonu, który rozpuszcza się we krwi wykorzystałam równanie (2):

$$E_b = C_{Rn-222} \cdot E_{bCF} \quad (2)$$

gdzie:

$E_b$  – dawka efektywna na skutek wchłonięcia  $^{222}\text{Rn}$  i jego rozpuszczenia się we krwi, [mSv],

$C_{Rn-222}$  – stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ],

$E_{bCF}$  – współczynnik konwersji na dawkę, przyjąłam za UNSCEAR (2000) wartość 0,00000017 [ $\text{mSv}/\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ].

Ostateczną wartość dawki efektywnej od promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu dla osób z ogółu ludności obliczyłam jako sumę wartości dawek uzyskanych z równań 1 i 2:

$$E = E_i + E_b \quad (3)$$

Wszystkie wartości dawki efektywnej ( $E$ ), obliczone z równań 1 – 3 odniosłam do określonego czasu pracy (czasu efektywnie przepracowanego), jak i czasu trwania wizyty turystycznej w Sztolni Fluorytowej w Kletnie, Kopalni Złota w Złotym Stoku, sztolniach nr 19 i 19a w Kowarach, nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie oraz podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu. Uzyskane wyniki porównałam z limitami ustalonymi w Rozporządzeniu Rady Ministrów (2005) dla roku kalendarzowego. W przypadku pracowników porównałam również z wartościami obowiązującymi dla kategorii A i B narażenia (Ustawa, Dz.U. 2021.1941).

Dane pomiarowe analizowałam wykorzystując metody statystyczne dostępne w programie Statistica StatSoft. W przygotowaniu pracy współautorskiej pod tytułem: *Monthly and quarterly correction factors for determining the mean annual radon concentration in the atmosphere of underground workplaces in Poland* opublikowanej w Environmental Geochemistry and Health w 2022 roku skorzystałam z dwóch metod analizy danych: składowych głównych (PCA) i skupień (CA). Zaproponowałam metody nowe, nie stosowane w szerokiej analizie współczynników korekcyjnych. Analizę PCA przeprowadziłam na danych wystandaryzowanych wyznaczając nowe nieskorelowane (prostopadłe) składowe główne wyjaśniające coraz to mniejszy procent zmienności zbioru danych. Pozwoliło mi to na opisanie zbioru danych mniejszą w stosunku do wejściowego liczbą rekordów. Nowej składowej przypisałam interpretację merytoryczną, dzięki czemu stworzyłam model zależności oparty na prostopadłych zmiennych w przeciwieństwie do silnie skorelowanych zmiennych objaśniających. Wartości składowych głównych zinterpretowałam w oparciu o wyniki analiz i klasyfikację. Wykorzystując analizę skupień (ang. *cluster analysis*) dokonałam segmentacji

obiektów na grupy o podobnych cechach. Jako sposób przyporządkowywania każdego obiektu do jednej grupy (skupienia) wykorzystywałam metodę aglomeracyjną bazującą na tzw. hierarchii drzewkowej elementów analizowanego zbioru (dendrogramu). Procedura segmentacji pozwoliła mi na połączenie każdego obiektu bez wyodrębniania poszczególnych stanowisk pomiarowych w podzbiory dla grup obiektów najbardziej do siebie podobnych. Jako podstawę oceny podobieństw poszczególnych skupień wybrałam wartości współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  i  $k_{3m}$ . Podobieństwa cech porządkowanych obiektów podałam w skali ilościowej (wielkość współczynnika korekcyjnego  $k_{1m}$  i  $k_{3m}$ ) wykorzystując metodę Warda, jako zasadę wiązania (algorytm łączenia). Określiłam w ten sposób warunki, kiedy oddzielne skupienia są dostatecznie podobne, przez co możliwe do połączenia. W metodzie Warda wykorzystywałam analizę wariancji, minimalizując sumę kwadratów odchyleń wewnątrz skupień. W efekcie otrzymałam wynikową segmentację z uporządkowanym zestawieniem podziałów na segmenty.

Wykorzystane do wyznaczenia współczynników korekcyjnych wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  cechowały się dużą rozpiętością położenia (asymetrią). Wobec tego, aby poprawnie wyznaczyć wartości współczynników do obliczania średniej rocznej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  z uwzględnieniem dwóch czasów ekspozycji (miesiąc oraz kwartał) jako miarę reprezentatywną wybrałam średnią geometryczną. Średnią roczną wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  ( $C_{Rn}$ ) w przypadku pomiarów prowadzonych przez okres jednego miesiąca (1), oraz trzech miesięcy - kwartału (2) wyznaczyłam korzystając z następujących zależności:

$$C_{Rn} = k_{1m} \cdot C_{1mRn} \quad (1)$$

gdzie  $C_{Rn}$  to średnie roczne stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wyrażone w  $\text{Bq/m}^3$ ,  
 $k_{1m}$  to współczynnik korekcyjny dla miesiąca ekspozycji detektora,

$C_{1mRn}$  to średnia miesięczna wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wyrażona w  $\text{Bq/m}^3$  oraz:

$$C_{Rn} = k_{3m} \cdot C_{3mRn} \quad (2)$$

gdzie  $k_{3m}$  to współczynnik korekcyjny dla 3-miesięcznej (kwartalnej) ekspozycji detektora,  
 $C_{3mRn}$  to średnia wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w ciągu kwartału (trzech miesięcy) wyrażona w  $\text{Bq/m}^3$ .

W obu przypadkach dla wyznaczenia wartości współczynnika korekcyjnego zastosowałam zależność (3):

$$k_m = \frac{GM_y}{GM} \quad (3)$$

gdzie  $GM_y$  jest roczną średnią geometryczną wartością stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , wyrażoną w  $\text{Bq/m}^3$ ,

$GM$  jest średnią geometryczną stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , odpowiednio dla miesiąca ( $GM_m$ ) i kwartału ( $GM_{3m}$ ) wyrażoną także w  $\text{Bq/m}^3$ .

Współczynniki korekcyjne  $k_m$ , obliczyłam oddzielnie dla miesiąca ( $k_{1m}$ ) oraz okresu 3-miesięcznego ( $k_{3m}$ ).

Korzystając z powyższych równań współczynniki korekcyjne wyznaczyłam oddzielnie dla każdego obiektu badań. Na podstawie danych zebranych podczas 25 miesięcy obserwacji w sztolni obliczyłam 50 współczynników korekcyjnych dla miesiąca ( $k_{1m}$ ) oraz 18 dla kwartału ( $k_{3m}$ ). Na podstawie 19 miesięcy pomiarów w kopalni oszacowałam 38 współczynników korekcyjnych miesięcznych ( $k_{1m}$ ) oraz 14 kwartalnych ( $k_{3m}$ ). Dla jaskini łącznie, na podstawie 37 miesięcy obserwacji na poziomie turystycznym oraz 33 miesięcy na niższym poziomie dostępnym tylko dla grotolazów uzyskałam odpowiednio: 110 i 88 współczynników korekcyjnych miesięcznych ( $k_{1m}$ ) oraz 42 i 35 współczynników korekcyjnych kwartalnych ( $k_{3m}$ ). Najdłuższy okres obserwacji w podziemnym laboratorium geofizycznym (60 miesięcy) pozwolił mi na wyznaczenie odpowiednio dużej liczby współczynników korekcyjnych: 300 w skali miesiąca ( $k_{1m}$ ) oraz 100 dla kwartału ( $k_{3m}$ ).

W przygotowaniu pracy współautorskiej pod tytułem: *Intercomparison of equipment measuring radon activity concentration in the air—an example from a hydrotechnical structure in Dobromierz (SW Poland)* opublikowanej w Journal of Radioanalytical and

Nuclear Chemistry w 2023 roku szeroko przedstawiłam weryfikację poprawności wykonanych pomiarów z wykorzystaniem detektorów radonu. Sprawdziłam założenia hipotezy parametrycznej ( $H_0$ ) o normalności rozkładu danych dla wyników próby losowej (kolejnych średnich z różnych okresów ekspozycji). W przypadku stwierdzenia podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  weryfikowałam hipotezę alternatywną  $H_1$  świadcząca o prawostronnie asymetrycznym ( $A_s > 0$ ) rozkładzie danych względem wartości oczekiwanej (średniej) z ekspozycji. W obu przypadkach, decyzję o odrzuceniu hipotezy  $H_0$  podejmowałam na podstawie wielkości poziomu prawdopodobieństwa  $p$  względem poziomu istotności  $\alpha = 0.05$ . Wskazałam akceptowalną wartość błędu w analizie (5 błędów na 100 wyników pomiaru), tym samym nie zwiększając poziomu wiarygodności hipotezy alternatywnej  $H_1$ . Decyzje weryfikacyjne oparłam na dwóch założeniach. Dla  $p < \alpha$  odrzucałam hipotezę  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ . W przypadku  $p > \alpha$  nie miałam podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$ . Podstawą weryfikacji hipotezy  $H_0$  był dla mnie wynik testu Shapiro-Wilka. Dla hipotezy  $H_0$  wskazałam wartości zmiennej losowej znajdujące się w tzw. obszarze krytycznym (dwustronnym w zakresie  $\pm 3$  odchylenia standardowe od średniej: SD). Dla hipotezy alternatywnej  $H_1$  obszar krytyczny opisałam jako:  $+3SD$  w stosunku do wartości średniej. Po weryfikacji hipotez sprawdziłam licznosc danych odstających występujących w obszarach krytycznych rozkładu symetrycznego (normalnego) i asymetrycznego. Weryfikacji w tym zakresie dokonałam z wykorzystaniem tabel licznosci i kart kontrolnych Shewharta. Analizę uzupełniłam charakterystyką zmienności stężenia aktywności radonu w cyklu godzinowym względem wartości rejestrowanych przez urządzenie referencyjne. Weryfikację zgodności wyników uzyskanych dla detektorów radonu przeprowadziłam w oparciu o wytyczne testu z-score zalecanego przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA, 2007). Dla zastosowanego testu z-score wartość wskaźnika  $z$  jako kryterium oceny wyników pomiarów każdego detektora obliczyłam zgodnie ze wzorem (1):

$$z = \frac{x_i - x_{ref}}{U_{ref}} \quad (1)$$

gdzie:

$x_i$  – średni wynik z pojedynczego detektora; [ $Bq/m^3$ ]

$x_{ref}$  – średnia wartość referencyjna stężenia aktywności promieniotwórczej  $^{222}Rn$  zarejestrowana przez AlphaGUARD; [ $Bq/m^3$ ]

$U_{ref}$  – niepewność rozszerzona wartości referencyjnej stężenia aktywności promieniotwórczej  $^{222}Rn$  dla AlphaGUARD (współczynnik rozszerzenia  $k = 2$  odpowiadający poziomowi ufności 0.05 $\alpha$ ); [ $Bq/m^3$ ]

Na podstawie wyznaczonej wartości bezwzględnej wskaźnika  $z$  określiłam akceptowalność wyniku w jednym z trzech stopni: zadowolający ( $|z| \leq 2$ ), wątpliwy ( $2 < |z| < 3$ ) lub niezadowolający ( $|z| \geq 3$ ). Uzyskane wyniki wartości wskaźnika  $z$  przedstawiłam za pomocą znaków: „+” wynik zadowolający, „±” wynik wątpliwy, ale do przyjęcia oraz „-” jako niezadowolającą ocenę wyniku pomiaru. Porównanie z wykorzystaniem testu z-score wykonałam również dla ekspozycji detektorów półprzewodnikowych w cyklu dobowym. Pozostawiłam niezmiennie kryteria oceny, w której zgodnie ze wzorem (1) wartość średnią  $x_i$ , wartość referencyjną  $x_{ref}$  oraz niepewność rozszerzoną  $U_{ref}$  odniosłam do średniej wartości w danej godzinie pomiaru odpowiednio dla: pojedynczego detektora, urządzenia referencyjnego AlphaGUARD oraz jego niepewności rozszerzonej ( $k = 2$ ). Sprawdziłam również dokładności pomiaru urządzeń względem siebie wykorzystując dane z równania (1) i jako  $A$  wskazując wartość wyrażenia (2):

$$|x_i - x_{ref}| \quad (2)$$

gdzie:

$x_i$  – średni wynik z pojedynczego detektora; [ $Bq/m^3$ ]

$x_{ref}$  – średnia wartość referencyjna stężenia aktywności promieniotwórczej  $^{222}Rn$  zarejestrowana przez detektor referencyjny AlphaGUARD; [ $Bq/m^3$ ]

$U_{ref}$  – niepewność rozszerzona wartości referencyjnej stężenia aktywności promieniotwórczej  $^{222}\text{Rn}$  dla AlphaGUARD (współczynnik rozszerzenia  $k = 2$  odpowiadający poziomowi ufności 0.05 $\alpha$ );

$U_{eq}$  – niepewność rozszerzona wartości referencyjnej stężenia aktywności promieniotwórczej  $^{222}\text{Rn}$  dla detektora (współczynnik rozszerzenia  $k = 2$  odpowiadający poziomowi ufności 0.05 $\alpha$ ); [ $\text{Bq/m}^3$ ]

oraz za B wartość wyrażenia (3):

$$2.58 \cdot \sqrt{U_{ref}^2 + U_{eq}^2} \quad (3)$$

Nie prowadziłam walidacji metody pasywnej, ponieważ została ona opisana w procedurze badawczej laboratorium wzorcującego i potwierdzona uzyskanym przez nie certyfikatem akredytacji (dla Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej nr AB 450).

Do badań znacznikowych, które szeroko przedyskutowałam w publikacji współautorskiej: *Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) as a tracer in natural ventilation efficiency assessment in underground workings – an example of „St John Mine” tourist complex in Krobica (the Sudetes, SW Poland)* z 2023 roku wykorzystałam dwa zbiory danych: archiwalne i kontrolne. Za archiwalne traktowałam wyniki pomiarów chwilowych prowadzonych wrywkowo (kilkukrotnie) w dwóch okresach: od 12.11.2010 do 15.03.2012 oraz od 18.07.2012 do 22.09.2015. W zbiorze kontrolnym zgromadziłam wyniki pomiarów długookresowych, które w trybie ciągłym prowadziłam od 01.07.2020 do 30.06.2022. Całą bazę danych przegrupowałam z uwzględnieniem okresów dostępności obiektu: rok 2010 – wyrobiska ślepe, rok 2011 – wyrobiska częściowo drożne, rok 2012 – wyrobiska dostępne w całości, lata 2015-2022 wyrobiska udostępnione turystom. Pomiary kontrolne pochodzące z niepublikowanych raportów Politechniki Wrocławskiej (Przylibski i in., 2012, 2015) wykorzystałam do weryfikacji efektów działań prewencyjnych jak otamowanie ślepego wyrobiska prowadzącego w kierunku przodka - miejsca eksploatacji rudy cyny (kasyterytu  $\text{SnO}_2$ ) oraz oceny zawartości gazów w atmosferze obiektu. Zbiór danych kontrolnych rozszerzyłam o wyniki pomiarów meteorologicznych z 2020 i 2021 roku znajdujących się w ogólnodostępnej bazie danych atmosferycznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB). Wyniki zarejestrowane przez najbliższą Krobicy stację meteorologiczną o numerze 250150090 znajdującą się w Świeradowie-Zdroju pobrałam z repozytorium IMGW- PIB, zgodnie z regulaminem udostępniania danych ([www.danepubliczne.imgw.pl/docs/regulamin\\_udostepniania\\_danych.pdf](http://www.danepubliczne.imgw.pl/docs/regulamin_udostepniania_danych.pdf); 2021). W zestawieniu uwzględniłam temperaturę powietrza (kod: B00300S), średnią prędkość wiatru (kod: B00702A), kierunek wiatru (kod: B00202A), które zgodnie z wynikami prac Rośka i współautorów (2012) wpływają (mogą ułatwiać lub utrudniać) na proces wymiany powietrza. Dla dalszych analiz przetworzyłam dane zapisane w repozytorium IMGW-PIB w czasie uniwersalnym (GMT) z 10-minutową rozdzielczością czasową i dokładnością pomiaru równą dokładności urządzeń pomiarowych, bez uwzględniania czasu lokalnego oraz zmian czasu letni/zimowy ([www.danepubliczne.imgw.pl/data/dane\\_pomiarowo\\_obserwacyjne/](http://www.danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/); 2021).

W opracowaniu i prezentacji wyników danych korzystałam także z podstawowych narzędzi statystycznych jak: statystyka opisowa, wykresy rozrzutu, histogramy, wykresy ramkowe i skategoryzowane. Do oceny zależności istniejących pomiędzy stężeniem aktywności  $^{222}\text{Rn}$  a parametrami atmosferycznymi zastosowałam analizę korelacji, w tym wyznaczone wartości współczynników korelacji liniowej  $r$  oraz rangowej Spearmana  $r_s$ . Na podstawie korelacji liniowej Pearsona opisałam poziom zależności pomiędzy zmiennymi, mało odpornej na wyniki skrajnych obserwacji, a dla korelacji rangowej określiłam zależność niezmienniczą (monotoniczność zależności) pomijając wpływ obserwacji odstających.

## Rezultaty badań

W rozdziale przedstawiłam rezultaty dla trzech powiązanych tematycznie obszarów badań wraz z ich szeroką dyskusją. Opis merytoryczny rezultatów badań uzupełniłam odwołaniem do publikacji naukowych cyklu. Rezultaty moich badań są następujące.

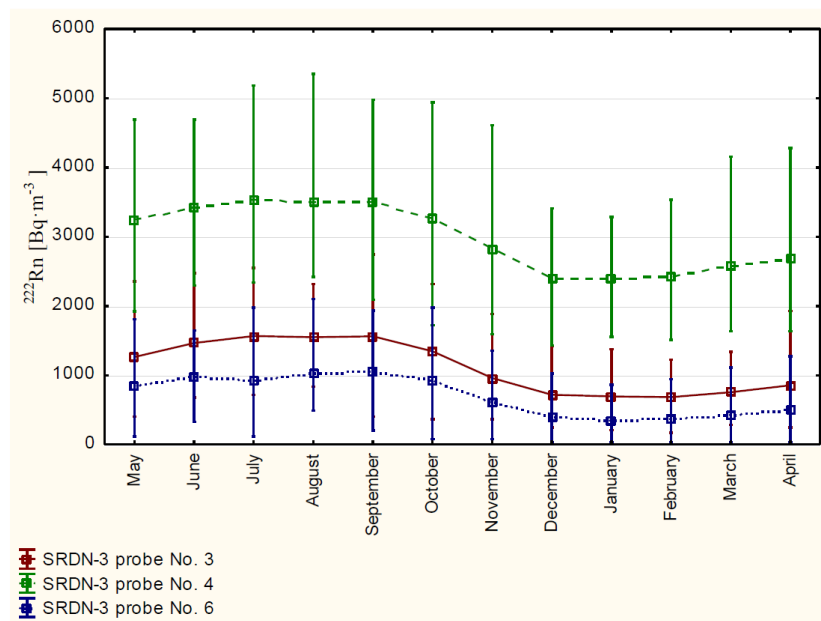


W zakresie **charakterystyki zmian sezonowych** wskazałam, że zjawisko zmienności sezonowej należy traktować jako zasadniczy proces wpływający na poziom stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . W chłodnym okresie roku, tj. od jesieni do wiosny dzięki temu, że wewnątrz obiektu powietrze ma większą temperaturę niż powietrze atmosferyczne radon jest wynoszony do atmosfery wraz z cieplejszym powietrzem. Natomiast w okresie cieplejszym roku, tj. od wiosny do jesieni powietrze w obiekcie jako chłodniejsze od atmosferycznego, akumuluje się w obiekcie wraz z zawartym w nim radonem. Charakterystykę takich zmian przedstawiałam dla kilku nowych obiektów podziemnych, m.in.: dla podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu, nowo odkrytych partii Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, jak również dla podziemnej trasy turystycznej pod dziedzińcem zamku Książ. Wskazaną charakterystykę sezonowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  dla obiektów o naturalnej wentylacji przedstawiłam w trzech publikacjach cyklu. Były to artykuły zatytułowane: *First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland)* z roku 2016 (poz. 5, Tab. 1), *A comprehensive characteristic of  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of bear cave in Kletno, Poland* z roku 2020 (poz. 6, Tab. 1) oraz *Assessment of occupational exposure from radon in the newly formed underground tourist route under Książ castle, Poland* z roku 2021 (poz. 7, Tab. 1). W podziemnej trasie turystycznej w Książu przeprowadziłam pomiary kompleksowe, obejmujące kolejne etapy tworzenia obiektu użyteczności publicznej. Wobec czego ich wyniki przedstawiłam w drugim obszarze badawczym cyklu.

Pierwszym z obiektów na przykładzie którego omówiłam zjawisko sezonowej zmienności stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  było podziemne laboratorium geodynamiczne Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Książu. Był to również obiekt, który po raz pierwszy w Polsce został objęty takimi badaniami. Jako reprezentatywne do omówienia wyników analiz dla tego obiektu uznałam dane pochodzące z trzech stanowisk pomiarowych zlokalizowanych odpowiednio: najbliżej (SRDN-3 No. 6) i najdalej (SRDN-3 No. 3) od wejścia do obiektu oraz w strefie uskoku (SRDN-3 No. 4). Ich zakres przedyskutowałam w czwartym rozdziale artykułu pod tytułem: *First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland)* z 2016 roku (pozycja nr 5, Tab. 1). Wykazałam, że największe stężenia aktywności radonu występują w ciepłych miesiącach roku: od maja do października, natomiast mniejsze są widoczne od listopada do kwietnia (Rys. 1). Największe wartości stężenia aktywności radonu zarejestrowałam w strefie uskoku (SRDN-3 No. 4). Od lipca do września były one równe  $3500 \text{ Bq/m}^3$ . W czerwcu oraz w październiku zmniejszyły się do  $3200 \text{ Bq/m}^3$ . W strefie uskoku najmniejsze stężenia aktywności radonu na poziomie wynoszącym odpowiednio  $2700 \text{ Bq/m}^3$  oraz  $2400 \text{ Bq/m}^3$  notowałam od listopada do kwietnia. Podobną sytuację zaobserwowałam na dwóch pozostałych stanowiskach pomiarowych. W ich przypadku jednak stężenia aktywności radonu znacznie różniły się wartościami. Na stanowisku nr 3 (SRDN-3 No. 3) zlokalizowanym najdalej od wejścia do obiektu podziemnego największe wartości stężenia aktywności radonu nie przekroczyły  $2000 \text{ Bq/m}^3$  (Rys. 1). Najmniejsze notowane od listopada do kwietnia nie osiągnęły  $1000 \text{ Bq/m}^3$  (Rys. 1). Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rosły wraz ze wzrostem odległości od wejścia do obiektu. Na stanowisku pomiarowym położonym najbliżej obserwowane wartości stężenia aktywności radonu były odpowiednio mniejsze zarówno w cieplejszym, jak i chłodniejszym okresie roku w porównaniu do tych, jakie zanotowałam w dwóch pozostałych punktach pomiarowych. Największe stężenia aktywności radonu rejestrowałam od maja do października na poziomie wynoszącym odpowiednio  $800 \text{ Bq/m}^3$  do około  $1000 \text{ Bq/m}^3 - 1100 \text{ Bq/m}^3$  (Rys. 1).

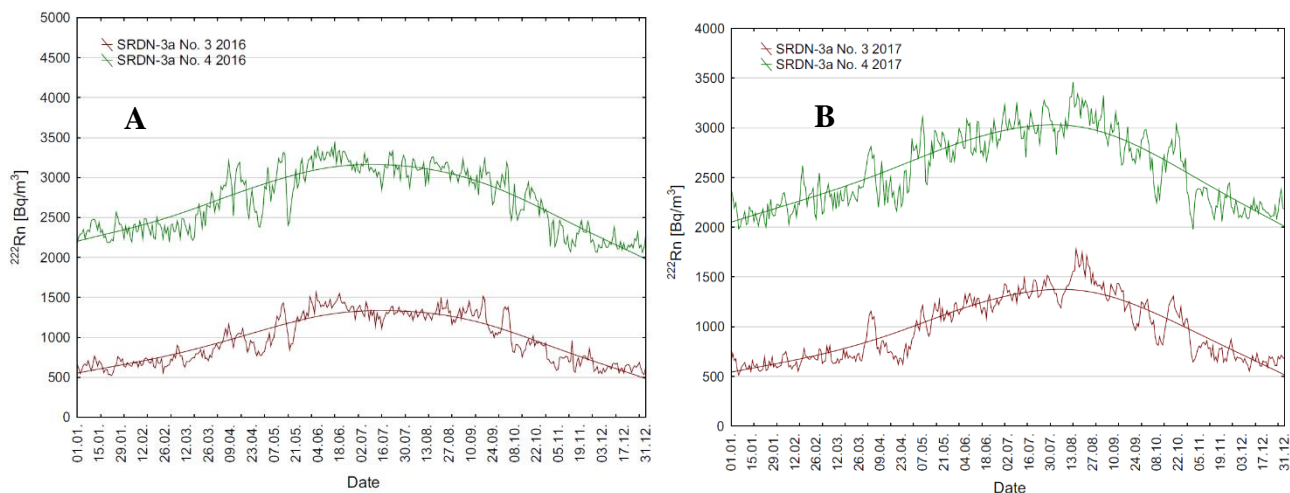
Najmniejsze stężenia aktywności, obserwowałam od listopada do kwietnia, a ich wartości nie przekroczyły  $500 \text{ Bq/m}^3$  (Rys. 1). Różnice pomiędzy maksymalnymi notowanymi w cieplejszym, a minimalnymi widocznymi w chłodniejszym okresie roku wartościami stężenia aktywności radonu w zależności od stanowiska pomiarowego wynosiły od ponad 30% do nawet

60%. Wpływ na rejestrowane wartości stężenia aktywności radonu miała głównie naturalna wentylacja obiektu.



Rys. 1. Przebieg sezonowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w okresie od 17.05.2014 do 16.05.2015 w trzech reprezentatywnych punktach podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Wykres pochodzi z publikacji nr 5 (Tab. 1).

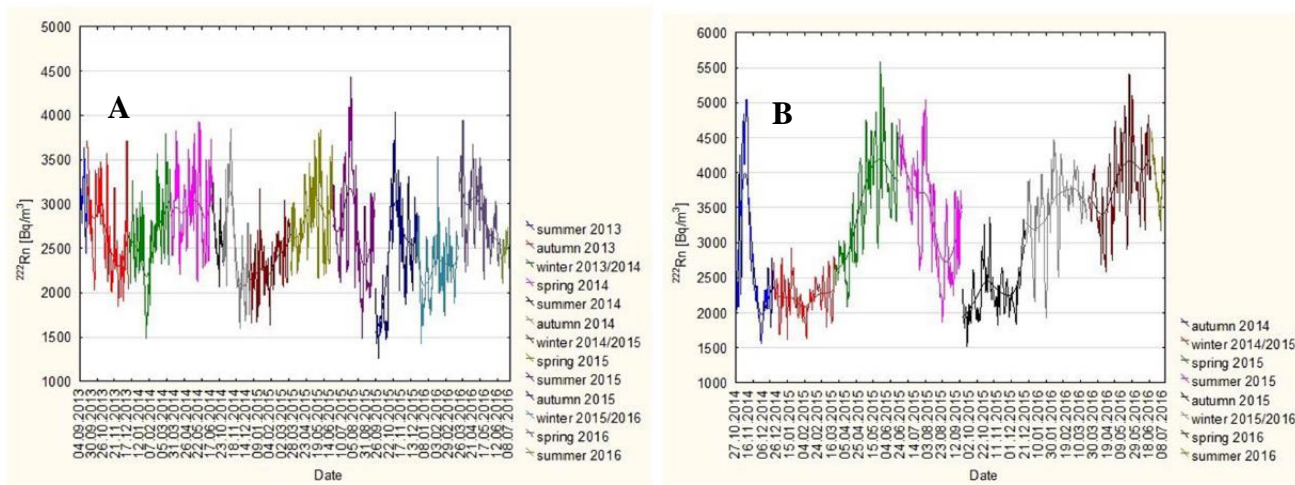
Charakterystykę zmienności sezonowej zidentyfikowanej w podziemnym laboratorium w Książu **uzupełniłam dyskusją wpływu izolacji górotworu żelbetową obudową górniczą na przebieg i wielkość zmian.** Zakres i osiągnięte rezultaty badań przedstawiłam w artykule pod tytułem: *The assessment of lining structure impact on radon behaviour inside selected underground workings under the cour d'honneur of Książ castle* opublikowanym w Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry w 2020 roku (poz. 4, Tab. 1). W ciągu dwóch lat obserwacji (2016–2017) w wyrobisku w obudowie żelbetowej (SRDN–3a No. 3) notowane wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były wyraźnie mniejsze niż w spękany, nieizolowanym górotworze (SRDN–3a No. 4). Większe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  odnotowałam późną wiosną oraz latem, tj. od końca kwietnia do początku października (Rys. 2A, B). Mniejsze stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wystąpiły w chłodniejszym okresie roku, tj. od listopada do marca – początku kwietnia (Rys. 2A, B). Maksima wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowałam w cieplejszym okresie roku na stanowisku pomiarowym w obudowanym wyrobisku. Notowane wartości mieściły się w zakresie  $1800\text{ Bq/m}^3$  –  $2400\text{ Bq/m}^3$  w 2016 roku (Rys. 2A), natomiast w 2017 roku sięgały od  $1900\text{ Bq/m}^3$  do nieco ponad  $2400\text{ Bq/m}^3$  (Rys. 2B). Porównywalne wartości notowałam w przeciągu dwóch lat obserwacji. Na stanowisku ustawionym w wyrobisku bez obudowy górniczej zarejestrowałam wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wyraźnie większe (por. Rys. 2A, B). W 2016 i 2017 roku maksima notowałam od późnej wiosny do wczesnej jesieni. Sięgały one odpowiednio od ponad  $4200\text{ Bq/m}^3$  do nieco ponad  $4700\text{ Bq/m}^3$ .



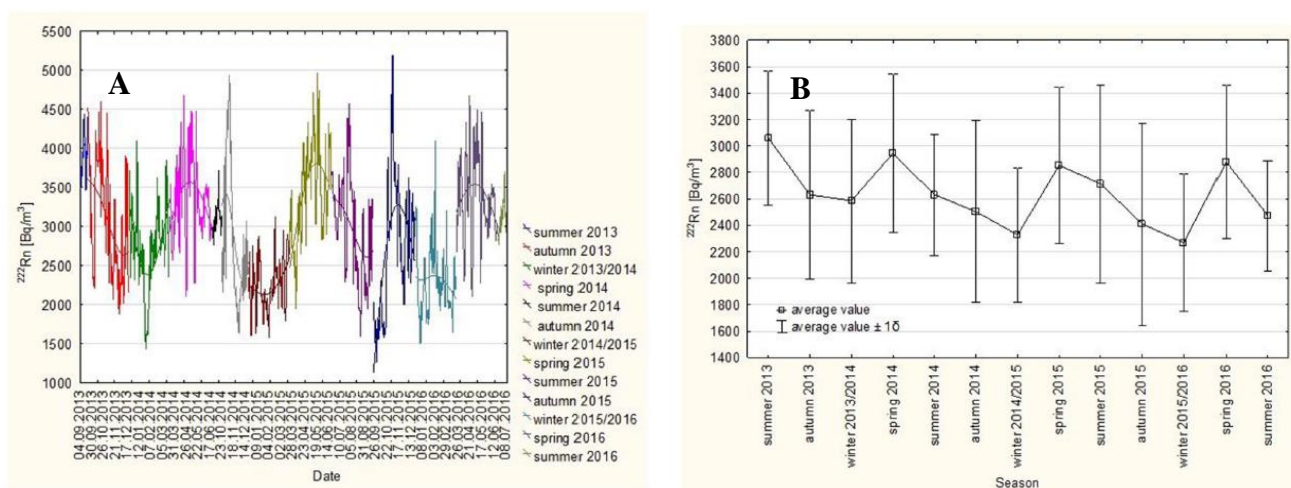
Rys. 2. Przebieg zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowany od 1 stycznia do 31 grudnia 2016 roku (A) oraz od 1 stycznia do 31 grudnia 2017 roku (B) w dwóch punktach pomiarowych w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu. Objaśnienia: linia prosta – średnia wartość stężenia radonu z dopasowaniem średnią ruchomą, a – nadana przez producenta w oznaczeniu roku produkcji urządzenia, oznaczenia SRDN–3 i SRDN–3a używane są równolegle. Wykresy pochodzą z publikacji nr 4 (Tab. 1).

Na stanowisku (SRDN–3a No. 4) zarówno w chłodniejszym, jak i cieplejszym okresie roku wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były ponad dwukrotnie większe niż na stanowisku w wyrobisku z obudową górniczą – SRDN–3a No. 3 (Rys. 2). Jednak warunki wymiany powietrza z otoczeniem były porównywalnie zmienne w obu punktach pomiarowych w cyklu sezonowym. Konwekcyjny przepływ powietrza odbywał się powoli i był wyraźnie ograniczony (nawet hamowany) od początku wiosny do początku jesieni (Rys. 2). Wskazałam, że żelbetowa obudowa górnicza izolująca spękany i nasiąkliwy górotwór stanowiła barierę ograniczającą wielkość strumienia radonu wydostającego się z górotworu do wnętrza wyrobiska, przez co wpływała na mechanizm przepływu radonu z górotworu (zmniejszona porowatość ośrodka skalnego) do wnętrza obiektu. Nie powodowała jednak utrudnień w procesie konwekcji pojawiających się na początku wiosny i jesieni.

Charakter typowych sezonowych zmian stężenia aktywności radonu **po raz pierwszy w Polsce** opisałam również w nowych i nieznanych do kwietnia 2012 roku partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Udało się to dzięki prowadzonym od września 2013 roku, do połowy lipca 2016 roku pomiarom (ciągłym) długookresowym. Uzyskane rezultaty przedstawiłam w pracy współautorskiej pod tytułem: *A comprehensive characteristic of  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of Bear Cave in Kletno, Poland* opublikowanej w Radiation Protection Dosimetry w 2020 roku (poz. 6, Tab.1). W nowo odkrytych partiach jaskini zmiany stężenia aktywności radonu pokrywały się ze zmianami pór roku. Większe wartości stężenia aktywności radonu występowały w cieplejszych okresach roku, mniejsze na przełomie lata, jesieni aż do zimy. Największe wartości stężenia aktywności radonu w całym okresie obserwacji wystąpiły na przełomie kwietnia i maja aż do początku października. Znacznie mniejsze odnotowywałam od listopada do marca (Rys. 3A, B, 4A). Średnio stężenia aktywności radonu w cieplejszych miesiącach roku zmieniały się: od 2870 Bq/m<sup>3</sup> do 3300 Bq/m<sup>3</sup> w kwietniu, od ponad 2950 Bq/m<sup>3</sup> do 4150 Bq/m<sup>3</sup> w maju, od 2700 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 4000 Bq/m<sup>3</sup> w czerwcu, od ponad 2700 Bq/m<sup>3</sup> do 3700 Bq/m<sup>3</sup> w lipcu, od około 2500 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 3000 Bq/m<sup>3</sup> w sierpniu, od ponad 2600 Bq/m<sup>3</sup> do 3000 Bq/m<sup>3</sup> we wrześniu, od 2300 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 2900 Bq/m<sup>3</sup> w październiku, od 2600 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 3000 Bq/m<sup>3</sup> w listopadzie, od 2300 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 2600 Bq/m<sup>3</sup> w grudniu oraz od ponad 2200 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 2700 Bq/m<sup>3</sup> w styczniu, od 2400 Bq/m<sup>3</sup> do ponad 2900 Bq/m<sup>3</sup> w lutym i od ponad 2700 Bq/m<sup>3</sup> do 3000 Bq/m<sup>3</sup> w marcu (Rys. 4A, B).

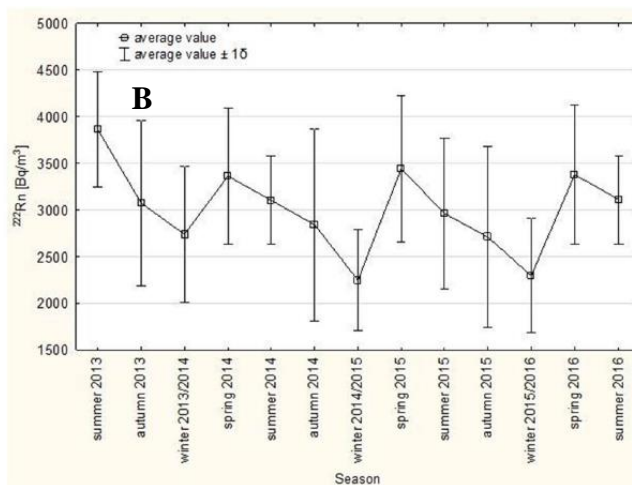
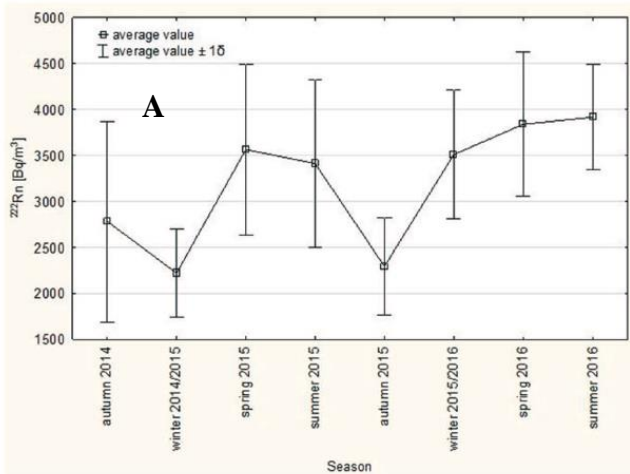


Rys. 3. Przebieg zmian stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w wyróżnionych porach roku, z dopasowaniem średniej ruchomej wartości stężenia w okresie od 04.09.2013 do 10.07.2016 w pierwszym (A) i drugim (B) punkcie pomiarowym w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Wykresy pochodzą z publikacji nr 6 (Tab. 1).



Rys. 4. Przebieg zmian stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w wyróżnionych porach roku, z dopasowaniem średniej ruchomej wartości stężenia na trzecim stanowisku pomiarowym (A) oraz zmiany koncentracji radonu rejestrowane w poszczególnych porach roku w pierwszym punkcie pomiaru (B) w okresie od 04.09.2013 do 10.07.2016 w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Wykresy pochodzą z publikacji nr 6 (Tab. 1).

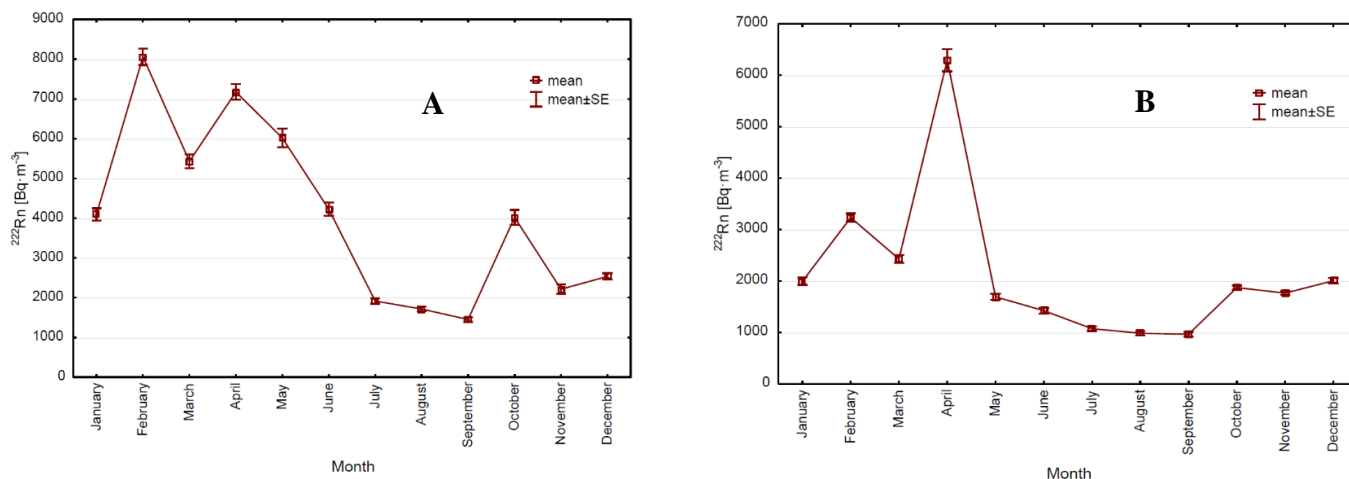
Pokazałam, że zakres notowanych średnich wartości stężenia aktywności radonu w każdej z czterech pór roku na wszystkich trzech stanowiskach pomiarowych w jaskini (Rys. 4B, 5A, B) był prawie 10-krotnie większy od wartości granicznej  $300 \text{ Bq/m}^3$  zalecanej przez Komisję Europejską i zatwierdzonej w przepisach prawnych wszystkich państw Unii Europejskiej. Potwierdziłam, że najbardziej niekorzystne warunki z punktu widzenia ochrony radiologicznej występowały praktycznie przez cały rok kalendarzowy, szczególnie w okresie od wiosny do lata. Można założyć, że okres ten będzie dodatkowo pokrywał się z najintensywniejszym ruchem turystycznym w Jaskini.



Rys. 5. Zmiany koncentracji radonu rejestrowane w czterech porach roku w drugim (A) i trzecim (B) punkcie pomiaru w okresie od 04.09.2013 do 10.07.2016 w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Wykresy pochodzą z publikacji nr 6 (Tab. 1).

Wskazałam, że na proces zmian sezonowych nakładają się mniej lub bardziej regularne dobowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zależne od procesów konwekcyjnej naturalnej wymiany powietrza pomiędzy wnętrzem obiektu a atmosferą. Szczególnym przypadkiem są obiekty wyposażone w system wentylacji mechanicznej, jak sztolnia w Kletnie i sztolnie w Kowarach. Charakterystykę zmian sezonowych w obiektach wyposażonych w system mechanicznej wentylacji przedstawiłam na przykładzie Sztolni Fluorytowej w Kletnie. Szczególnemu zagadnieniu poświęciłam rozdział 3.1. artykułu: *Short-term radon activity concentration changes along the underground educational tourist route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts, SW Poland)* opublikowanego w Journal of Environmental Radioactivity w 2014 roku (pozycja nr 1, Tab. 1). Zaobserwowałam, że duże i zmienne wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występowały w Sztolni Fluorytowej od lutego do lipca (Rys. 6). Od sierpnia do października wartości stężenia radonu były natomiast małe i mało zmienne. Od końca października do stycznia koncentracje radonu były również małe, ale za to zmienne w czasie. Taki rozkład jest moim zdaniem potwierdzeniem, że zmiany sezonowe stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w sztolni w Kletnie przebiegają inaczej, niż w obiektach bez systemu wentylacji mechanicznej (Rys.6). Większe wartości mogą występować zarówno w chłodniejszym (Rys. 6A, B), jak i cieplejszym (Rys. 6A, B) okresie roku. Za taką sytuację odpowiada złe operowanie systemem wentylacji mechanicznej. Skala zjawiska uwidacznia się w krótkich okresach odzwierciedlających okresy uruchamiania i wyłączania wentylacji mechanicznej. W skali dobowej uruchomienie lub zatrzymanie wymiany powietrza związane jest z obniżeniem się lub ze wzrostem temperatury powietrza atmosferycznego odpowiednio poniżej lub powyżej średniej wartości temperatury panującej we wnętrzu obiektu. Włączany okresowo, działający zbyt krótko lub też poza godzinami zwiedzania (w nocy) system wentylacji stawał się nieefektywny.

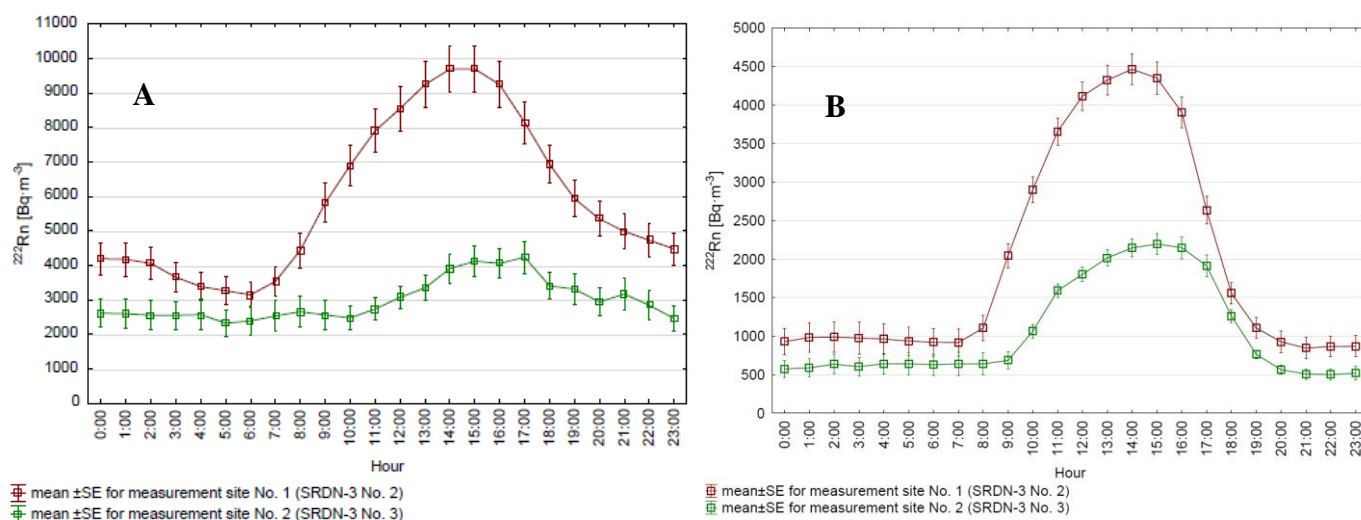
W rezultacie największe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występują w obiekcie w czasie, gdy przebywają w nim turyści, przewodnicy oraz inni pracownicy obsługi ruchu turystycznego. Jest to szczególnie istotne w cieplejszych okresach roku, gdy proces naturalnej wymiany powietrza działa mało wydajnie, a notowane stężenia są największe. W ciągu dnia w okresie zimowym, stężenia są mniejsze, a konwekcyjne ruchy powietrza są w stanie wynosić do atmosfery znaczną ilość radonu. Taka sytuacja wystąpiła tylko w Sztolni Fluorytowej w Kletnie. W drugim z obiektów wyposażonych w system mechanicznej wentylacji – sztolniach w Kowarach sytuacja wyglądała gorzej. **Wentylacja naturalna, nawet w okresach zimowych była zbyt mało wydajna, a notowane wartości stężenia bez względu na okres roku były zbyt wysokie (średnio ponad 800 kBq/m<sup>3</sup>).** Wskazanym spostrzeżeniom poświęciłam artykuł: *Short-term radon activity concentration changes along the underground educational tourist*



Rys. 6. Zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowane podczas rocznych pomiarów monitoringowych w punkcie pomiarowym 1 (A) i 2 (B) w Sztolni Fluorytowej w Kletnie. Symbole: mean – średnia arytmetyczna, SE – błąd standardowy. Wykresy pochodzą z publikacji nr 1 (Tab. 1).

Zaobserwowałam, że mechanizm **zmian krótkookresowych w obiektach wyposażonych w system mechanicznej wentylacji** jest analogiczny, jak zmian sezonowych, przy czym zmiany dobowe występują w okresie wiosennym i jesiennym, gdy średnia dobowa temperatura powietrza atmosferycznego jest porównywalna do temperatury panującej we wnętrzu obiektu podziemnego. W przypadku wszystkich zbadanych obiektów zmiany dobowe stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w dużym stopniu pokrywały się ze zmianami intensywności ruchu turystycznego w trzech charakterystycznych okresach: rozpoczęcie sezonu – zima/wiosna (luty – kwiecień), szczyt ruchu turystycznego – lato (maj – sierpień), zakończenie sezonu – jesień/zima (październik – styczeń) – zamknięcie obiektu. Taki rozkład zmian zakłócała działająca niezależnie od procesu naturalnej konwekcyjnej wymiany powietrza wentylacja mechaniczna. Dyskusję tego zagadnienia przedstawiłam w rozdziale 3.2. artykułu: *Short-term radon activity concentration changes along the underground educational tourist route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts, SW Poland)* opublikowanym w Journal of Environmental Radioactivity w 2014 roku (poz. 1, Tab. 1). W Sztolni Fluorytowej większe wartości były charakterystyczne dla okresu reprezentującego pełnię sezonu turystycznego (Rys. 7). Małe wartości stężenia występowały w tym czasie w godzinach wieczornych i nocnych, tj. od około 18:00 lub 22:00–23:00 do 8:00 rano (Rys. 7A, B). Szybki wzrost stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  trwał od godziny 9:00 aż do 17:00. Po tym czasie zaznaczał się ponownie jego szybki spadek. Taki przebieg zmian dobowych był wynikiem działania dwóch procesów wymiany powietrza: wymuszonego okresami włączania i wyłączenia wentylacji mechanicznej oraz naturalnej zależnej od zmian temperatury powietrza atmosferycznego. Uruchamiana od godzin popołudniowych do rana, tj. od 17:00 do 9:00 rano wentylacja mechaniczna powodowała początkowo spadek, a następnie (od 19:00 lub 22:00–23:00) utrzymanie mniejszych wartości stężenia aktywności radonu wewnątrz sztolni (Rys. 7A, B). Po jej wyłączeniu około godziny 9:00 rano następował ponownie szybki wzrost stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , który trwał praktycznie aż do ponownego jej włączenia o godzinie 17:00. W tym okresie doby wzrastało również stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  (Rys. 7A, B). Jesienią i zimą, w czasie niewielkiego ruchu turystycznego stężenia aktywności radonu w ciągu doby podlegały jedynie nieznacznym zmianom. Jesienią i zimą w ciągu dnia, od godziny 9:00 do 17:00 cieplejsze powietrze w sposób naturalny wpływało na zewnątrz sztolni, wynosząc ze sobą radon do atmosfery (Rys. 8A, B). Powodowało to znaczne obniżenie stężenia aktywności tego gazu wewnątrz sztolni względem

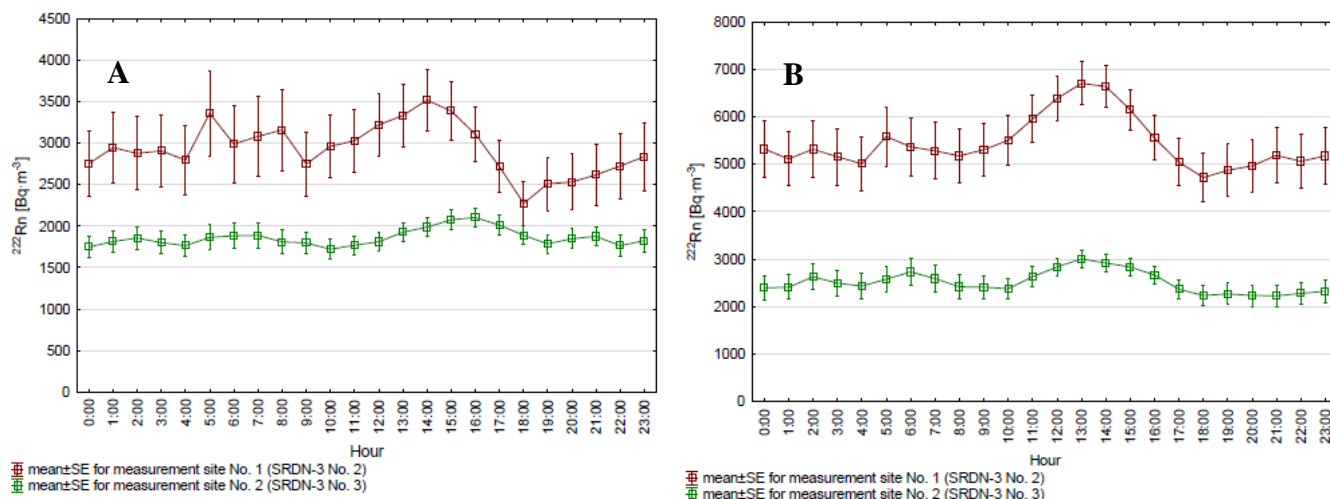
okresu wiosennego, kiedy chłodniejsze od atmosferycznego powietrze z radonem zatrzymywało się wewnątrz sztolni. **Przebieg zmian krótkookresowych stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , występujący w sztolni w Kletnie uwydatnił w mojej opinii potrzebę dostosowywania godzin pracy do okresów wentylacji obiektu. Sztolnię można traktować jak modelowy przykład pracy w warunkach narażenia, mimo istniejących rozwiązań mających im przeciwdziałać.** Praca w jej wnętrzu, oraz zwiedzanie odbywało się w godzinach, gdy stężenie aktywności radonu było największe w ciągu doby. Utrzymywanie się stężenia aktywności na tak dużym poziomie w ciągu dnia wynikało z czynników naturalnych, a przede wszystkim było skutkiem wyłączenia mechanicznej wentylacji, która to przeszkadzała w czasie zwiedzania sztolni przez turystów. W efekcie wewnątrz sztolni następował szybki wzrost i akumulacja stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  (Rys. 7).



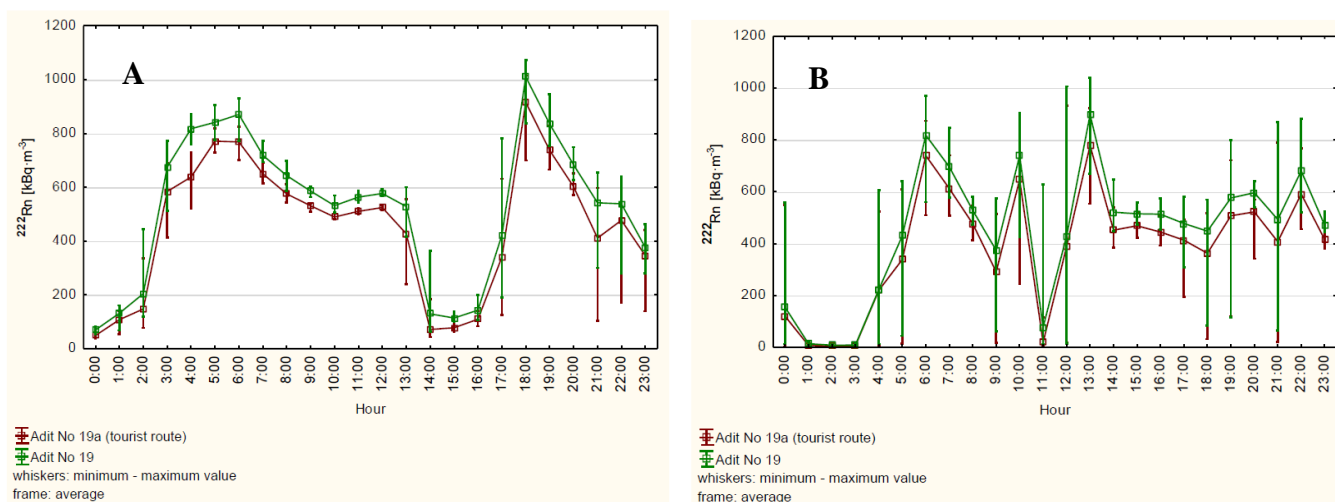
Rys. 7. Godzinowe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane wiosną (A) i latem (B) na dwóch stanowiskach w Sztolni Fluorytowej w Kletnie. Wykresy pochodzą z publikacji nr 1 (Tab. 1).

Kompleksowa obserwacja zjawiska zmienności dobowej pokazała, że w Sztolni Fluorytowej w Kletnie uruchamiana w niewłaściwym czasie wentylacja mechaniczna nie spełniała swojej funkcji. Nie obniżała koncentracji radonu wewnątrz obiektu w tej części doby, kiedy w obiekcie przebywali turyści, a przede wszystkim osoby zatrudnione do ich obsługi oraz personel techniczny.

Krótkookresowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występujące w podziemnym obiekcie turystycznym wyposażonym w system mechanicznej wentylacji opisałam również na przykładzie sztolni nr 19 i 19a w Kowarach. Sztolnie nr 19 i 19a wybrałam ze względu na występowanie w ich wnętrzu **największych udokumentowanych w Polsce koncentracji radonu**. Sztolnia 19a od maja 2011 roku działała pod nazwą „Kowarskie Kopalnie”. Sztolnia nr 19 była zamknięta dla zwiedzających, jednak stanowiła miejsce otwarte dla pracowników i osób z obsługi wykonujących m.in. prace adaptacyjne lub remontowe. Charakterystyce zmian krótkookresowych w sztolniach w Kowarach poświęciłam czwarty rozdział artykułu: *Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned Uranium Mine ‘Podgórze’ in Kowary (Sudety Mts, Poland)* opublikowanego w Journal of Environmental Radioactivity w 2016 roku (poz. 3, Tab. 1).



Rys. 8. Godzinowe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane jesienią (A) i zimą (B) na dwóch stanowiskach w Sztolni Fluorytowej w Kletnie. Wykresy pochodzą z publikacji nr 1 (Tab. 1).



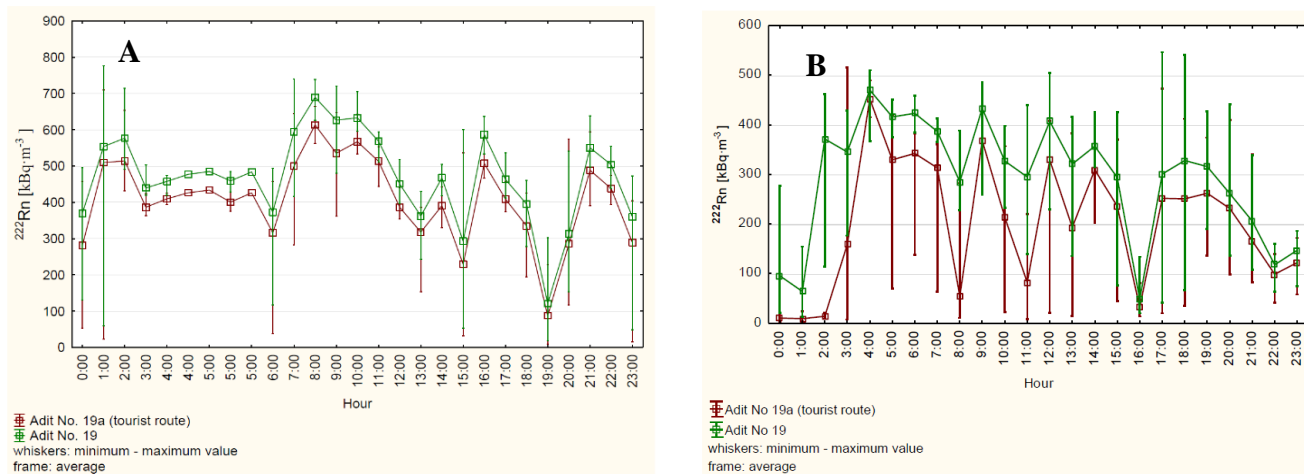
Rys. 9. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane co godzinę w kwietniu (A) i maju (B) 2011 roku w sztolniach nr 19 i 19a nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach. Wykresy pochodzą z publikacji nr 3 (Tab. 1).

Zmiany krótkookresowe omówiłam na przykładzie sześciu miesięcy, trwających od kwietnia do września 2011 roku (Rys. 9). Maksymalne wartości stężenia aktywności radonu w obu sztolniach nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach wynosiły od 800 kBq/m<sup>3</sup> do ponad 1000 kBq/m<sup>3</sup> (ponad miliona Bq/m<sup>3</sup>). Taki zakres wartości obserwowałam w każdej godzinie od kwietnia do końca czerwca 2011 roku (Rys. 9–10A). Wartości nieznacznie mniejsze notowałam od lipca do września 2011 roku (Rys. 10B–11A, B). **Najmniejsze wartości zarejestrowałam w godzinach, kiedy obiekt był zamknięty dla ruchu turystycznego i pracowników (po godzinie 17), natomiast największe w czasie otwarcia obiektu między 9:00 a 17:00** (Rys. 10–11).

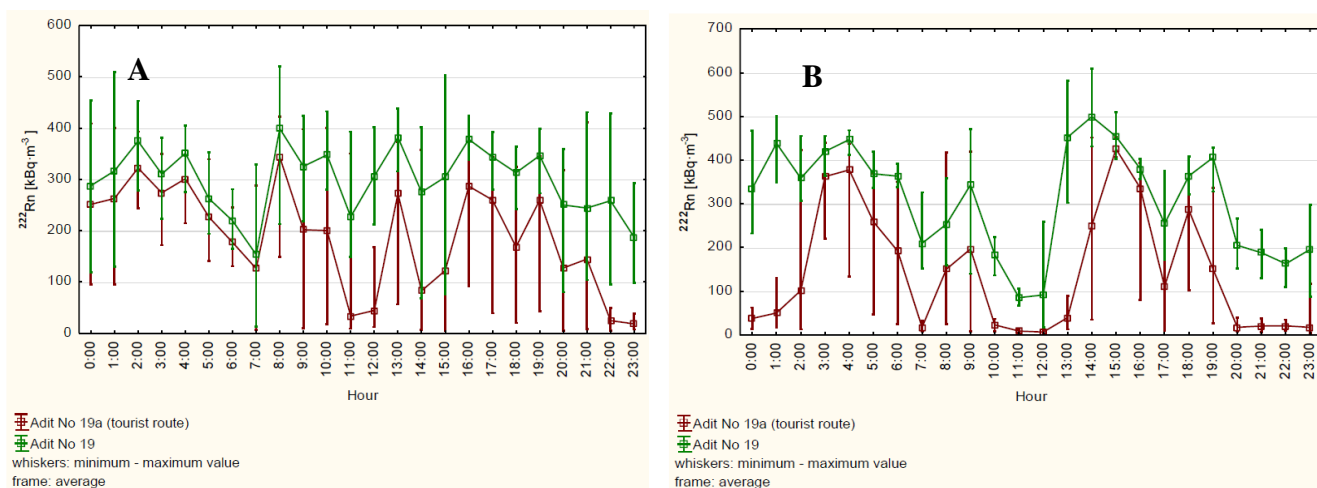
W kwietniu duże stężenia aktywności radonu wynoszące od 600 kBq/m<sup>3</sup> do ponad 800 kBq/m<sup>3</sup> utrzymywały się od godziny 3:00 do 6:00 rano. W godzinach 7:00 – 16:00 następował gwałtowny spadek wartości stężenia aktywności radonu od powyżej 600 kBq/m<sup>3</sup> do poniżej 200 kBq/m<sup>3</sup> (Rys. 9A). Ponowny wzrost wartości do poziomu nawet 1000 kBq/m<sup>3</sup> (**max. 1072 kBq/m<sup>3</sup> – najwyższa zanotowana wartość w Polsce**) trwał do godziny 18:00. Od godziny 19:00 do 23:00 stężenia aktywności radonu ponownie malały do poziomu około 300 kBq/m<sup>3</sup>. Taki rozkład zmian stężenia aktywności radonu był związany z dwoma okresami załączania



nieprzerwanie mechanicznej wentylacji wymuszonej na około 7 godzin pomiędzy 7:00 rano i 14:00 po południu oraz 19:00, a 2:00 w nocy (Rys. 9A).



Rys. 10. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane co godzinę w czerwcu (A) i lipcu (B) 2011 roku w sztolniach nr 19 i 19a nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach. Wykresy pochodzą z publikacji nr 3 (Tab. 1).

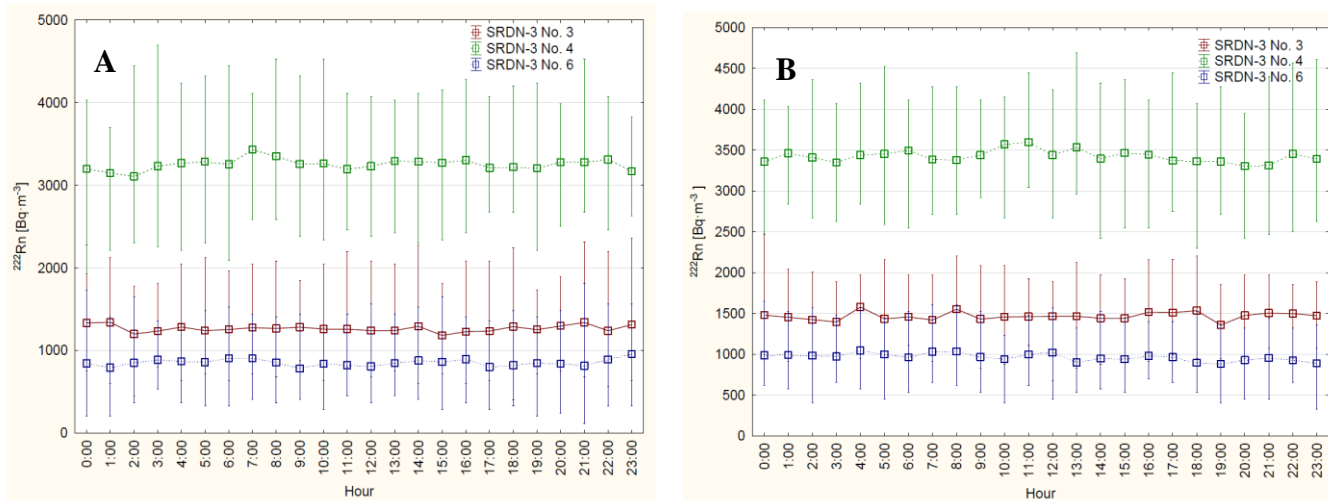


Rys. 11. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane co godzinę w sierpniu (A) i wrześniu (B) 2011 roku w sztolniach nr 19 i 19a nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach. Wykresy pochodzą z publikacji nr 3 (Tab. 1).

W maju 2011 roku stężenia aktywności radonu przekraczające  $450 \text{ kBq/m}^3$  pojawiały się kilkakrotnie w ciągu doby, dwukrotnie przed południem o godzinie 6:00 i 10:00 i jeden raz po południu o godzinie 13:00. Zarejestrowane w tych godzinach wartości stężenia aktywności radonu były zbliżone i wynosiły około  $800 \text{ kBq/m}^3$  (Rys. 9B). Podobną sytuację zaobserwowałam w czerwcu 2011 (Rys. 10A). Przypadki, w których stężenia aktywności radonu wahały się od ponad  $400 \text{ kBq/m}^3$  do ponad  $600 \text{ kBq/m}^3$  były widoczne tuż przed otwarciem obiektu dla zwiedzających i trwały od godziny 8:00 do 10:00 (Rys. 10A). Od lipca (Rys. 10B) do sierpnia 2011 roku (Rys. 11A) w sztolniach nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach przebieg zmian wartości stężenia aktywności radonu w cyklu godzinowym był niemal identyczny. Wartości stężenia aktywności radonu zmieniały się praktycznie co godzinę (rosnąc lub malejąc). Większy zakres zmian wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  był obserwowany w turystycznej sztolni nr 19a. W obu przypadkach wartością wokół której oscylowały rejestrowane stężenia aktywności radonu było  $400 \text{ kBq/m}^3$  (Rys. 10B–11A). We wrześniu 2011 roku (Rys. 11B) zaobserwowałam, że system mechanicznej wentylacji wymuszonej był uruchamiany dwukrotnie, pomiędzy 9:00 a 13:00 po

południu i 19:00 a północą. W tych okresach wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  gwałtownie spadały. Jednak gwałtowny wzrost nastąpił tuż po jej wyłączeniu między godziną 14:00 a 18:00 i 2:00 a 4:00 w nocy (Rys. 11B). Po włączeniu wentylacji wartości stężenia aktywności radonu zaczynały maleć z poziomu 200 kBq/m<sup>3</sup> w sztolni nr 19a oraz 400 kBq/m<sup>3</sup> w sztolni nr 19 do poziomu poniżej 50 kBq/m<sup>3</sup> (Rys. 11B).

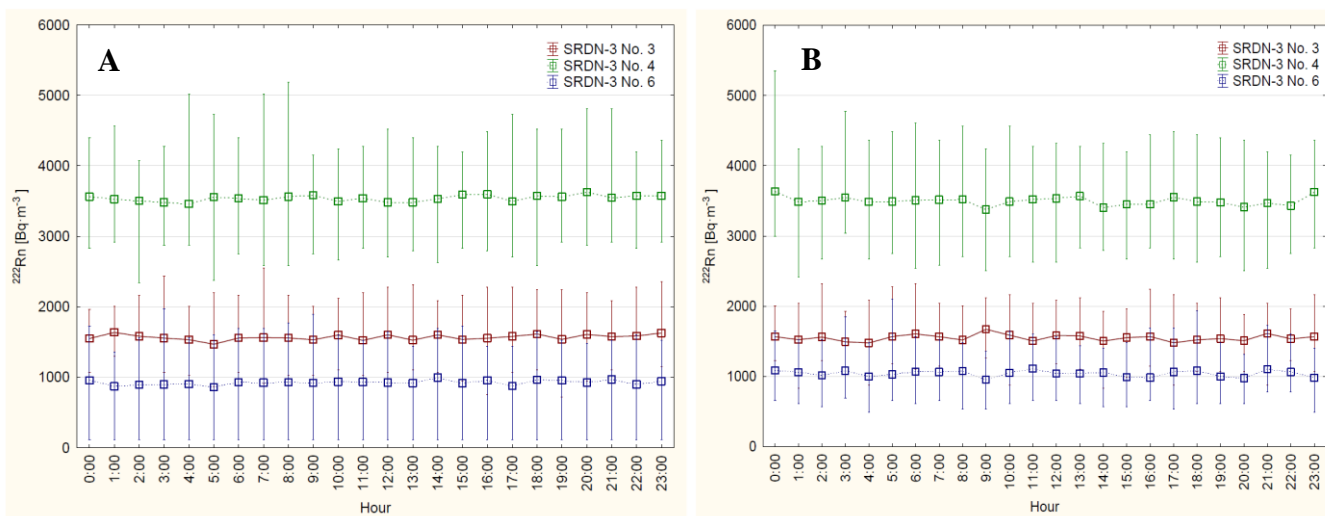
**Krótkookresowe zmiany stężenia aktywności radonu były przedmiotem obserwacji także w obiektach o naturalnej wentylacji.** Przyjrzałam im się na przykładzie podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Uzyskane wyniki zaprezentowałam w czwartym rozdziale artykułu: *First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland)* opublikowanego w Journal of Environmental Radioactivity w 2016 roku (pozycja nr 5, Tab. 1). Wskazałam, że przebieg zmian dobowych w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu jest typowy jak dla obiektów dobrze izolowanych od atmosfery. Zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  miały nieregularny charakter i były niewielkie. W związku z tym trudno było mi wskazać, w których okresach w ciągu doby stężenie aktywności radonu było zdecydowanie większe lub mniejsze. Było to uwarunkowane niewielką przepuszczalnością strefy spękań w górotworze, która tylko w czasie długotrwałych okresów sprzyjających konwekcji umożliwia wymianę powietrza z atmosferą. Stężenia aktywności radonu bez względu na godzinę pomiaru utrzymywały się na niemal stałym poziomie równym wartości średniej w danym miesiącu i miejscu pomiaru (Rys. 12–17). Dobowe zmiany stężenia aktywności radonu były również wyraźnie podporządkowane zmianom sezonowym.



Rys.12. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane w ciągu 24-godzin w maju 2014 i 2015 roku (A) oraz czerwcu 2014 (B) w trzech punktach pomiarowych podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Objasnienia: znaczniki – wartość średnia stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , wąsy – min.-max. wartości stężenia. Wykresy pochodzą z publikacji nr 5 (Tab. 1).

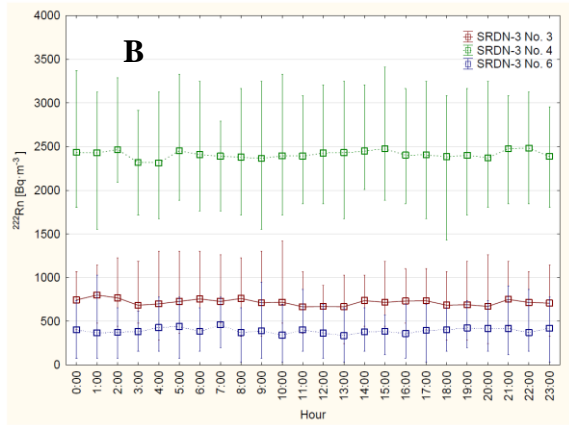
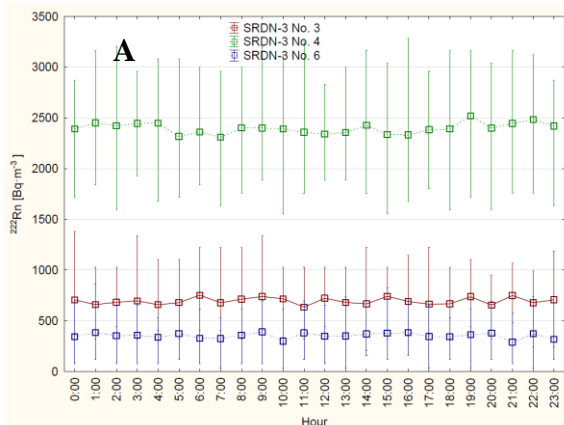
Największe wartości stężenia aktywności radonu notowałam od maja do października, mniejsze od listopada do kwietnia (Rys. 12–17). W maju były one bardzo małe i nieregularnie zmienne, a ich średnia wartość wynosiła około 3200 Bq/m<sup>3</sup> w strefie uskoku, a na pozostałych dwóch stanowiskach pomiaru utrzymywała się w zakresie 1000 Bq/m<sup>3</sup> – 1500 Bq/m<sup>3</sup> (Rys.12A). W czerwcu i lipcu wartości stężenia aktywności radonu były równie niezmiennie w ciągu doby (Rys. 12B–13A). Największe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  odnotowałam na stanowisku zlokalizowanym w strefie uskoku (SRDN–3 No. 4), natomiast najmniejsze na stanowisku znajdującym się najbliżej wejścia (SRDN–3 No. 6) do obiektu (Rys. 12B–13A). Jedynie w strefie uskoku zanotowałam wartości nieznacznie większe niż w innym miejscach obiektu w lipcu i sierpniu (Rys. 13B – 14A). W październiku wartości stężenia aktywności

mały w całym obiekcie. Największe nadal notowałam w strefie uskoku (SRDN-3 No. 4), mniejsze w punktach pomiarowych położonych coraz bliżej wejścia obiektu (Rys. 14B). Jednak bez względu na godzinę pomiaru w każdym z punktów pomiarowych stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  utrzymywały się na średnim poziomie wartości (Rys. 14B). W listopadzie w każdym ze stanowisk pomiarowych wartości stężenia aktywności radonu były mniejsze od tych, jakie zaobserwowałam w październiku (Rys. 15A). Najmniejsze z nich równe  $500 \text{ Bq/m}^3$  zarejestrowałam blisko wejścia (SRDN-3 No. 6). W strefie uskoku zmniejszyły się one do poziomu  $2700 \text{ Bq/m}^3$ , natomiast najbliższej wejścia do obiektu sięgały  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . Kolejny spadek wartości stężenia aktywności radonu był widoczny w grudniu 2014 roku i styczniu 2015 roku (Rys. 15B–16A). W strefie uskoku stężenia aktywności w obu z wspomnianych miesięcy roku oscylowały wokół wartości  $2400 \text{ Bq/m}^3$ . W pozostałych dwóch punktach obiektu były na poziomie:  $700 \text{ Bq/m}^3$  (SRDN-3 No. 3) oraz  $400 \text{ Bq/m}^3$  (SRDN-3 No. 6). W lutym i marcu w 2015 roku wartości stężenia aktywności radonu były równie porównywalne (Rys. 16B–17A). Największe notowano w strefie uskoku, najmniejsze na stanowisku z sondą SRDN-3 No. 6. W lutym (Rys. 16B) stężenia aktywności radonu wyniosły:  $700 \text{ Bq/m}^3$  (SRDN-3 No. 3),  $2500 \text{ Bq/m}^3$  (SRDN-3 No. 4) oraz  $500 \text{ Bq/m}^3$  (SRDN-3 No. 6). W marcu stężenia aktywności radonu były nieznacznie większe (Rys. 17A).

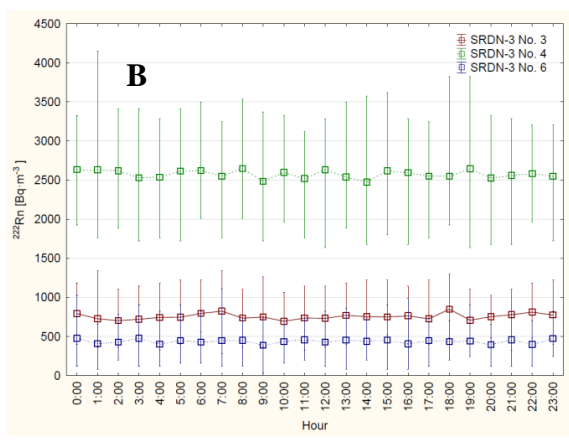
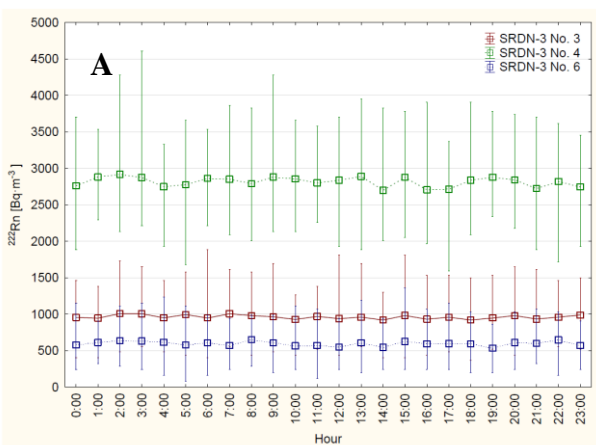


Rys. 13. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane w ciągu 24-godzin w lipcu 2014 (A) oraz sierpniu 2014 (B) w trzech punktach pomiarowych podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Objaśnienia jak dla Rys. 12. Wykresy pochodzą z publikacji nr 5 (Tab. 1).

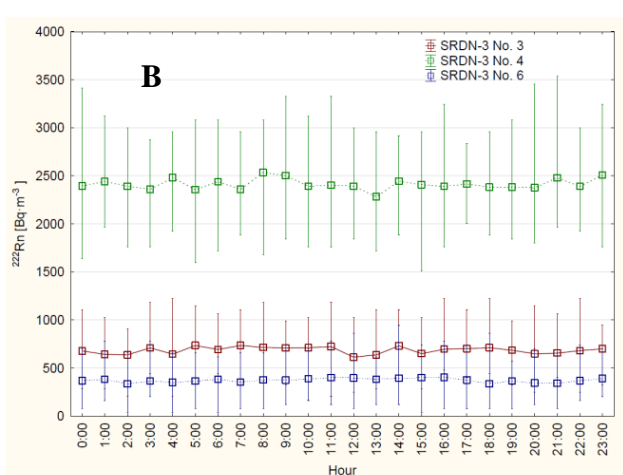
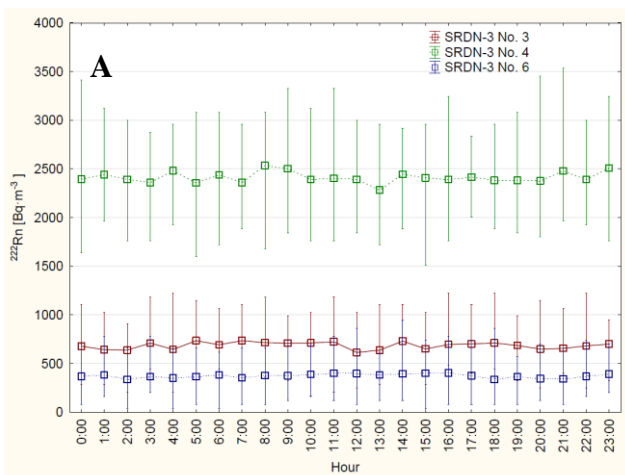
Wykazałam, że w podziemnym laboratorium w Książu poza okresem przejściowym zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w cyklu godzinowym można pominąć w optymalizacji czasu pracy. Szczególnym miejscem, ze względu na potwierdzone ponad 3-krotnie większe niż w pozostałych punktach obiektu wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , jest jedynie strefa uskoku (SRDN-3 No. 4). Akumulacji radonu w tym punkcie obiektu mogła towarzyszyć zmiana ciśnienia wywołana ruchami przesuwczymi poszczególnych bloków skał w strefach uskokowych, w wyniku reakcji tych stref na zmianę naprężeń w górotworze. Zmiany te mogły zainicjować zmianę wielkości strumienia radonu wydobywającego się przez strefę nieciągłości. Dyskusję zmiany przepływu strumienia radonu w górotworze, w tym w strefie uskoku przedstawiłam w publikacji wieloautorskiej wskazanej w dorobku (poz. 8, Tab. 2).



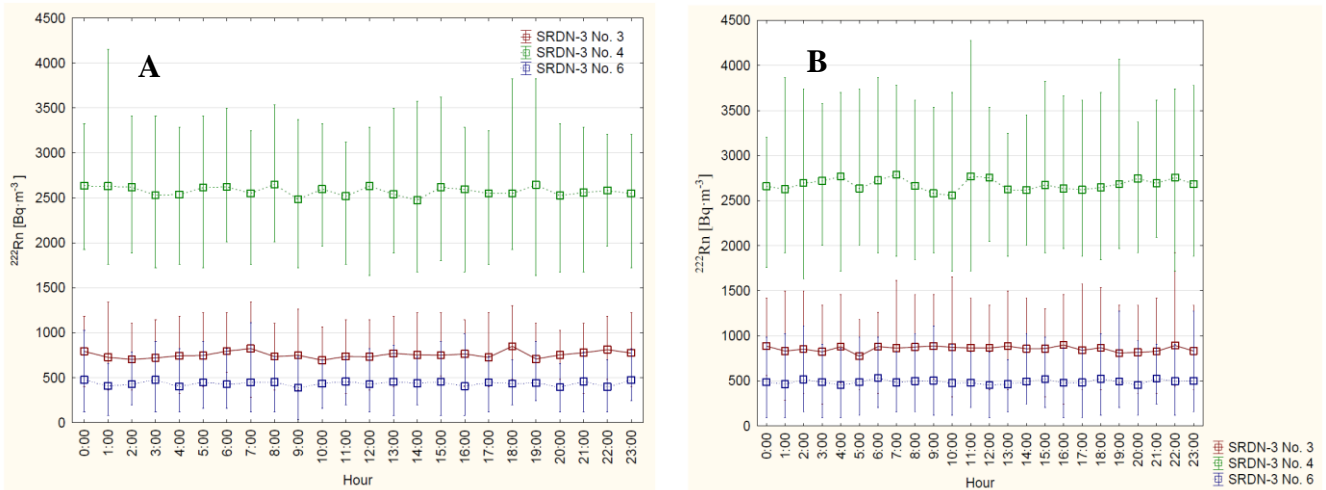
Rys. 14. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane w ciągu 24-godzin we wrześniu 2014 (A) oraz październiku 2014 (B) w trzech punktach pomiarowych podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Objasnienia jak dla Rys. 12. Wykresy pochodzą z publikacji nr 5 (Tab. 1).



Rys. 15. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane w ciągu 24-godzin w listopadzie 2014 (A) oraz grudniu 2014 (B) w trzech punktach pomiarowych podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Objasnienia jak dla Rys. 12. Wykresy pochodzą z publikacji nr 5 (Tab. 1).

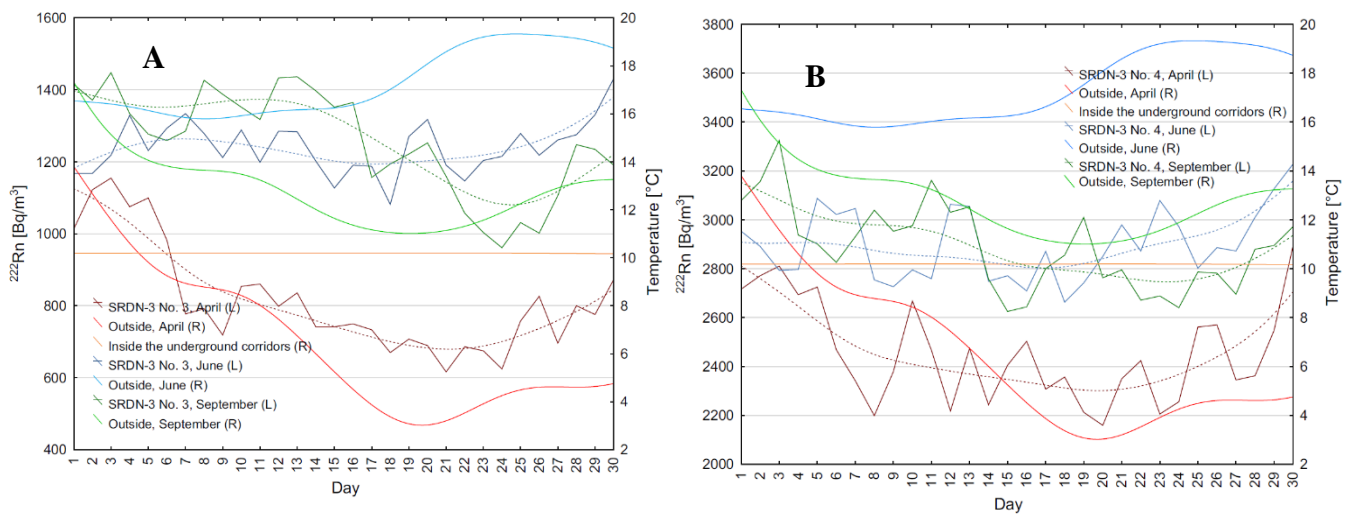


Rys. 16. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane w ciągu 24-godzin w styczniu 2015 (A) oraz lutym 2015 roku (B) w trzech punktach pomiarowych podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Objasnienia jak dla Rys. 12. Wykresy pochodzą z publikacji nr 5 (Tab. 1).



Rys. 17. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowane w ciągu 24-godzin w marcu 2015 (A) oraz kwietniu 2015 roku (B) w trzech punktach pomiarowych podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu. Objaśnienia jak dla Rys. 12. Wykresy pochodzą z publikacji nr 5 (Tab. 1).

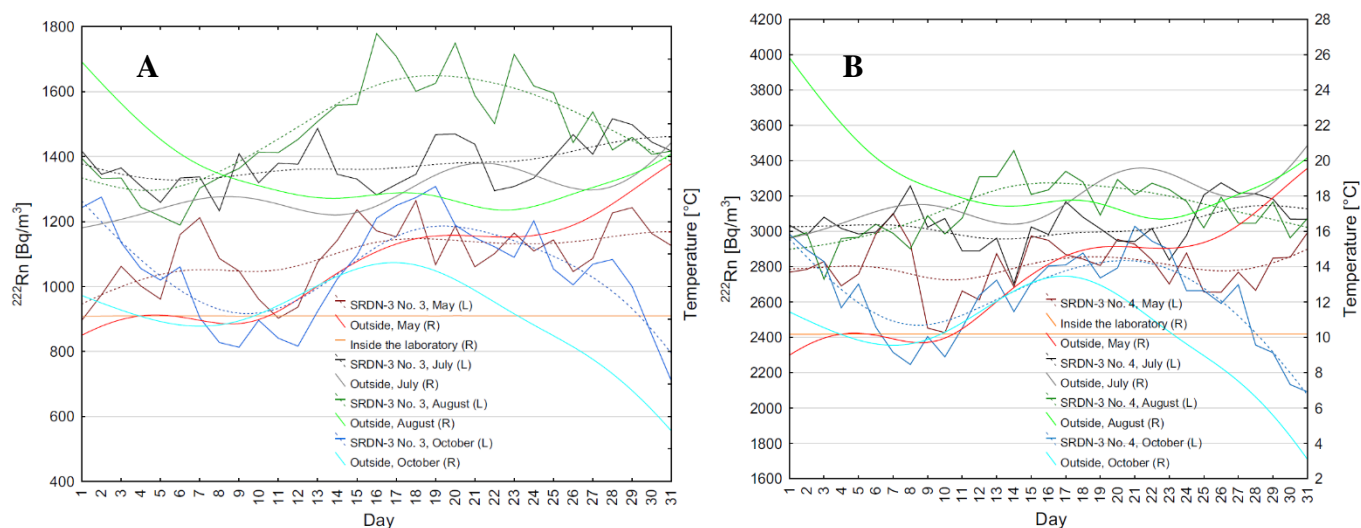
Kolejnym etapem prac była ocena wpływu żelbetowej obudowy górniczej na rejestrowany charakter i przebieg krótkookresowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w okresach przejściowych. Uzyskanym rezultatem poświęciłam artykuł: *The assesment of lining structure impact on radon baheviour inside selected underground workings under the cour d'honneur of Książ castle* opublikowany w 2020 roku w Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (pozycja 4, Tab. 1).



Rys. 18. Przebieg krótkookresowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w dwóch punktach podziemnego laboratorium geodynamicznego Książu w kwietniu, czerwcu i wrześniu 2017 roku. Stanowisko pomiarowe umieszczono w korytarzu odizolowanym od górotworu żelbetową obudową górniczą (A) oraz w wyrobisku znajdującym się w spękany i mocno zwietrzałym ośrodku skalnym (B) względem zmian temperatury wewnątrz obiektu oraz powietrza atmosferycznego. Objaśnienia: Linia przerywana – średnia wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w ciągu doby z dopasowaniem średnią ruchomą, R– prawa oś y, L–lewa oś y. Wykresy pochodzą z publikacji nr 4 (Tab. 1).

Dyskusję przeprowadziłam porównując dobowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występujące w tzw. okresach przejściowych trwających od kwietnia do początku października w dwóch różniących się stopniem izolacji korytarzach. Zaobserwowałam, że w okresach przejściowych ruch powietrza odbywał się bardzo powoli, był hamowany lub nawet dochodziło do jego zatrzymania (Rys. 18–19). Proces działania konwekcyjnych ruchów powietrza był

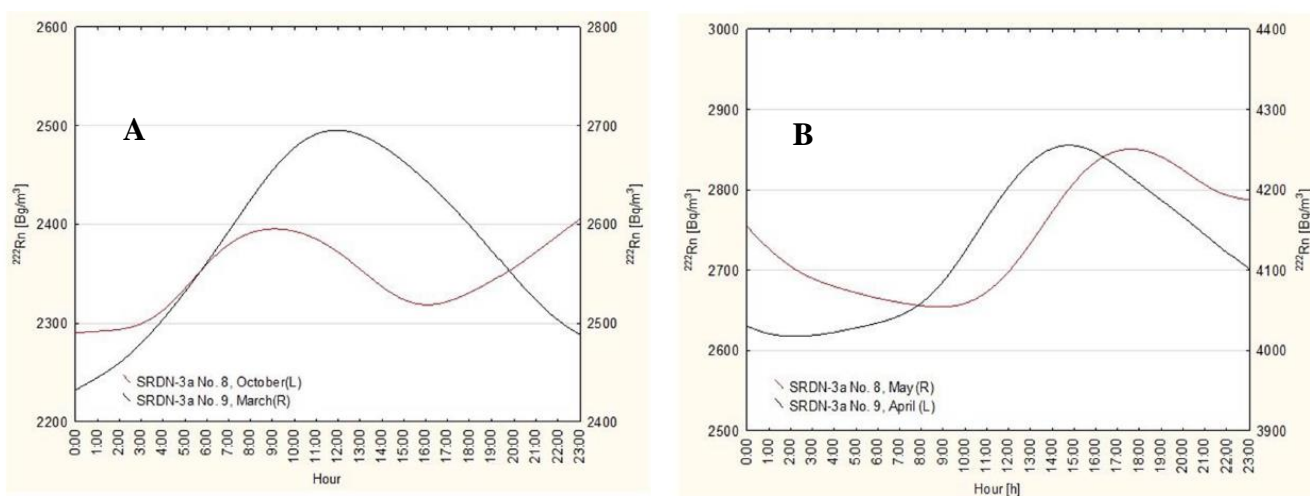
widoczny w obu wyrobiskach od kwietnia do października. Ich przebieg i charakter bez względu na miejsce i rok pomiaru był podobny w tych samych miesiącach badań. Wynoszenie radonu z wnętrza obiektu do atmosfery miało miejsce w kwietniu (Rys. 18). W tym czasie temperatura powietrza atmosferycznego była mniejsza o 7°C od temperatury panującej wewnątrz obiektu (Rys. 18A, B). W maju, czerwcu oraz lipcu różnica temperatur pomiędzy wnętrzem obiektu, a atmosferą wynosiła od 2 do 9°C (Rys. 18–19). Znacząco większa temperatura powietrza względem średniej temperatury panującej we wnętrzu obiektu podziemnego prowadziła do zatrzymania procesu konwekcji i nagromadzenia radonu w stagnującym powietrzu we wnętrzu wyrobisk podziemnych. Pokazało to wyraźnie małą przepuszczalność, zarówno w strefie izolowanego górotworu (SRDN–3 No. 3), jak i w strefie, gdzie jest on spękany, zwietrzały, pocięty uskokami (SRDN–3 No. 4). Warunki wymiany powietrza, bez względu na miejsce lokalizacji stanowiska pomiarowego: strefa spękań (rozluźnienia skał), czy strefa izolacji górotworu (powłoka mało przepuszczalna) były zmienne w całym obiekcie badań. W sierpniu (Rys. 18) obserwowaliśmy wyraźną akumulację radonu w obu punktach pomiarowych. Proces ten był uruchamiany gwałtownie, gdy temperatura na zewnątrz była o 8°C większa od temperatury wewnątrz obiektu. We wrześniu proces wymiany powietrza był początkowo zatrzymywany, a następnie powoli uruchamiany (Rys. 18). **W wyrobisku z obudową górniczą zatrzymanie wymiany powietrza trwało od pierwszej do piętnastej doby września (Rys. 18A).** W tym czasie temperatura powietrza atmosferycznego była większa od temperatury wnętrza obiektu. Wymiana powietrza rozpoczynała się dopiero w drugiej dekadzie miesiąca, gdy temperatura powietrza atmosferycznego spadała od 3°C do 1°C względem temperatury panującej wewnątrz badanego obiektu (Rys. 18A). W wyrobisku nieizolowanym obudową górniczą radon był wynoszony z obiektu w ciągu całego miesiąca obserwacji (Rys. 18B).



Rys. 19. Przebieg krótkookresowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w dwóch punktach podziemnego laboratorium geodynamicznego Książa w maju, lipcu, sierpniu i październiku 2017 roku. Stanowisko pomiarowe umieszczono w korytarzu odizolowanym od górotworu żelbetową obudową górniczą (A) oraz w wyrobisku znajdującym się w spękany i mocno zwietrzałym ośrodku skalnym (B) względem zmian temperatury wewnątrz obiektu oraz powietrza atmosferycznego. Objaśnienia: Linia przerywana – średnia wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w ciągu doby z dopasowaniem średnią ruchomą, R– prawa oś y, L–lewa oś y. Wykresy pochodzą z publikacji nr 4 (Tab. 1).

Zaobserwowałam, że proces naturalnej konwekcyjnej wymiany ze względu na małą różnicę temperatur pomiędzy wnętrzem, a atmosferą wynoszącą około 3°C zachodzi powoli. W tym czasie wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  malały nieznacznie z około 3000 Bq/m<sup>3</sup> do nieco poniżej 2800 Bq/m<sup>3</sup> (Rys. 18B). **W październiku w obu z wyrobisk proces konwekcji był zatrzymywany, w sytuacji, gdy temperatura powietrza atmosferycznego była większa o około 3°C od temperatury wewnątrz obiektu (Rys. 19).** W tym czasie radon gromadził się we wnętrzu obiektu. Spadek temperatury powietrza atmosferycznego o co najmniej 2°C w stosunku do temperatury wewnątrz obiektu (10,2°C) uruchamiał konwekcyjną wymianę powietrza (Rys. 19). Zauważone przeze mnie zależności wskazują, że zastosowana żelbetonowa obudowa górnicza izolująca spękany i nasiąkliwy górotwór ma znaczenie w przypadku oceny wielkości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  notowanego we wnętrzu wyrobiska, jednak nie ma wpływu na charakter krótkookresowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Na przykładzie Książa zaobserwowałam, że izolacja obudową jest również widoczna w charakterystyce zmian dobowych w okresach przejściowych. Duże zróżnicowanie warunków wymiany powietrza z otoczeniem wystąpiło w izolowanym wyrobisku w pierwszych 15 dobach września.

Scharakteryzowałam także **przebieg zmian krótkookresowych w tzw. okresach przejściowych roku na przykładzie obiektu podziemnego o naturalnym pochodzeniu.** Jako obiekt reprezentatywny do prowadzenia analiz wybrałam nowo odkryte partie Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Poświęciłam im artykuł: *A comprehensive characteristic of  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of bear cave in Kletno, Poland* opublikowany w Radiation Protection Dosimetry w 2020 roku (poz. 6, Tab. 1). Zaobserwowałam, że **stężenia aktywności radonu notowane w obiekcie charakteryzowały się zmiennością dobową, inną w zależności od pory dnia i miesiąca w roku kalendarzowym.** Najlepiej widoczne zmiany dobowe występowały w tzw. okresach przejściowych: na przełomie marca (Rys. 20A) i kwietnia (Rys. 20B) oraz w październiku (Rys. 20A), kiedy to średnia dobowa temperatura powietrza atmosferycznego była znacząco mniejsza lub większa od średniej rocznej temperatury powietrza panującej w jaskini. W marcu 2015 roku stężenia aktywności radonu rosły w godzinach przedpołudniowych, natomiast malały po południu (Rys. 20A). W październiku wartości stężenia aktywności radonu wyraźnie rosły od 6:00 do 12:00, malały do 16:00, a następnie znów rosły (Fig. 20A). W maju i kwietniu przebieg zmian dobowych był porównywalny. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wyraźnie rosły w ciągu dnia (około 8:00–10:00) do 17:00. W pozostałych miesiącach roku koncentracje radonu były nieregularnie i mało zmienne w ciągu doby. Największe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występowały w obiekcie częściej w ciągu dnia, tj. od rana do południa.



Rys. 20. Przebieg zmian dobowych stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występujący w okresach przejściowych, tj. marcu i październiku 2015 roku (A) oraz kwietniu i maju 2015 roku (B) w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Objasnienia: L– lewa oś y, R – prawa oś Y. Wykresy pochodząca z publikacji nr 6 (Tab. 1).

Poza szeroką charakterystyką zmienności stężenia aktywności radonu cykl publikacji uzupełniłam o wyniki oceny kontrolnej warunków panujących w obiektach podziemnych w aspekcie przepisów ochrony radiologicznej w Polsce. Do określenia ryzyka narażenia na promieniowanie jonizujące wykorzystałam szacowane dla pracowników i osób z ogółu ludności efektywne dawki promieniowania. Ocenę ryzyka narażenia na promieniowanie przeprowadziłam dla Sztolni Fluorytowej w Kletnie, sztolni nr 19 i 19a w Kowarach, Kopalni Złota w Złotym Stoku, podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu oraz dla nowo odkrytych partii Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie.

Tab. 4. Wartości efektywnej dawki promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  oszacowane dla pracowników i osób z ogółu ludności w godzinach 10:00 – 18:00 w ciągu roku kalendarzowego w dwóch punktach pomiarowych: na trasie turystycznej (A) i poza trasą (B) w Sztolni Fluorytowej w Kletnie. Tabela pochodzi z artykułu nr 1 (Tab. 1).

| SRDN-3 No. 2                                | Mean value of $^{222}\text{Rn}$ mean $\pm$ SE<br>a | Standard deviation SD   | Minimum value of $^{222}\text{Rn}$<br>b | Maximum value of $^{222}\text{Rn}$<br>c | Work hours<br>d | Mean value of ionizing radiation dose received during 30 min time tourist route exploring<br>mean $\pm$ SE<br>e = $(E_t + E_b) \cdot 0.5$ | Standard deviation SD | Minimum value of ionizing radiation dose received during 30 min time tourist route exploring<br>f = $(E_t + E_b) \cdot 0.5$ | Maximum value of ionizing radiation dose received during 30 min time tourist route exploring<br>g = $(E_t + E_b) \cdot 0.5$ | Mean value of ionizing radiation dose received each season of the year<br>mean $\pm$ SE<br>h = e · d | Standard deviation SD | Minimum value of ionizing radiation dose received each season of the year<br>i = f · d | Maximum value of ionizing radiation dose received each season of the year<br>j = g · d |
|---|--|-------------------------|---|---|-----------------|---|-----------------------|---|---|--|-----------------------|--|--|
| <b>A</b>                                    |  |                         |   |   |                 |   |                       |   |   |  |                       |  |  |
| Month                                       | [Bq · m <sup>-3</sup> ]                            | [Bq · m <sup>-3</sup> ] | [Bq · m <sup>-3</sup> ]                 | [Bq · m <sup>-3</sup> ]                 | [h]             | [mSv]   | [mSv]                 | [mSv]   | [mSv]   | [mSv]  | [mSv]                 | [mSv]  | [mSv]  |
| January                                     | 5330 ± 214   | 3580                    | 190                                     | 13,945                                  | 184             | 0.01 ± 0.0004   | 0.007                 | 0.0004  | 0.03  | 1.8 ± 0.07   | 1.2                   | 0.07   | 4.8  |
| February                                    | 8147 ± 299   | 4751                    | 190                                     | 15,014                                  | 160             | 0.02 ± 0.0006   | 0.009                 | 0.0004  | 0.03  | 2.5 ± 0.09   | 1.4                   | 0.06   | 4.5  |
| March                                       | 4950 ± 256   | 4271                    | 113                                     | 21,854                                  | 184             | 0.009 ± 0.0005  | 0.008                 | 0.0002  | 0.04  | 1.7 ± 0.09   | 1.5                   | 0.04   | 7.6  |
| April                                       | 9559 ± 385   | 5937                    | 763                                     | 21,854                                  | 176             | 0.02 ± 0.0007   | 0.010                 | 0.001   | 0.04  | 3.2 ± 0.13   | 2.0                   | 0.25   | 7.3  |
| May   | 9209 ± 397   | 6539                    | 725                                     | 21,816                                  | 184             | 0.02 ± 0.0007   | 0.010                 | 0.001   | 0.04  | 3.2 ± 0.14   | 2.3                   | 0.25   | 7.6  |
| June  | 7736 ± 276   | 4506                    | 381                                     | 21,701                                  | 176             | 0.01 ± 0.0005   | 0.008                 | 0.0007  | 0.04  | 2.6 ± 0.09   | 1.5                   | 0.13   | 7.2  |
| July  | 3662 ± 105   | 1751                    | 534                                     | 10,277                                  | 184             | 0.007 ± 0.0002  | 0.003                 | 0.001   | 0.02  | 1.3 ± 0.04   | 0.6                   | 0.19   | 3.6  |
| August                                      | 3015 ± 72  | 1198                    | 572                                     | 7144                                    | 184             | 0.006 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.001   | 0.01  | 1.0 ± 0.02   | 0.4                   | 0.20   | 2.5  |
| September                                   | 2627 ± 87  | 1432                    | 304                                     | 7488                                    | 176             | 0.005 ± 0.0002  | 0.003                 | 0.006   | 0.01  | 0.9 ± 0.03   | 0.5                   | 0.10   | 2.5  |
| October                                     | 4118 ± 279   | 4580                    | 113                                     | 21,128                                  | 184             | 0.008 ± 0.0005  | 0.009                 | 0.0002  | 0.04  | 1.4 ± 0.10   | 1.6                   | 0.04   | 7.3  |
| November                                    | 2238 ± 165   | 2696                    | 113                                     | 15,664                                  | 176             | 0.004 ± 0.0003  | 0.005                 | 0.0002  | 0.03  | 0.7 ± 0.05   | 0.9                   | 0.04   | 5.2  |
| December                                    | 2663 ± 111   | 1856                    | 113                                     | 8519                                    | 184             | 0.005 ± 0.0002  | 0.003                 | 0.0002  | 0.02  | 0.9 ± 0.04   | 0.6                   | 0.04   | 3.00   |
| Dose received during a work year [mSv/year] |  |                         |   |   |                 |   |                       |   |   | >20  | –                     | >1.0   | >60  |
| <b>B</b>                                    |  |                         |   |   |                 |   |                       |   |   |  |                       |  |  |
| Month                                       | [Bq · m <sup>-3</sup> ]                            | [Bq · m <sup>-3</sup> ] | [Bq · m <sup>-3</sup> ]                 | [Bq · m <sup>-3</sup> ]                 | [h]             | [mSv]   | [mSv]                 | [mSv]   | [mSv]   | [mSv]  | [mSv]                 | [mSv]  | [mSv]  |
| January                                     | 2488 ± 98  | 1644                    | 208                                     | 6847                                    | 184             | 0.005 ± 0.0002  | 0.003                 | 0.0004  | 0.01  | 0.9 ± 0.03   | 0.6                   | 0.07   | 2.4  |
| February                                    | 3203 ± 112   | 1778                    | 130                                     | 8996                                    | 160             | 0.006 ± 0.0002  | 0.003                 | 0.0002  | 0.02  | 1.0 ± 0.03   | 0.5                   | 0.04   | 2.7  |
| March                                       | 2318 ± 114   | 1897                    | 208                                     | 1089                                    | 184             | 0.004 ± 0.0002  | 0.004                 | 0.0004  | 0.02  | 0.8 ± 0.04   | 0.7                   | 0.07   | 3.5  |
| April                                       | 6859 ± 337   | 5011                    | 403                                     | 20244                                   | 176             | 0.01 ± 0.0006   | 0.009                 | 0.0008  | 0.04  | 2.3 ± 0.10   | 1.7                   | 0.10   | 6.7  |
| May   | 2206 ± 78  | 1306                    | 169                                     | 6808                                    | 184             | 0.004 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0003  | 0.01  | 0.8 ± 0.03   | 0.5                   | 0.06   | 2.4  |
| June  | 2214 ± 76  | 1247                    | 208                                     | 7668                                    | 176             | 0.004 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0004  | 0.01  | 0.8 ± 0.03   | 0.4                   | 0.07   | 2.7  |
| July  | 2019 ± 81  | 1346                    | 325                                     | 8410                                    | 184             | 0.004 ± 0.0002  | 0.003                 | 0.0006  | 0.02  | 0.7 ± 0.03   | 0.5                   | 0.10   | 2.9  |
| August                                      | 1617 ± 57  | 944                     | 208                                     | 6535                                    | 184             | 0.003 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0008  | 0.01  | 0.6 ± 0.02   | 0.3                   | 0.07   | 2.3  |
| September                                   | 1484 ± 74  | 1217                    | 130                                     | 7902                                    | 176             | 0.003 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0002  | 0.01  | 0.5 ± 0.02   | 0.4                   | 0.04   | 2.6  |
| October                                     | 1900 ± 54  | 992                     | 130                                     | 5051                                    | 184             | 0.004 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0002  | 0.01  | 0.7 ± 0.02   | 0.3                   | 0.05   | 1.8  |
| November                                    | 1736 ± 51  | 842                     | 364                                     | 4777                                    | 176             | 0.003 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0007  | 0.009   | 0.6 ± 0.02   | 0.3                   | 0.10   | 1.6  |
| December                                    | 2088 ± 72  | 1202                    | 130                                     | 5598                                    | 184             | 0.004 ± 0.0001  | 0.002                 | 0.0002  | 0.01  | 0.7 ± 0.03   | 0.4                   | 0.05   | 1.9  |
| Dose received during a work year [mSv/year] |  |                         |   |   |                 |   |                       |   |   | ±10  | –                     | ≤1.0   | >30  |

Symbols:  $E_t$  – effective dose resulting from the absorption of  $^{222}\text{Rn}$  and its progeny through inhalation [mSv/h],  $E_b$  – effective dose resulting from  $^{222}\text{Rn}$  absorption and its dissolution in blood [mSv/h],  $f$ ,  $g$  – account respectively for minimum and maximum  $^{222}\text{Rn}$  values [Bq · m<sup>-3</sup>].

Do oszacowania wartości efektywnej dawki promieniowania na jakie narażeni są pracownicy oraz osoby z ogółu ludności (głównie zwiedzający) w Sztolni Fluorytowej w Kletnie wykorzystałam wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowane między godziną 10:00 a 18:00 (otwarcie obiektu) w każdym z 12 miesięcy 2009 roku. Uzyskane wyniki dostosowałam do czasu zwiedzania (30 minut) przez 8 godzin w ciągu dnia i 269 dni w roku kalendarzowym. Największe narażenie na promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu wystąpiło w Sztolni Fluorytowej zarówno w ciepłych (kwiecień, maj, czerwiec), jak i chłodnych miesiącach roku: styczeń, luty w obu punktach pomiaru (Tab. 4A, B). **Praca w Sztolni Fluorytowej w Kletnie była wykonywana w warunkach narażenia.** Pracownicy mogli otrzymywać efektywną dawkę promieniowania większą od dopuszczalnego rocznego limitu 20 mSv/rok w Polsce (Rozporządzenie, 2005). Na podstawie istniejącego zagrożenia zakwalifikowałam wszystkich pracowników obsługi ruchu do odpowiedniej kategorii narażenia (głównie A). Wskazałam, że dalsza ocena i kontrola warunków pracy powinna być prowadzona zgodnie z zaleceniami zawartymi w ustawie (Ustawa, 2000; Dz. U.2021.1941, Dz.U.2023.1173). Uzyskane rezultaty badań przedstawiłam w *artykule Short-term radon activity concentration changes along the underground educational tourist route in the Old*



*Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts, SW Poland)* opublikowanym w Journal of Environmental Radioactivity w 2014 roku (pozycja nr 1, Tab. 1).

W wyrobiskach nr 19 i 19a nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach wartości efektywnej dawki promieniowania wyrażonej w Sv (siwertach) oszacowałam na podstawie wartości stężenia aktywności radonu z turystycznej (sztolnia nr 19a) i nieturystycznej (sztolnia nr 19) części obiektu, dostępności obiektu w całym okresie obserwacji, oraz harmonogramu czasu pracy przewodników i osób z obsługi (czasu efektywnie przepracowanego). Ustaliłam, że poza lipcem i sierpniem osoby z obsługi spędzały w obiekcie od 203 do 217 godzin miesięcznie. W okresie wakacyjnym czas ten wydłużał się do 310 godzin w miesiącu.

W skali przyjętych w badaniach sześciu miesięcy, czas pracy wyniósł 1460 godzin. Obliczenia efektywnej dawki promieniowania jonizującego wykonałam zgodnie z wytycznymi proponowanymi przez UNSCEAR (2000) a wyniki zestawiałam w tabelach (Tab. 5A, B). Oceny końcowej narażenia radiacyjnego pracowników i zwiedzających dokonałam porównując maksymalne dawki efektywne do:

- dopuszczalnych rocznych limitów dawek promieniowania jonizującego określonych w polskich przepisach prawa dla pracowników (20 mSv/rok) i osób z ogółu ludności (1 mSv/rok) (Rozporządzenie, 2005)
- kategorii narażenia osób (pracownicy grupy A > 6 mSv/rok lub B > 1 mSv/rok) wykonujących pracę zawodową w warunkach zwiększonego promieniowania (Ustawa, 2000, Dz.U.2021.1941). Zgodnie ze znowelizowaną Ustawą Prawo atomowe, kategoria B obejmuje pracowników, którzy nie zostali zaliczeni do kategorii A (Ustawa, 2000, Dz.U.2023.1173, art. 17).

Tab. 5. Oszacowane wartości efektywnej dawki promieniowania pochodzącej od radonu i produktów jego rozpadu dla pracowników przebywających w sztolni nr 19 – nieturystycznej (A) i 19a – turystycznej (B) nieczynnej kopalni uranu „Podgórze” w Kowarach między 10:00 a 17:00 lub 20:00 w ciągu 6 miesięcy 2011 r. Tabele pochodzą z artykułu nr 3 (Tab. 1).

| Adit no. 19                | <sup>222</sup> Rn value | range   | Mean value of <sup>222</sup> Rn<br>mean ± SE | Standard deviation<br>SD | Work hours | Dose workers   |                          |   |  |                          |  |  |
|----------------------------|-------------------------|---------|--|--------------------------|------------|--|--------------------------|---|--|--------------------------|--|--|
|                            |                         |         |  |                          |            | Mean value of ionizing radiation dose received during 1 h<br>mean ± SE | Standard deviation<br>SD | Maximum value of effective dose received during 1 h | Mean value of effective dose received each season of the year<br>mean ± SE | Standard deviation<br>SD | Minimum value of effective dose received each season of the year | Maximum value of effective dose received each season of the year |
| Month                      | [kBq·m <sup>-3</sup> ]  |         | [kBq·m <sup>-3</sup> ]                       | [kBq·m <sup>-3</sup> ]   | [h]        | [mSv/h]  | [mSv/h]                  | [mSv/h]   | [mSv]  | [mSv]                    | [mSv]  | [mSv]  |
| Minimum                    |                         | Maximum |  |                          |            |  |                          |   |  |                          |  |  |
| April                      | 54.0                    | 1072    | 523 ± 15.0                                   | 278                      | 203        | 2.0 ± 0.06   | 1.0                      | 4.0   | 400 ± 11.6   | 212.5                    | 41.3   | 821  |
| May                        | 6.7                     | 1040    | 445 ± 10.5                                   | 285                      | 217        | 1.7 ± 0.04   | 1.1                      | 4.0   | 364 ± 8.6  | 233.0                    | 5.5  | 851  |
| June                       | 18.5                    | 777     | 467 ± 5.9                                    | 159                      | 210        | 1.8 ± 0.02   | 0.6                      | 3.0   | 370 ± 4.7  | 126.0                    | 14.6   | 615  |
| July                       | 12.6                    | 546     | 292 ± 5.2                                    | 142                      | 210        | 1.1 ± 0.02   | 0.5                      | 2.1   | 232 ± 4.1  | 112.8                    | 10.0   | 433  |
| August                     | 12.6                    | 520     | 299 ± 3.5                                    | 96                       | 210        | 1.1 ± 0.01   | 0.4                      | 2.0   | 236 ± 2.8  | 75.8                     | 10.0   | 412  |
| September                  | 17.7                    | 676     | 316 ± 6.8                                    | 135                      | 150        | 1.2 ± 0.03   | 0.5                      | 2.5   | 179 ± 3.8  | 76.2                     | 10.0   | 382  |
| Estimated dose value [mSv] |                         |         |  |                          |            |  |                          |   |  | -                        | <100.0   | >3500  |

| Adit no. 19a (tourist route) | <sup>222</sup> Rn value | range   | Mean value of <sup>222</sup> Rn<br>mean ± SE | Standard deviation<br>SD | Work hours | Dose workers and tourists                                     |                          |   | Dose workers   |                          |  |  |
|------------------------------|-------------------------|---------|--|--------------------------|------------|---|--------------------------|---|--|--------------------------|--|--|
|                              |                         |         |  |                          |            | Mean value of effective dose received during 1 h<br>mean ± SE | Standard deviation<br>SD | Maximum value of effective dose received during 1 h | Mean value of effective dose received each season of the year<br>mean ± SE | Standard deviation<br>SD | Minimum value of effective dose received each season of the year | Maximum value of effective dose received each season of the year |
| Month                        | [kBq·m <sup>-3</sup> ]  |         | [kBq·m <sup>-3</sup> ]                       | [kBq·m <sup>-3</sup> ]   | [h]        | [mSv/h]   | [mSv/h]                  | [mSv/h]   | [mSv]  | [mSv]                    | [mSv]  | [mSv]  |
| Minimum                      |                         | maximum |  |                          |            |   |                          |   |  |                          |  |  |
| April                        | 38.4                    | 1015    | 453 ± 14.1                                   | 258                      | 203        | 1.7 ± 0.05  | 1.0                      | 4.0   | 346.0 ± 11.0   | 198.0                    | 29.0   | 777  |
| May                          | 3.9                     | 931     | 385 ± 9.6                                    | 260                      | 217        | 1.5 ± 0.04  | 1.0                      | 4.0   | 315.0 ± 8.0  | 213.0                    | 3.0  | 762  |
| June                         | 8.7                     | 710     | 405 ± 5.7                                    | 153                      | 210        | 1.5 ± 0.02  | 0.6                      | 3.0   | 321.0 ± 4.5  | 121.0                    | 6.9  | 562  |
| July                         | 3.0                     | 516     | 201 ± 5.7                                    | 154                      | 210        | 0.8 ± 0.02  | 0.6                      | 1.9   | 159.0 ± 4.5  | 122.0                    | 2.4  | 408  |
| August                       | 4.9                     | 423     | 189 ± 5.7                                    | 138                      | 210        | 0.7 ± 0.02  | 0.5                      | 1.6   | 150.0 ± 4.0  | 109.0                    | 3.9  | 335  |
| September                    | 3.2                     | 525     | 150 ± 8.5                                    | 168                      | 150        | 0.6 ± 0.03  | 0.6                      | 2.0   | 84.6 ± 4.8   | 95.0                     | 1.8  | 297  |
| Estimated dose value [mSv]   |                         |         |  |                          |            |   |                          |   |  | -                        | >20.0  | >3000  |

W odniesieniu do tak zdefiniowanych kryteriów zaproponowałam wprowadzenie środków kontroli mających ograniczać warunki wysoce szkodliwe dla zdrowia i życia pracowników i

zwiedzających. Uzyskane rezultaty przedyskutowałam w artykule: *Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned Uranium Mine 'Podgórze' in Kowary (Sudety Mts, Poland)* opublikowanym w Journal of Environmental Radioactivity w 2016 roku (poz. 3, Tab. 1).

W Kopalni Złota w Złotym Stoku ocenę narażenia na zwiększone promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu przeprowadziłam osobno dla przewodników i turystów. Zakres badań oraz ich rezultaty przedstawiłam w artykule: *Estimation of radon risk exposure in selected underground workplaces in the Sudetes (southern Poland)* opublikowanym w 2015 roku na łamach Journal of Radiation Research and Applied Sciences (poz. 2, Tab. 1).

Tab. 6. Wartości efektywnej dawki promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  oszacowane dla pracowników i osób z ogółu ludności w godzinach 9:00 – 16:00 (sezon zimowy) i 9:00 – 18:00 (sezon letni) w ciągu roku kalendarzowego, w punkcie pomiarowym ustawionym w sztolni Czarna i poza trasą sztolni Gertruda w Kopalni Złota w Złotym Stoku. Tabela pochodzi z artykułu 2 (Tab. 1).

| Comparison of the measuring points |               | $^{222}\text{Rn}$ value          |                                  | Mean value of $^{222}\text{Rn}$<br>Mean $\pm$ SE | Standard deviation<br>SD | Work deviation hours<br>[h] | Dose workers and tourists  |                          |   | Dose workers  |                          |  |  |
|------------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|--|--------------------------|---|---|--------------------------|--|--|
|                                    |               | Range                            |                                  |  |                          |                             | Mean value of ionizing radiation dose received during 1 h<br>Mean $\pm$ SE | Standard deviation<br>SD | Maximum value of ionizing radiation dose received during 1 h<br>[mSv/h] | Mean value of ionizing radiation dose received each season of the year<br>Mean $\pm$ SE | Standard deviation<br>SD | Minimum value of ionizing radiation dose received each season of the year<br>[mSv] | Maximum value of ionizing radiation dose received each season of the year<br>[mSv] |
|                                    |               | [Bq·m <sup>-3</sup> ]<br>minimum | [Bq·m <sup>-3</sup> ]<br>maximum | [mSv/h]  | [mSv/h]                  | [mSv/h]                     |  |                          |   |   |                          |  |  |
| July 2010                          | Black Adit    | 992                              | 3705                             | 2200 $\pm$ 29                                    | 518                      | 225                         | 0.008 $\pm$ 0.0001   | 0.002                    | 0.01  | 1.9 $\pm$ 0.02  | 0.4                      | 0.8  | 3.1  |
|                                    | Gertruda Adit | 30164                            | 63714                            | 40054 $\pm$ 391                                  | 6884                     | 225                         | 0.15 $\pm$ 0.0015  | 0.03                     | 0.2   | 34.0 $\pm$ 0.3  | 5.8                      | 25.6   | 54.1   |
| August                             | Black Adit    | 1183                             | 5997                             | 2100 $\pm$ 38                                    | 665                      | 225                         | 0.008 $\pm$ 0.0001   | 0.003                    | 0.02  | 1.8 $\pm$ 0.03  | 0.6                      | 1.0  | 5.1  |
|                                    | Gertruda Adit | 34031                            | 63285                            | 41709 $\pm$ 339                                  | 5973                     | 216                         | 0.2 $\pm$ 0.001  | 0.02                     | 0.2   | 35.4 $\pm$ 0.3  | 5.1                      | 28.9   | 53.7   |
| September                          | Black Adit    | 190                              | 4851                             | 1958 $\pm$ 44                                    | 765                      | 216                         | 0.007 $\pm$ 0.0002   | 0.003                    | 0.02  | 1.6 $\pm$ 0.04  | 0.6                      | 0.15   | 3.95   |
|                                    | Gertruda Adit | 30555                            | 69456                            | 40982 $\pm$ 477                                  | 8262                     | 216                         | 0.15 $\pm$ 0.002   | 0.03                     | 0.3   | 33.4 $\pm$ 0.4  | 6.7                      | 24.9   | 56.6   |
| October                            | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 3017                             | 604 $\pm$ 32                                     | 555                      | 225                         | 0.002 $\pm$ 0.0001   | 0.002                    | 0.01  | 0.5 $\pm$ 0.03  | 0.5                      | 0.08   | 2.6  |
|                                    | Gertruda Adit | 13878                            | 48053                            | 26281 $\pm$ 425                                  | 7484                     | 216                         | 0.1 $\pm$ 0.002  | 0.03                     | 0.2   | 22.3 $\pm$ 0.4  | 6.35                     | 11.8   | 40.8   |
| November                           | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 5730                             | 1080 $\pm$ 81                                    | 1255                     | 168                         | 0.004 $\pm$ 0.0003   | 0.005                    | 0.02  | 0.7 $\pm$ 0.05  | 0.8                      | 0.06   | 3.6  |
|                                    | Gertruda Adit | 8605                             | 49185                            | 26726 $\pm$ 508                                  | 7874                     | 175                         | 0.1 $\pm$ 0.002  | 0.03                     | 0.2   | 17 $\pm$ 0.3  | 5.0                      | 5.45   | 31.15  |
| December                           | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 495                              | 168 $\pm$ 5                                      | 80                       | 175                         | 0.001 $\pm$ 0.00002  | 0                        | 0.002   | 0.1 $\pm$ 0.003   | 0.05                     | 0.06   | 0.3  |
|                                    | Gertruda Adit | 10480                            | 66409                            | 21372 $\pm$ 502                                  | 7908                     | 175                         | 0.08 $\pm$ 0.002   | 0.03                     | 0.25  | 14.1 $\pm$ 0.3  | 5.2                      | 6.9  | 43.8   |
| January                            | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 2253                             | 339 $\pm$ 22                                     | 341                      | 175                         | 0.001 $\pm$ 0.0001   | 0.001                    | 0.01  | 0.2 $\pm$ 0.01  | 0.2                      | 0.06   | 1.5  |
|                                    | Gertruda Adit | 12433                            | 77580                            | 27010 $\pm$ 803                                  | 12639                    | 175                         | 0.1 $\pm$ 0.003  | 0.05                     | 0.3   | 17.8 $\pm$ 0.5  | 8.3                      | 8.2  | 51.2   |
| February                           | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 992                              | 205 $\pm$ 9                                      | 132                      | 168                         | 0.001 $\pm$ 0.00003  | 0                        | 0.004   | 0.1 $\pm$ 0.006   | 0.08                     | 0.06   | 0.6  |
|                                    | Gertruda Adit | 10636                            | 73205                            | 24852 $\pm$ 675                                  | 10109                    | 168                         | 0.09 $\pm$ 0.0025  | 0.04                     | 0.3   | 15.7 $\pm$ 0.4  | 6.4                      | 6.7  | 46.4   |
| March                              | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 1183                             | 346 $\pm$ 14                                     | 217                      | 175                         | 0.001 $\pm$ 0.0001   | 0.001                    | 0.004   | 0.2 $\pm$ 0.009   | 0.1                      | 0.06   | 0.8  |
|                                    | Gertruda Adit | 14073                            | 83009                            | 30050 $\pm$ 938                                  | 14775                    | 175                         | 0.1 $\pm$ 0.0035   | 0.06                     | 0.3   | 19.8 $\pm$ 0.6  | 9.75                     | 9.3  | 54.8   |
| April                              | Black Adit    | 96.5 <sup>a</sup>                | 5501                             | 1382 $\pm$ 71                                    | 1225                     | 216                         | 0.005 $\pm$ 0.003  | 0.005                    | 0.02  | 1.1 $\pm$ 0.06  | 1.0                      | 0.08   | 4.5  |
|                                    | Gertruda Adit | 17393                            | 49693                            | 29839 $\pm$ 377                                  | 6525                     | 216                         | 0.1 $\pm$ 0.001  | 0.02                     | 0.2   | 24.3 $\pm$ 0.3  | 5.3                      | 14.2   | 40.5   |
| May                                | Black Adit    | 113                              | 14518                            | 3838 $\pm$ 172                                   | 3034                     | 225                         | 0.01 $\pm$ 0.0006  | 0.01                     | 0.05  | 3.3 $\pm$ 0.15  | 2.6                      | 0.1  | 12.3   |
|                                    | Gertruda Adit | 16065                            | 45436                            | 27477 $\pm$ 340                                  | 5982                     | 216                         | 0.1 $\pm$ 0.001  | 0.02                     | 0.2   | 23.3 $\pm$ 0.3  | 5.1                      | 13.6   | 38.5   |
| June 2011                          | Black Adit    | 1031                             | 4469                             | 2539 $\pm$ 31                                    | 539                      | 216                         | 0.01 $\pm$ 0.0001  | 0.002                    | 0.02  | 2.1 $\pm$ 0.025   | 0.4                      | 0.8  | 3.6  |
|                                    | Gertruda Adit | 22978                            | 47193                            | 32057 $\pm$ 339                                  | 5872                     | 216                         | 0.1 $\pm$ 0.001  | 0.02                     | 0.2   | 26.1 $\pm$ 0.3  | 4.8                      | 18.7   | 38.4   |
| Estimated dose value [mSv/year]    |               |                                  |                                  | Black Adit (outside tourist route)               |                          |                             | >13.0  |                          |   |   |                          | >3.0   | >40.0  |
|                                    |               |                                  |                                  | Gertruda Adit (outside tourist route)            |                          |                             | >280.0   |                          |   |   |                          | >150.0   | >500.0   |

<sup>a</sup> Value of Low Limit Detection (LLD) estimated after calibration SRDN-3 probe No. 2 (Przylibski et al., 2010).

Kopalnia Złota w Złotym Stoku była dostępna całorocznie od poniedziałku do niedzieli od 9:00 do 18:00 w okresie letnim oraz od 9:00 do 16:00 w okresie zimowym. Sezon letni ruszał od kwietnia i trwał do końca października. Sezon zimowy trwał od listopada, a jego koniec przypadał w ostatnim dniu marca. Przewodnicy pracowali od 168 do 175 godzin w miesiącu w sezonie zimowym oraz od 216 do 220 godzin w miesiącu w sezonie letnim. W okresie zimowym ruch turystyczny obsługiwało pięciu przewodników, a w letnim do 12. Podczas zwiedzania obiektu inny przewodnik oprowadzał turystów po sztolni Czarnej oraz sztolni Gertruda. W sztolni Czarna prawdopodobieństwo otrzymania efektywnej dawki promieniowania większej niż dopuszczalny roczny limit wynoszący zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem (2005) 20 mSv/rok dla pracowników oraz 1 mSv/rok dla osób z ogółu ludności było niewielkie. Roczna efektywna dawka promieniowania na jaką narażeni byli pracownicy w tej części trasy wynosiła ponad 13 mSv/rok (Tab. 6). W obliczeniach rocznej efektywnej dawki promieniowania uwzględniłam zmienne i zależne od sezonu godziny otwarcia obiektu (czas efektywnie przepracowany). W przypadku nieturystycznej części sztolni Gertruda notowane wartości stężenia aktywności radonu były nawet o 1 rząd wartości większe od tych, jakie notowałam tuż przy wejściu i na trasie obiektu. Miało to związek z położeniem stanowiska pomiarowego w strefie uskokowej, w miejscu o bardzo słabej cyrkulacji powietrza.

W związku z tym jako reprezentatywne dla turystycznej części Gertrudy zaproponowałam przyjęcie 10–krotnie mniejszych wartości dawki od wyznaczonych poza trasą. Słuszność takiego założenia potwierdzały również badania Przylibskiego (2001).

Szacując wielkość narażenia na promieniowanie jonizujące w podziemnym laboratorium geodynamicznym Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (PAN) w Książu przyjąłm kilka założeń. Do wyznaczenia efektywnej dawki promieniowania wybrałam wyniki stężenia aktywności radonu pochodzące z trzech uznanych za reprezentatywne stanowisk pomiarowych obiektu w rocznym cyklu pomiarowym. Wejście do obiektu było możliwe od poniedziałku do piątku wyłącznie z pracownikiem, we wcześniej ustalonych terminach (data, godzina). Czas pracy pracowników obiektu nie przekraczał ośmiu godzin w ciągu doby (rozpoczęcie pracy o 7:00 rano, zakończenie o 15:00). Minimalny czas przebywania w podziemnym laboratorium trwał jedną godzinę, a maksymalny 8 godzin w ciągu doby. Obiekt był zamknięty dwukrotnie w ciągu roku w czasie trwania Świąt (13 dni), oraz w trakcie przerw urlopowych jego pracowników (26 dni w roku kalendarzowym). Zgodnie z założeniami oszacowałam, że minimalne narażenie pracowników na promieniowanie było 20–krotnie mniejsze od wartości dawki promieniowania dopuszczalnej w ciągu roku przepisami prawa w Polsce (20 mSv/rok). Jedyne wyjątek stanowiła strefa uskoku (Tab. 7). Ustaliłam, że bez względu na notowane roczne wartości efektywnej dawki promieniowania każdy z pracowników obiektu powinien zostać zakwalifikowany do odpowiedniej kategorii narażenia (głównie B). Wykazałam, że dla osób z ogółu ludności przebywanie w obiekcie jest bezpieczne. Rezultaty badań przedyskutowałam w artykule współautorskim: *First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland)* opublikowanym w Journal of Environmental Radioactivity w 2016 roku (pozycja nr 5, Tab. 1).

Tab. 7. Wartości efektywnej dawki promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  oszacowane w strefie uskoku (SRDN–3 nr 4) dla pracowników i osób z ogółu ludności w godzinach 7:00 – 15:00 między 17.05.2014 a 16.05.2015 w podziemnym laboratorium geodynamicznym Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (PAN) w Książu. Tabela pochodzi z artykułu 5 (Tab. 1).

| SRDN-3 No. 4               |                | $^{222}\text{Rn}$ value range |         | Mean value of $^{222}\text{Rn}$ mean $\pm$ SE | Standard deviation SD | Work hours | Dose workers and members of public                             |                       |   | Dose workers  |                       |  |  |
|----------------------------|----------------|-------------------------------|---------|---|-----------------------|------------|--|-----------------------|---|---|-----------------------|--|--|
| Month                      | Number of data | [Bq·m <sup>-3</sup> ]         |         | [Bq·m <sup>-3</sup> ]                         | [Bq·m <sup>-3</sup> ] | [h]        | Mean value of effective dose received during 1 h mean $\pm$ SE | Standard deviation SD | Maximum value of effective dose received during 1 h | Mean value of effective dose received each season of the year mean $\pm$ SE | Standard deviation SD | Minimum value of effective dose received each season of the year | Maximum value of effective dose received each season of the year |
|                            |                | minimum                       | maximum | [mSv/h]                                       | [mSv/h]               | [mSv/h]    | [mSv]  | [mSv]                 | [mSv]   |   |                       |  |  |
| May                        | 744            | 1925                          | 4690    | 3249 $\pm$ 17.0                               | 459                   | 176        | 0.012 $\pm$ 0.00006  | 0.0017                | 0.02  | 2.2 $\pm$ 0.01  | 0.3                   | 1.3  | 3.1  |
| June                       | 720            | 2297                          | 4690    | 3422 $\pm$ 15.0                               | 399                   | 160        | 0.013 $\pm$ 0.00006  | 0.0015                | 0.02  | 2.1 $\pm$ 0.009   | 0.2                   | 1.4  | 2.8  |
| July                       | 744            | 2338                          | 5185    | 3540 $\pm$ 15.0                               | 421                   | 120        | 0.013 $\pm$ 0.00006  | 0.0016                | 0.02  | 1.6 $\pm$ 0.007   | 0.2                   | 1.1  | 2.3  |
| August                     | 744            | 2420                          | 5350    | 3497 $\pm$ 15.0                               | 411                   | 120        | 0.013 $\pm$ 0.00006  | 0.0015                | 0.02  | 1.6 $\pm$ 0.007   | 0.2                   | 1.1  | 2.4  |
| September                  | 720            | 2090                          | 4979    | 3505 $\pm$ 19.0                               | 498                   | 120        | 0.013 $\pm$ 0.00007  | 0.0019                | 0.02  | 1.6 $\pm$ 0.008   | 0.2                   | 0.9  | 2.3  |
| October                    | 744            | 1719                          | 4937    | 3264 $\pm$ 19.0                               | 522                   | 168        | 0.012 $\pm$ 0.00007  | 0.0020                | 0.02  | 2.1 $\pm$ 0.01  | 0.3                   | 1.1  | 3.1  |
| November                   | 720            | 1595                          | 4607    | 2814 $\pm$ 16.0                               | 433                   | 160        | 0.011 $\pm$ 0.00006  | 0.0016                | 0.02  | 1.7 $\pm$ 0.01  | 0.3                   | 1.0  | 2.8  |
| December                   | 744            | 1430                          | 3411    | 2409 $\pm$ 13.0                               | 342                   | 120        | 0.009 $\pm$ 0.00005  | 0.0013                | 0.01  | 1.1 $\pm$ 0.006   | 0.2                   | 0.6  | 1.5  |
| January                    | 744            | 1554                          | 3287    | 2397 $\pm$ 12.0                               | 323                   | 144        | 0.009 $\pm$ 0.00004  | 0.0012                | 0.01  | 1.3 $\pm$ 0.006   | 0.2                   | 0.8  | 1.8  |
| February                   | 672            | 1513                          | 3535    | 2412 $\pm$ 13.0                               | 332                   | 160        | 0.009 $\pm$ 0.00005  | 0.0013                | 0.01  | 1.5 $\pm$ 0.008   | 0.2                   | 0.9  | 2.1  |
| March                      | 744            | 1636                          | 4153    | 2575 $\pm$ 14.0                               | 390                   | 176        | 0.01 $\pm$ 0.00005   | 0.0015                | 0.02  | 1.7 $\pm$ 0.01  | 0.3                   | 1.1  | 2.8  |
| April                      | 720            | 1636                          | 4277    | 2680 $\pm$ 17.0                               | 453                   | 144        | 0.01 $\pm$ 0.00006   | 0.0017                | 0.02  | 1.5 $\pm$ 0.009   | 0.2                   | 0.9  | 2.3  |
| Estimated dose value [mSv] |                |                               |         |   |                       |            |  |                       |   | –   | >10.0                 | >25.0  |  |

W nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie do oceny narażenia na promieniowanie jonizujące wykorzystałam średnie wartości stężenia aktywności radonu otrzymywane w ciągu godziny każdego miesiąca przez okres roku prowadzonych obserwacji (IX – XII. 2013, I – XII. 2014 (z wyłączeniem sierpnia), I – XII. 2015, I – VII. 2016). Potwierdziłam, że otrzymane wyniki były porównywalne z dawkami oszacowanymi w latach 2008–2012 w turystycznej części obiektu (Fijałkowska–Lichwa, 2012).

Wskazałam, że w przypadku zagospodarowania nowych wyrobisk Jaskini Niedźwiedziej do ruchu turystycznego należy pamiętać, że **przekroczenie wartości 1 mSv dopuszczalnej przepisami prawa w Polsce dla jednego roku jest możliwe już po około stu godzinach spędzonych wewnątrz Jaskini. Liczba godzin niezbędnych do przekroczenia limitu 1 mSv malała w okresach przejściowych, rozpoczynających się wczesną wiosną a kończących w październiku** (Tab. 8A, B). Przyszli pracownicy obiektu powinni zostać objęci pomiarami dozymetrycznymi. Zgodnie z przepisami prawa należy ich również zaliczyć do odpowiedniej kategorii B lub nawet A ryzyka narażenia na promieniowanie, ponieważ sumaryczna dawka promieniowania dla jednego roku pracy przekraczałaby wyraźnie 6 mSv (Ustawa, 2000; Dz. U.2021.1941, Dz.U.2023.1173). Dla pracowników dawka byłaby znacząco mniejsza od granicznej wartości efektywnej dawki promieniowania wynoszącej zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów (2005) 20 mSv/rok. Na tej podstawie mogę przypuszczać, że po udostępnieniu nowych partii Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, w najgorszym z przypadków zaistnieje konieczność stosowania dozymetrii osobistej, w najlepszym zaś jedynie monitoringu środowiskowego. Zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku niezbędna będzie szczegółowa rejestracja czasu pracy pod ziemią każdego przewodnika. Wyniki badań przedstawiłam w artykule współautorskim: *A comprehensive characteristic of <sup>222</sup>Rn activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of bear cave in Kletno, Poland* opublikowanym w Radiation Protection Dosimetry w 2020 roku (poz. 6, Tab. 1).

Tab. 8. Podstawowe statystyki opisowe dotyczące dawek promieniowania jonizującego oszacowanych w kolejnych latach pomiarów nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, przedstawione w układzie sezonowym tj. od kwietnia do października (A) i od listopada do marca (B). Wyjaśnienie: średnią arytmetyczną podano jako średnią. Tabela pochodzi z artykułu nr 6 (Tab. 1).

| Number of probe | Season    | Month    | Year     | Data | Effective dose |        |         |         |          | Standard deviation (δ) | Number of probe | Season | Month | Year   | Data    | Effective dose |        |         |         |          | Standard deviation (δ) |       |       |
|-----------------|-----------|----------|----------|------|----------------|--------|---------|---------|----------|------------------------|-----------------|--------|-------|--------|---------|----------------|--------|---------|---------|----------|------------------------|-------|-------|
|                 |           |          |          |      | Average        | Median | Minimum | Maximum | Interval |                        |                 |        |       |        |         | Average        | Median | Minimum | Maximum | Interval |                        |       |       |
| [-]             |           |          |          |      | [mSv/h]        |        |         |         |          | [-]                    |                 |        |       |        | [mSv/h] |                |        |         |         |          |                        |       |       |
| 7               | A         | Autumn   | November | 2015 | 720            | 0.01   | 0.01    | 0.004   | 0.02     | 0.02                   | 0.003           | 7      | B     | Spring | April   | 2016           | 720    | 0.01    | 0.01    | 0.006    | 0.02                   | 0.02  | 0.003 |
| 9               |           |          |          |      | 720            | 0.01   | 0.01    | 0.004   | 0.02     | 0.01                   | 0.003           | 8      |       |        |         |                | 720    | 0.01    | 0.01    | 0.005    | 0.02                   | 0.02  | 0.003 |
| 7               |           |          |          |      | 720            | 0.01   | 0.01    | 0.004   | 0.02     | 0.02                   | 0.003           | 7      |       |        |         |                | 720    | 0.01    | 0.01    | 0.005    | 0.02                   | 0.02  | 0.003 |
| 8               |           |          |          |      | 720            | 0.01   | 0.01    | 0.004   | 0.01     | 0.01                   | 0.002           | 9      |       |        |         |                | 720    | 0.01    | 0.01    | 0.005    | 0.02                   | 0.01  | 0.002 |
| 7               |           | December | 2015     | 720  | 0.01           | 0.01   | 0.004   | 0.02    | 0.02     | 0.003                  | 7               | May    |       | 2016   | 720     | 0.01           | 0.01   | 0.006   | 0.02    | 0.02     | 0.003                  |       |       |
| 9               |           |          |          | 720  | 0.01           | 0.01   | 0.004   | 0.02    | 0.02     | 0.003                  | 9               |        |       |        | 720     | 0.01           | 0.01   | 0.005   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  |       |       |
| 8               |           |          |          | 720  | 0.01           | 0.01   | 0.005   | 0.02    | 0.02     | 0.004                  | 7               |        |       |        | 744     | 0.01           | 0.01   | 0.006   | 0.02    | 0.02     | 0.003                  |       |       |
| 7               |           |          |          | 720  | 0.01           | 0.01   | 0.004   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  | 8               |        |       |        | 744     | 0.01           | 0.01   | 0.005   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  |       |       |
| 9               |           | Winter   | January  | 2016 | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.004   | 0.02     | 0.01                   | 0.003           | 7      |       | June   | 2016    | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.006   | 0.02     | 0.02                   | 0.003 |       |
| 8               |           |          |          |      | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.003   | 0.02     | 0.01                   | 0.002           | 9      |       |        |         | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.006   | 0.02     | 0.02                   | 0.003 |       |
| 7               |           |          |          |      | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.005   | 0.02     | 0.01                   | 0.003           | 8      |       |        |         | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.008   | 0.03     | 0.02                   | 0.003 |       |
| 9               |           |          |          |      | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.003   | 0.02     | 0.01                   | 0.002           | 7      |       |        |         | 744            | 0.01   | 0.01    | 0.006   | 0.02     | 0.01                   | 0.002 |       |
| 8               |           | February | 2016     | 744  | 0.01           | 0.01   | 0.004   | 0.02    | 0.02     | 0.003                  | 7               | July   |       | 2016   | 744     | 0.01           | 0.01   | 0.008   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  |       |       |
| 9               |           |          |          | 744  | 0.01           | 0.01   | 0.003   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  | 9               |        |       |        | 240     | 0.01           | 0.01   | 0.008   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  |       |       |
| 7               |           |          |          | 744  | 0.01           | 0.01   | 0.005   | 0.02    | 0.02     | 0.003                  | 7               |        |       |        | 240     | 0.01           | 0.01   | 0.005   | 0.01    | 0.01     | 0.002                  |       |       |
| 9               |           |          |          | 744  | 0.01           | 0.01   | 0.004   | 0.02    | 0.02     | 0.002                  | 9               |        |       |        | 240     | 0.01           | 0.01   | 0.009   | 0.02    | 0.01     | 0.002                  |       |       |
| 8               | March     | 2016     | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.02    | 0.003    | 7                      | August          | 2015   | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.04   | 0.03    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 9               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.003  | 0.02    | 0.02    | 0.002    | 9                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.03   | 0.03    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 7               |           |          | 696      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.02    | 0.003    | 8                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.004          | 0.03   | 0.03    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 9               |           |          | 696      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.02    | 0.002    | 9                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.004          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 8               | September | 2015     | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.006  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 7                      | September       | 2015   | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.02    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 7               |           |          | 672      | 0.01 | 0.01           | 0.003  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 9                      |                 |        | 720   | 0.01   | 0.01    | 0.002          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 9               |           |          | 672      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.01    | 0.01    | 0.002    | 8                      |                 |        | 720   | 0.01   | 0.01    | 0.002          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 7               |           |          | 672      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.01    | 0.01    | 0.002    | 7                      |                 |        | 720   | 0.01   | 0.01    | 0.003          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 9               | October   | 2015     | 672      | 0.01 | 0.01           | 0.005  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 7                      | October         | 2015   | 638   | 0.01   | 0.01    | 0.007          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 8               |           |          | 672      | 0.01 | 0.01           | 0.005  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 8                      |                 |        | 638   | 0.01   | 0.01    | 0.006          | 0.02   | 0.01    | 0.002   |          |                        |       |       |
| 7               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.02    | 0.003    | 7                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.003          | 0.02   | 0.02    | 0.004   |          |                        |       |       |
| 9               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.009  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 9                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.003          | 0.04   | 0.04    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 8               | November  | 2015     | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 8                      | November        | 2015   | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.004          | 0.02   | 0.01    | 0.002   |          |                        |       |       |
| 7               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.009  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 7                      |                 |        | 202   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 9               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 9                      |                 |        | 202   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.01    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 8               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.004  | 0.02    | 0.01    | 0.002    | 8                      |                 |        | 109   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.01    | 0.002   |          |                        |       |       |
| 7               | December  | 2014     | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.005  | 0.02    | 0.02    | 0.002    | 7                      | December        | 2014   | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.02    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 9               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.005  | 0.02    | 0.02    | 0.002    | 9                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.02    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 8               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.005  | 0.02    | 0.02    | 0.002    | 8                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.02    | 0.003   |          |                        |       |       |
| 7               |           |          | 744      | 0.01 | 0.01           | 0.005  | 0.02    | 0.02    | 0.002    | 7                      |                 |        | 744   | 0.01   | 0.01    | 0.005          | 0.02   | 0.02    | 0.003   |          |                        |       |       |

W ramach cyklu prac wyznaczyłam również **średni roczny poziom stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn** w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu oraz w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. W podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu w korytarzu izolowanym obudową górniczą (SRDN-3 No. 3) średnia roczna wartość

stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wyniosła około  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . Natomiast w spekanym, zwietrzałym wyrobisku (SRDN-3 No. 4) była ponad 2-krotnie większa i przekroczyła  $2500 \text{ Bq/m}^3$  (Tab. 9). Rezultaty badań przedstawiłam w artykule: *The assesment of lining structure impact on radon baheviour inside selected underground workings under the cour d'honneur of Książ castle* opublikowanym w 2020 roku na łamach Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (pozycja 4, Tab. 1).

Tab. 9. Podstawowe statystyki opisowe dla wartości stężeń aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowanych w latach 2016 – 2017 w dwóch punktach pomiarowych w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu. Tabela pochodzi z artykułu nr 4 (Tab. 1).

| Number of SRDN-3 probe | Year of measurements | Number of analysed data | $^{222}\text{Rn}$ activity concentration |        |         |         |          |                                  |
|------------------------|----------------------|-------------------------|--|--------|---------|---------|----------|----------------------------------|
|                        |                      |                         | Average                                  | Median | Minimum | Maximum | Interval | Standard deviation ( $1\delta$ ) |
|                        |                      | (-)                     | (Bq/m <sup>3</sup> )                     |        |         |         |          |                                  |
| 3                      | 2016                 | 8760                    | 976                                      | 950    | 91      | 2434    | 2343     | 366                              |
| 3                      | 2017                 | 8760                    | 976                                      | 911    | 91      | 2434    | 2343     | 379                              |
| 4                      | 2016                 | 8760                    | 2714                                     | 2668   | 1224    | 4772    | 3549     | 521                              |
| 4                      | 2017                 | 8760                    | 2584                                     | 2544   | 1059    | 4442    | 3383     | 501                              |

Na podstawie pomiarów prowadzonych od 2014 do 2015 roku w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu wskazałam, że w strefie uskoku notowane wartości mogą przekraczać  $3200 \text{ Bq/m}^3$  w ciągu roku. Wyniki badań w tym zakresie przedyskutowałam w artykule współautorskim: *First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland) opublikowanym w Journal of Environmental Radioactivity* w 2016 roku (pozycja nr 5, Tab. 1).

W nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej **średnie roczne wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były inne na każdym stanowisku pomiarowym** (Tab. 10). Dla pierwszego stanowiska pomiarowego (sonda nr 7) wyniosły  $3179 \text{ Bq/m}^3$  w 2013 roku,  $2973 \text{ Bq/m}^3$  w 2014 roku,  $2859 \text{ Bq/m}^3$  w 2015 roku oraz  $2886 \text{ Bq/m}^3$  w 2016 roku (Tab. 10). Dla drugiego stanowiska pomiarowego (sonda nr 8) średnie roczne wartości stężenia aktywności radonu były równe  $2689 \text{ Bq/m}^3$  w 2014 roku,  $2917 \text{ Bq/m}^3$  w 2015 roku oraz  $3719 \text{ Bq/m}^3$  w 2016 roku (Tab. 10). W dwóch kolejnych latach wartości te były podobne. Na trzecim stanowisku pomiarowym (sonda nr 9) średnie roczne wartości stężenia aktywności radonu były zbliżone. W kolejnych latach badań i wyniosły:  $2690 \text{ Bq/m}^3$  w 2013 roku,  $2676 \text{ Bq/m}^3$  w 2014 roku,  $2587 \text{ Bq/m}^3$  w 2015 roku oraz  $2581 \text{ Bq/m}^3$  w 2016 roku (Tab. 10). Wyniki badań przedstawiłam w artykule współautorskim: *A comprehensive characteristic of  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of bear cave in Kletno, Poland* opublikowanym w Radiation Protection Dosimetry w 2020 roku (poz. 6, Tab. 1).

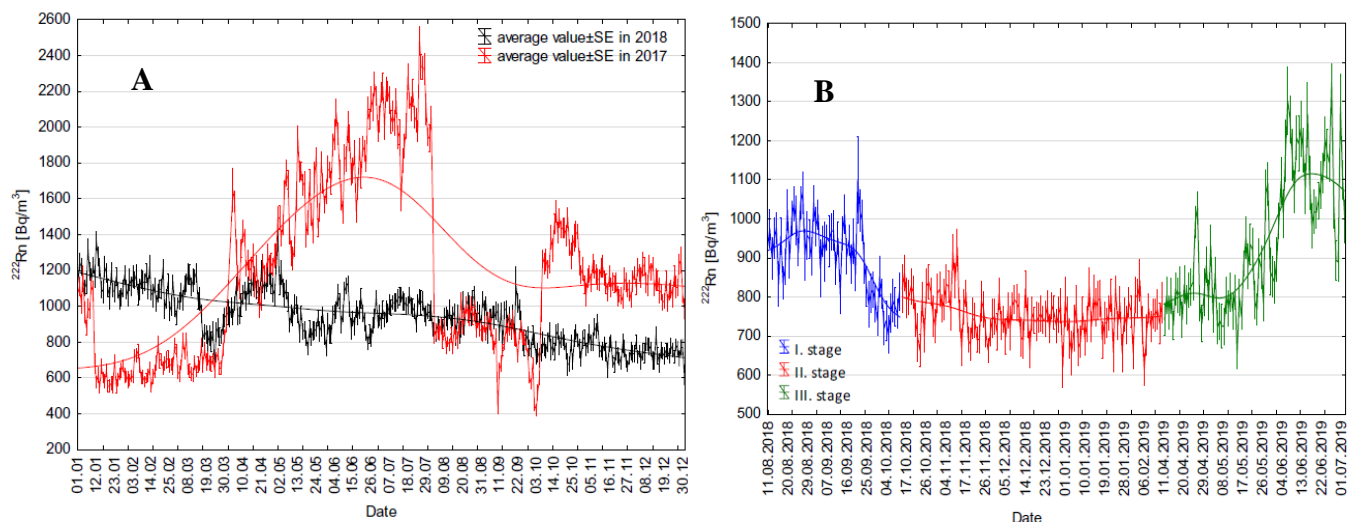
Tab. 10. Podstawowe statystyki opisowe dla wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowane w latach 2013–2016 w trzech punktach pomiaru w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Wyjaśnienie: średnią arytmetyczną podano jako średnią. Tabela pochodzi z artykułu nr 6 (Tab. 1).

| Number of probe | Year-time series | Data | $^{222}\text{Rn}$ activity concentration |        |         |         |          |                                 |
|-----------------|------------------|------|--|--------|---------|---------|----------|---------------------------------|
|                 |                  |      | Average                                  | Median | Minimum | Maximum | Interval | Standard deviation ( $\delta$ ) |
|                 | [year-month]     | (-)  | [Bq m <sup>-3</sup> ]                    |        |         |         |          |                                 |
| 7               | 2013-10          | 2846 | 3179                                     | 3151   | 1051    | 6140    | 5089     | 883                             |
| 9               | 2013-10          | 2846 | 2690                                     | 2635   | 933     | 5800    | 4867     | 628                             |
| 7               | 2014-12          | 6280 | 2973                                     | 2901   | 766     | 6354    | 5587     | 848                             |
| 9               | 2014-12          | 6280 | 2676                                     | 2635   | 865     | 5596    | 4731     | 652                             |
| 8               | 2014-2           | 1573 | 2689                                     | 2426   | 868     | 6264    | 5396     | 1038                            |
| 7               | 2015-12          | 8760 | 2859                                     | 2795   | 659     | 9592    | 8933     | 896                             |
| 9               | 2015-12          | 8760 | 2587                                     | 2533   | 627     | 9170    | 8544     | 695                             |
| 8               | 2015-12          | 8760 | 2917                                     | 2692   | 868     | 7518    | 6650     | 961                             |
| 7               | 2016-7           | 4608 | 2885                                     | 2830   | 695     | 6318    | 5623     | 847                             |
| 9               | 2016-7           | 4608 | 2581                                     | 2533   | 899     | 5222    | 4323     | 611                             |
| 8               | 2016-7           | 4608 | 3719                                     | 3718   | 1286    | 6644    | 5358     | 755                             |

Rezultaty moich badań potwierdzają, że w Polsce narażenie zawodowe na promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu jest problemem występującym praktycznie we wszystkich obiektach podziemnych Sudetów i Przedgórz Sudeckiego. Wobec czego tak istotne jest, aby obiekty podziemne mające stanowić atrakcje turystyczne, zostały objęte pomiarami stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  na każdym etapie ich dostępności. Takie podejście nie było dotychczas prezentowane w literaturze. Prace pionierskie w tym zakresie stanowią moje dwa współautorskie artykuły naukowe. Pierwszy z nich o tytule: *Assessment of occupational exposure from radon in the newly formed underground tourist route under Książ castle, Poland* opublikowałam w 2021 roku w Radiation and Environmental Biophysics (poz. 7, Tab. 1). Przedstawiłam w nim **rozwiązania dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego osób zwiedzających i z obsługi ruchu na trzech etapach tworzenia nowego obiektu użyteczności publicznej (podziemnej trasy turystycznej)** pod dziedzińcem zamku Książ w Wałbrzychu. Do interpretacji wielkości narażenia wykorzystałam miesięczne i dobowe okresy pomiarowe z każdego etapu powstawania podziemnej trasy turystycznej, tj.: przygotowania podziemi od 10.2016 do 07.2018, uruchamiania i otwarcia trasy turystycznej od 07.2018 do 10.2018, eksploatacji turystycznej obiektu od 15.10.2018 do 02.07.2019. Sezonowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występowały w całym okresie pomiarowym, jednak ich przebieg wyglądał inaczej w okresach zaburzonych i niezaburzonych pracami udostępniającymi (Rys. 21 A, B). Zaobserwowałam, że od października 2016 roku do października 2017 roku (w okresie niezakłóconym pracami) sezonowa zmienność stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  była typowa dla obiektów podziemnych. Mniejsze wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  notowałam jesienią i zimą (Tab. 11). Wzrost wartości był widoczny od kwietnia do początku sierpnia 2017 roku. Początek wzrostu i początek spadku wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  nakładał się z tzw. okresami przejściowymi, występującymi w obiektach podziemnych dobrze izolowanych od atmosfery odpowiednio wczesną wiosną i jesienią. **Było to zjawisko już rozpoznane i potwierdzające ograniczenie lub niemal zupełne hamowanie naturalnego, grawitacyjnego przepływu powietrza.** Proces ten był efektem niewielkiej różnicy temperatur powietrza pomiędzy wnętrzem obiektu (stała temp. 10,2°C), a otoczeniem. Utrudniona cyrkulacja, a tym samym wymiana powietrza sprawiała, że wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w okresie trwającym od kwietnia 2017 roku do początku sierpnia były najwyższe w roku. W tym czasie  $^{222}\text{Rn}$  gromadził się wewnątrz obiektu podziemnego.

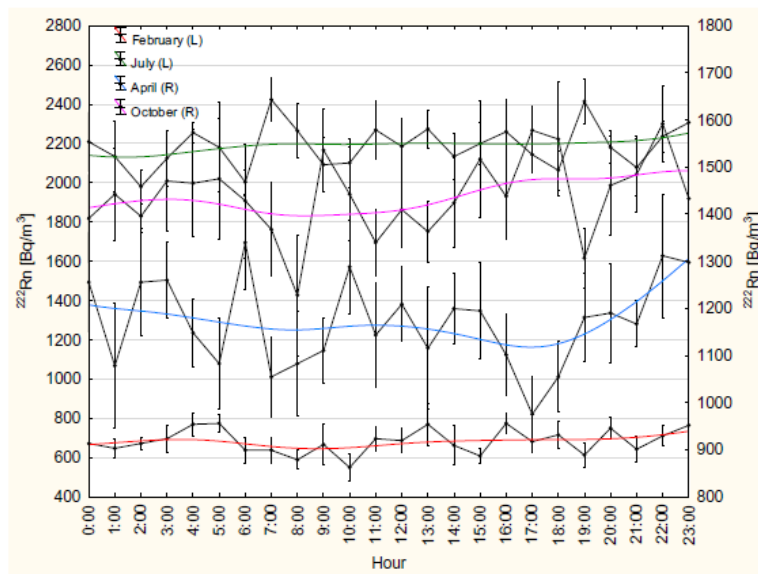
Zwłaszcza w początkowej (kwiecień), jak i końcowej części (sierpień) tego okresu stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  podlegało znacznym wahaniom. Były to okresy przejściowe, kiedy temperatura powietrza atmosferycznego w ciągu doby oscylowała wokół średniej temperatury wnętrza obiektu. Średni poziom stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w okresie od kwietnia do sierpnia 2017 roku wynosił od 1200 Bq/m<sup>3</sup> do 2100 Bq/m<sup>3</sup>. Wartości stężenia aktywności radonu malały i rosły w przedziale 800 Bq/m<sup>3</sup> – 2400 Bq/m<sup>3</sup> (Rys. 21A). Ze względu na wyjątkowo chłodny sierpień i wrzesień 2017 roku w tych dwóch miesiącach odnotowałam znacznie mniejsze wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  – z przedziału 400 Bq/m<sup>3</sup> – 1000 Bq/m<sup>3</sup>. Wróciły one do typowych letnich wartości (1200 Bq/m<sup>3</sup> – 1500 Bq/m<sup>3</sup>) na początku października 2017 roku. Następnie zaobserwowałam typowy spadek wartości wraz z rozpoczynającą się jesienią (Rys. 21A). Charakterystyczne dla zimy wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występowały od stycznia do marca 2017 roku i wynosiły one od 500 Bq/m<sup>3</sup> do 800 Bq/m<sup>3</sup>. W okresie powodującym zaburzenie naturalnej wentylacji pracami udostępniającymi sezonowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  miały inny przebieg. Charakteryzowały się mniejszą amplitudą zmian w stosunku do okresu niezaburzonego pracami udostępniającymi (Rys. 21B). Stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  oscylowało w zakresie 100 Bq/m<sup>3</sup> – 200 Bq/m<sup>3</sup> w stosunku do wartości średniej (Rys. 21A). **Sezonowy charakter zmian pozostał jednak zachowany.** Większe wartości występowały w cieplejszych miesiącach roku, mniejsze w okresie jesienno–zimowym (Rys. 21, Tab. 11). Średnio w okresach cieplejszych wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  utrzymywały się na poziomie 1000 Bq/m<sup>3</sup> – 1100 Bq/m<sup>3</sup> (Tab. 11). Od listopada do przełomu marca, początku kwietnia wartości średnie malały do 700 Bq/m<sup>3</sup> do 800 Bq/m<sup>3</sup> (Rys. 21).

Po otwarciu podziemnej trasy turystycznej dla zwiedzających zauważyłam z jednej strony niewielkie obniżenie stężenia radonu wewnątrz obiektu, kosztem zwiększonej amplitudy zmian sezonowych. Efektywność wentylacji zwiększyła się również wraz z otwarciem nowych wyrobisk. Mimo to **średnie roczne wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były nadal większe, niż zalecane jako maksymalne dopuszczalne** stężenie radonu w obiektach podziemnych ( $500 - 1500 \text{ Bq/m}^3$ ), a także wielokrotnie większe od wartości rekomendowanych Dyrektywą Rady Unii Europejskiej dla miejsc pracy ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ). Wyniosły odpowiednio  $1179 \text{ Bq/m}^3$  w 2017 roku i  $943 \text{ Bq/m}^3$  w 2018 roku (Tab. 11).



Rys. 21. Przebieg zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowany w podziemiach pod dziedzińcem Zamku Książ od 01.01.2017 r. do 31.12.2017 r. oraz od 01.01.2018 r. do 31.12.2018 (A) oraz przebieg zmian stężenia zarejestrowany w kolejnych etapach powstawania obiektu (B): etap I – prace adaptacyjne od 11.08.2018 do 10.10.2018, etap II – otwarcie trasy turystycznej od 15.10.2018 r. do 10.04.2019 r., etap III – eksploatacja obiektu i monitoring narażenia na promieniowanie jonizujące od 11.04.2019 r. do 02.07.2019 r. Objaśnienia: Linia ciągła – średnia ruchoma wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , SE – błąd standardowy. Wykresy pochodzą z publikacji nr 7 (Tab. 1).

Okresowi niezaburzonemu pracami udostępniającymi przyjrzałam się w aspekcie zmian dobowych stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Analizy przeprowadziłam na przykładzie siedmiu dni przypadających w miesiącach reprezentujących każdą z 4 pór roku kalendarzowego. Dla wiosny wybrałam kwiecień, dla lata lipiec, jesienią październik, a dla zimy luty (Rys. 22). Zmiany dobowe rejestrowane zimą i latem miały podobny przebieg (Rys. 22). Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  podlegały w obu przypadkach małym, jednak nieregularnym wahaniom (Rys. 22). Zimą wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zmieniały się o około  $100 \text{ Bq/m}^3$  w stosunku do wartości średniej na poziomie bliskim  $700 \text{ Bq/m}^3$  (Rys. 22). Podobna sytuacja wystąpiła latem (Rys. 22). Notowane wartości zmieniały się o około  $200 \text{ Bq/m}^3$  w stosunku do wartości średniej. Latem stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były ponad 3-krotnie większe od wartości średnich rejestrowanych zimą. Zarówno zimą, jak i latem trudno było mi jednoznacznie wskazać okresy w ciągu doby o wyraźnie większych lub wyraźnie mniejszych wartościach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . W obu przypadkach wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  utrzymywały się na praktycznie stałym średnim poziomie w ciągu doby, odpowiednio mniejszym zimą, a większym latem (Rys. 22). **Świadczyło to o ustalonych warunkach wentylacji naturalnej, która była stała i wydajna zimą, a stała i bardzo mało wydajna latem.**



Rys. 22. Przebieg godzinowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w ciągu 7 kolejnych dni zimą (13–20 lutego 2017 r.), wiosną (13–20 kwietnia 2017 r.), latem (13–20 lipca 2017) i jesienią (13–20 października 2017), w okresie niezakłóconym przez prace budowlane. Objasnienia: Linie ciągłe: dopasowanie średnią ruchomą, R — prawa oś y, L – lewa oś y. Wykres pochodzi z publikacji nr 7 (Tab. 1).

Tab. 11. Stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowane w całym okresie obserwacji od 28.10.2016 do 02.07.2019 r. w podziemnej trasie turystycznej pod dziedzińcem Zamku Książ. Tabela pochodzi z publikacji nr 7 (Tab. 1).

| Measurement period           | Number of hourly measurements | Average (Bq/m <sup>3</sup> ) | Median (Bq/m <sup>3</sup> ) | Minimum (Bq/m <sup>3</sup> ) | Maximum (Bq/m <sup>3</sup> ) | Standard deviation (Bq/m <sup>3</sup> ) | Standard error (Bq/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| 01.01.–31.12.2017            | 8675                          | 1179                         | 1087                        | 130                          | 3629                         | 538                                     | 5.8                                 |
| 01.01.–31.12.2018            | 8754                          | 943                          | 938                         | 88                           | 3255                         | 280                                     | 3.0                                 |
| <b>28.10.2016–02.07.2019</b> | <b>23,370</b>                 | <b>1025</b>                  | <b>938</b>                  | <b>88</b>                    | <b>3629</b>                  | <b>419</b>                              | <b>2.7</b>                          |
| 01.01.–31.01.2017            | 744                           | 747                          | 714                         | 130                          | 1648                         | 292                                     | 10.7                                |
| 01.01.–31.01.2018            | 744                           | 1153                         | 1125                        | 377                          | 2096                         | 264                                     | 9.7                                 |
| 01.01.–31.01.2019            | 744                           | 743                          | 751                         | 116                          | 1536                         | 228                                     | 8.3                                 |
| 01.02.–28.02.2017            | 672                           | 662                          | 637                         | 169                          | 1379                         | 185                                     | 7.1                                 |
| 01.02.–28.02.2018            | 672                           | 1102                         | 1087                        | 452                          | 2021                         | 259                                     | 10.0                                |
| 01.02.–28.02.2019            | 672                           | 745                          | 751                         | 116                          | 1760                         | 232                                     | 9.0                                 |
| 01.03.–31.03.2017            | 744                           | 704                          | 676                         | 247                          | 1340                         | 186                                     | 6.8                                 |
| 01.03.–31.03.2018            | 744                           | 968                          | 975                         | 228                          | 1872                         | 280                                     | 10.3                                |
| 01.03.–31.03.2019            | 744                           | 767                          | 751                         | 88                           | 1648                         | 226                                     | 8.3                                 |
| 01.04.–30.04.2017            | 638                           | 1243                         | 1237                        | 489                          | 2395                         | 301                                     | 11.9                                |
| 01.04.–30.04.2018            | 718                           | 1077                         | 1087                        | 302                          | 1984                         | 267                                     | 10.0                                |
| 01.04.–30.04.2019            | 720                           | 817                          | 788                         | 153                          | 1723                         | 234                                     | 8.7                                 |
| 01.05.–31.05.2017            | 744                           | 1584                         | 1573                        | 639                          | 2844                         | 338                                     | 12.4                                |
| 01.05.–31.05.2018            | 744                           | 945                          | 938                         | 116                          | 1947                         | 270                                     | 9.9                                 |
| 01.05.–31.05.2019            | 744                           | 833                          | 826                         | 228                          | 1797                         | 254                                     | 9.3                                 |
| 01.06.–30.06.2017            | 720                           | 1878                         | 1872                        | 826                          | 3180                         | 359                                     | 13.4                                |
| 01.06.–30.06.2018            | 720                           | 950                          | 938                         | 302                          | 1797                         | 244                                     | 9.1                                 |
| 01.06.–30.06.2019            | 720                           | 1115                         | 1087                        | 228                          | 2209                         | 318                                     | 11.8                                |
| 01.07.–31.07.2017            | 741                           | 2091                         | 2059                        | 788                          | 3629                         | 369                                     | 13.6                                |
| 01.07.–31.07.2018            | 741                           | 996                          | 975                         | 265                          | 1947                         | 236                                     | 8.7                                 |
| 01.08.–31.08.2017            | 744                           | 942                          | 863                         | 265                          | 2732                         | 324                                     | 11.9                                |
| 01.08.–31.08.2018            | 744                           | 932                          | 938                         | 116                          | 1685                         | 247                                     | 9.0                                 |
| 01.09.–20.09.2017            | 720                           | 798                          | 788                         | 190                          | 1648                         | 221                                     | 8.3                                 |
| 01.09.–30.09.2018            | 720                           | 917                          | 900                         | 153                          | 3255                         | 267                                     | 10.0                                |
| 28.10.–31.10.2016            | 85                            | 1319                         | 1349                        | 601                          | 2358                         | 314                                     | 34.1                                |
| 01.10.–31.10.2017            | 744                           | 1207                         | 1274                        | 190                          | 2321                         | 415                                     | 15.2                                |
| 01.10.–31.10.2018            | 743                           | 779                          | 751                         | 88                           | 1461                         | 234                                     | 8.6                                 |
| 01.11.–30.11.2016            | 720                           | 1191                         | 1199                        | 489                          | 2096                         | 266                                     | 9.9                                 |
| 01.11.–30.11.2017            | 720                           | 1130                         | 1125                        | 415                          | 1910                         | 251                                     | 9.4                                 |
| 01.11.–30.11.2018            | 720                           | 763                          | 751                         | 190                          | 1386                         | 213                                     | 7.9                                 |
| 01.12.–31.12.2016            | 744                           | 1105                         | 1106                        | 489                          | 2171                         | 259                                     | 9.5                                 |
| 01.12.–31.12.2017            | 744                           | 1134                         | 1125                        | 302                          | 1984                         | 259                                     | 9.5                                 |
| 01.12.–31.12.2018            | 744                           | 744                          | 751                         | 116                          | 1237                         | 210                                     | 7.7                                 |

The bold values indicate the entire measurement period



Dobowe, cyklicznie powtarzające się zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występowały tylko w kwietniu oraz październiku, i tylko poza okresem prac budowlanych w obiekcie. Potwierdziłam, że w pozostałych okresach w ciągu roku dobowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , ze względu na swój nieregularny charakter nie będą miały znaczenia przy planowaniu optymalnych godzin pracy w narażeniu na promieniowanie jonizujące. Wartość średnia efektywnej dawki promieniowania dla roku 2017 i 2018 oraz dla całego okresu pomiarów wyniosła 0,004 mSv/h (Tab. 12). Wartość maksymalną równą 0,014 mSv/h oszacowałam w lipcu 2017 roku, a minimalną wynoszącą 0,0004 mSv/h obliczyłam dla maja i sierpnia 2018 roku. Pod względem ochrony radiologicznej najbezpieczniejszymi miesiącami pracy w okresie zimowym były styczeń–marzec, a w trakcie jesieni od października (w roku 2017 od wyjątkowo zimnego sierpnia) i kończąc na grudniu. Wskazałam, że wiosną i latem wartości dawki efektywnej promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu były największe. Pracownicy podziemnej trasy turystycznej powinni zostać przydzieleni do odpowiedniej kategorii narażenia (Tab. 12).

Tab. 12. Wartości efektywnej dawki promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  otrzymywane w ciągu 1 godziny (A) oraz według harmonogramu dnia pracy przewodników (czasu efektywnie przepracowanego) w 2018 roku (B) w podziemnej trasie turystycznej pod dziedzińcem Zamku Książ. Tabele pochodzą z publikacji nr 7 (Tab. 1).

| Measurement period<br><b>A</b> | Number of hourly measurements | Effective dose rates                  |                            |                 |                 |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
|                                |                               | Average $\pm$ standard error (mSv/h)  | Standard deviation (mSv/h) | Maximum (mSv/h) | Minimum (mSv/h) |
| 01.01.2017–31.12.2017          | 8675                          | 0.004 $\pm$ 0.00002                   | 0.002                      | 0.01            | 0.0005          |
| 01.01.2018–31.12.2018          | 8754                          | 0.004 $\pm$ 0.00001                   | 0.001                      | 0.01            | 0.0003          |
| <b>28.10.2016–02.07.2019</b>   | <b>23,370</b>                 | <b>0.004 <math>\pm</math> 0.00001</b> | <b>0.002</b>               | <b>0.01</b>     | <b>0.0003</b>   |
| 01.01.–31.01.2017              | 744                           | 0.003 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.006           | 0.0005          |
| 01.01.–31.01.2018              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.008           | 0.001           |
| 01.01.–31.01.2019              | 744                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.006           | 0.0004          |
| 01.02.–28.02.2017              | 672                           | 0.002 $\pm$ 0.00003                   | 0.0007                     | 0.005           | 0.0006          |
| 01.02.–28.02.2018              | 672                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.008           | 0.002           |
| 01.02.–28.02.2019              | 672                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.007           | 0.0004          |
| 01.03.–31.03.2017              | 744                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0007                     | 0.005           | 0.0009          |
| 01.03.–31.03.2018              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.0011                     | 0.007           | 0.0009          |
| 01.03.–31.03.2019              | 744                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.006           | 0.0003          |
| 01.04.–30.04.2017              | 638                           | 0.005 $\pm$ 0.00005                   | 0.001                      | 0.009           | 0.002           |
| 01.04.–30.04.2018              | 718                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.007           | 0.001           |
| 01.04.–30.04.2019              | 720                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.006           | 0.0006          |
| 01.05.–31.05.2017              | 744                           | 0.006 $\pm$ 0.00005                   | 0.001                      | 0.011           | 0.002           |
| 01.05.–31.05.2018              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.007           | 0.0004          |
| 01.05.–31.05.2019              | 744                           | 0.003 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.007           | 0.0009          |
| 01.06.–30.06.2017              | 720                           | 0.007 $\pm$ 0.00005                   | 0.001                      | 0.012           | 0.003           |
| 01.06.–30.06.2018              | 720                           | 0.004 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.007           | 0.001           |
| 01.06.–30.06.2019              | 720                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.008           | 0.0009          |
| 01.07.–31.07.2017              | 741                           | 0.008 $\pm$ 0.00005                   | 0.001                      | 0.014           | 0.003           |
| 01.07.–31.07.2018              | 741                           | 0.004 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.007           | 0.001           |
| 01.08.–31.08.2017              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00005                   | 0.001                      | 0.010           | 0.001           |
| 01.08.–31.08.2018              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.006           | 0.0004          |
| 01.09.–30.09.2017              | 720                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0008                     | 0.006           | 0.0007          |
| 01.09.–30.09.2018              | 720                           | 0.003 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.01            | 0.0006          |
| 01.10.–31.10.2016              | 85                            | 0.005 $\pm$ 0.0001                    | 0.001                      | 0.009           | 0.002           |
| 01.10.–31.10.2017              | 744                           | 0.005 $\pm$ 0.0006                    | 0.002                      | 0.009           | 0.0007          |
| 01.10.–31.10.2018              | 743                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0009                     | 0.006           | 0.0003          |
| 01.11.–30.11.2016              | 720                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.008           | 0.002           |
| 01.11.–30.11.2017              | 720                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.0009                     | 0.007           | 0.002           |
| 01.11.–30.11.2018              | 720                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0008                     | 0.005           | 0.0007          |
| 01.12.–31.12.2016              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.008           | 0.002           |
| 01.12.–31.12.2017              | 744                           | 0.004 $\pm$ 0.00004                   | 0.001                      | 0.007           | 0.001           |
| 01.12.–31.12.2018              | 744                           | 0.003 $\pm$ 0.00003                   | 0.0008                     | 0.005           | 0.0004          |

The bold values indicate the entire measurement period

| Month<br><b>B</b>  | January | February | March | April | May   | June  | July  | August | September | October | November | December | 2018  |
|--|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------|---------|----------|----------|-------|
| Number of work hours spent under the ground by one guide | 23      | 24       | 34    | 59    | 120   | 108   | 121   | 124    | 61        | 53      | 28       | 29       | 784   |
| Maximum effective dose rate (mSv/h)                      | 0.007   | 0.005    | 0.005 | 0.009 | 0.011 | 0.012 | 0.014 | 0.010  | 0.006     | 0.009   | 0.008    | 0.008    | 0.014 |
| Effective dose rate (mSv)                                | 0.2     | 0.1      | 0.2   | 0.5   | 1.3   | 1.3   | 1.7   | 1.3    | 0.4       | 0.5     | 0.2      | 0.2      | 7.8   |

Drugim obiektem badań dla którego wykonałam kompleksową ocenę dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego osób zwiedzających i obsługi ruchu w nowo powstałej podziemnej trasie turystycznej były sztolnie w Krobicy. Wyniki prac opublikowałam w artykule współautorskim: *Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) as a tracer in natural ventilation efficiency assessment in underground workings – an example of „St John Mine” tourist complex in Krobica (the Sudetes, SW Poland)* na łamach Journal of Environmental Radioactivity w 2023

roku (art. 10, Tab. 1). W dyskusji skupiłam się na wynikach pomiarów wykonanych po wprowadzeniu działań zaradczych, jak otamowanie ślepego wyrobiska podczas prac adaptacyjnych obiektu do ruchu turystycznego, służących zmniejszeniu wielkości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Zauważyłam (Rys. 23), że przekroczenia średniej rocznej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  są charakterystyczne dla ośmiu miesięcy roku i trwają nieprzerwanie od października do maja. Zbieżność zaobserwowanych prawidłowości wystąpiła w dwóch kolejnych latach obserwacji (Rys. 23).

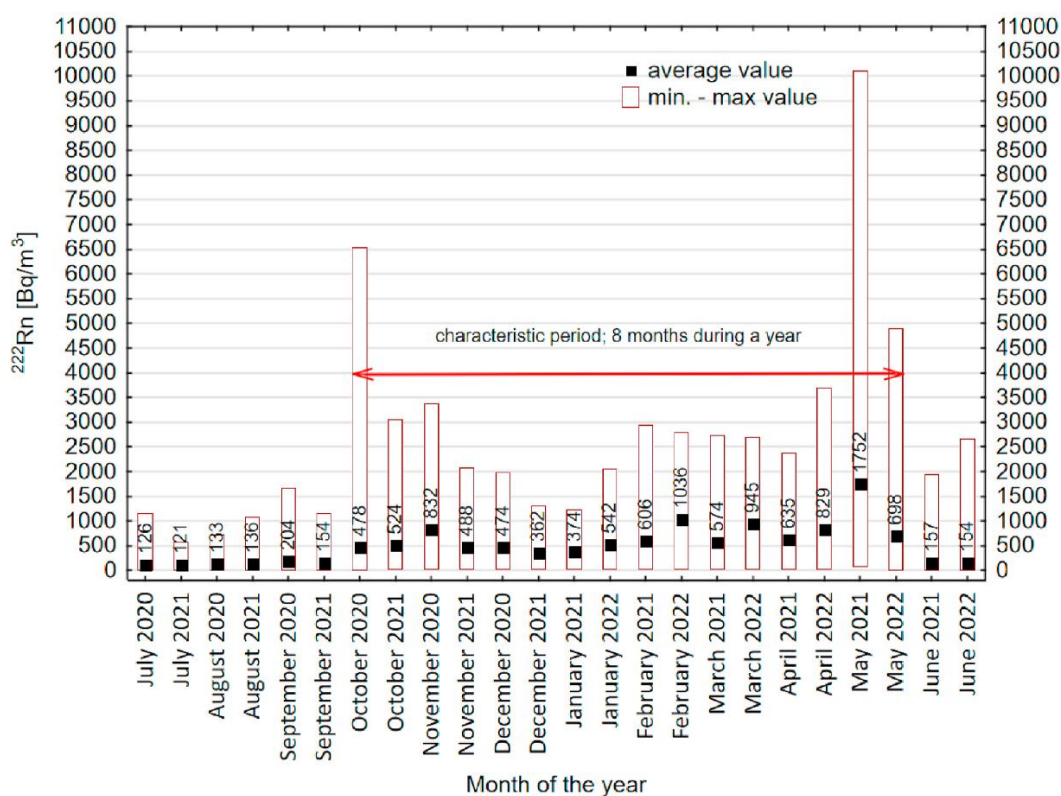
Spośród ośmiu miesięcy roku aż w pięciu notowane średnie wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były kilka razy większe od średniej rocznej rekomendowanej przepisami prawa w Polsce, tj.  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Taka sytuacja wystąpiła w listopadzie 2020 roku, w dwóch kolejnych latach w lutym, marcu, kwietniu oraz maju. Zauważyłam także, że spośród ośmiu miesięcy roku, w dwóch z nich (październik, maj) zakres zmienności dla rejestrowanych wartości sięgał od poziomu bliskiego LLD urządzenia pomiarowego (ok.  $80 \text{ Bq/m}^3$ ) do  $6500 \text{ Bq/m}^3$  w październiku oraz ponad  $10000 \text{ Bq/m}^3$  w maju. W pozostałych miesiącach roku średnie wartości stężenia aktywności radonu utrzymywały się na poziomie nie przekraczającym  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Najmniejsze i porównywalne w dwóch kolejnych latach obserwacji wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  odnotowałam w lipcu oraz sierpniu, nieznacznie większe w czerwcu oraz wrześniu (Rys. 23). **Należy przy tym zaznaczyć, że nawet wartości maksymalne były znacznie mniejsze od wartości notowanych przed otamowaniem ślepego wyrobiska – średnio od kilku razy do dwóch rzędów wielkości mniejsze. Miesiącami, w których zaobserwowałam wyraźne przekroczenia wartości dopuszczalnych odpowiadały okresy o małej intensywności naturalnego przewietrzania wyrobisk i zmniejszonej efektywności wymiany powietrza obiektu z atmosferą.** Wystąpiły one **jesienią w drugiej połowie września, w październiku, listopadzie oraz wiosną (w maju) i utrzymywały się od siedmiu do nawet czternastu dni. W czasie ich trwania bezpieczny z punktu widzenia ochrony radiologicznej pobyt w obiekcie był ograniczany do średnio 6 – 8 godzin w ciągu dnia, tj.: od 6:00 do 18:00 w październiku, od 11:00 do 18:00 w listopadzie oraz od 11:00 do 17:00 w maju.**

Osobnym zagadnieniem, które szeroko przedyskutowałam na łamach współautorskiej publikacji: *Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) as a tracer in natural ventilation efficiency assessment in underground workings – an example of „St John Mine” tourist complex in Krobica (the Sudetes, SW Poland)* z 2023 roku (art. 10, Tab. 1) była możliwość **zastosowania  $^{222}\text{Rn}$  jako znacznika wymiany powietrza pomiędzy wnętrzem obiektu a atmosferą.** Do analiz wykorzystałam szeroką bazę wyników pomiarów środowiskowych prowadzonych na różnych etapach dostępności sztolni. Pomiary chwilowe od roku 2010 do roku 2015 potraktowałam jako pomiary rozpoznawcze. Za kontrolne uznałam pomiary długookresowe prowadzone nieprzerwanie od lipca 2020 do czerwca 2022 roku – w funkcjonującej już w tym okresie podziemnej trasie turystycznej. Rozpoznałam warunki sprzyjające zatrzymaniu naturalnej wentylacji obiektu działającej w oparciu o zjawisko konwekcji.

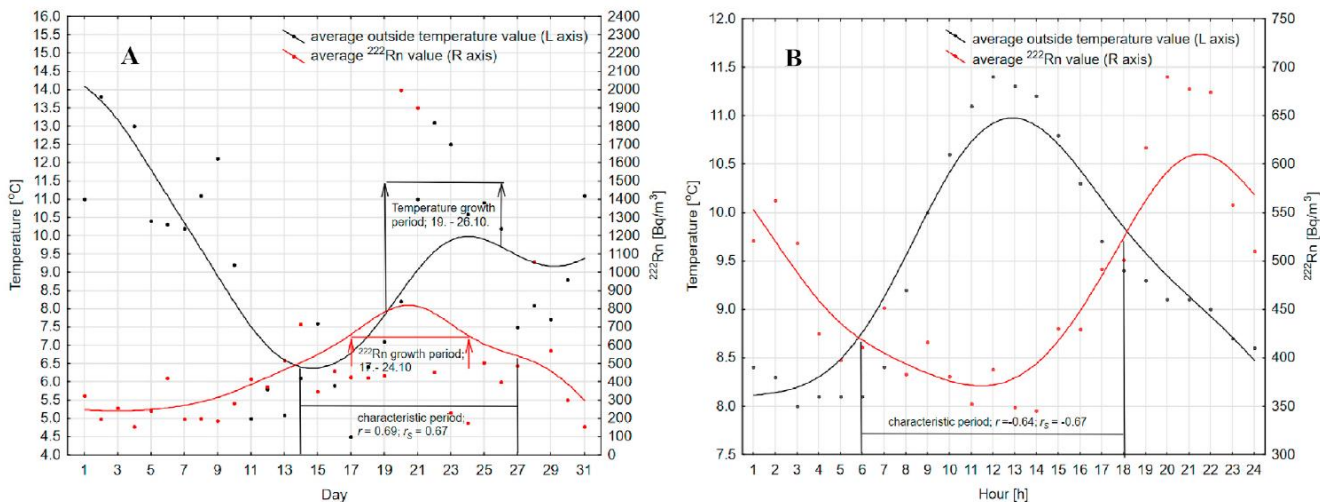
Na przykładzie sztolni w Krobicy ustaliłam, że w październiku zatrzymanie procesu wymiany powietrza pomiędzy podziemną trasą turystyczną a atmosferą trwa od dwóch do trzech dni, co jest związane z osiągnięciem przez powietrze atmosferyczne temperatury z zakresu  $6,5^\circ\text{C} - 10,0^\circ\text{C}$  (Rys. 24), a przez grunt z zakresu  $> 6,0^\circ\text{C} - 9,5^\circ\text{C}$  (Rys. 25). Utrudnieniom w procesie wymiany powietrza rozpoczynającym się w czternastej a kończącym w dwudziestej siódmej dobie miesiąca towarzyszy rosnący gradient temperatur w zakresie  $> -2,0$  do  $0^\circ\text{C}$  (Rys. 24A). W cyklu godzinowym natomiast (Rys. 24B) okres widocznego spadku wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występuje w ciągu dnia, tj. od 6:00 do 18:00. Nakłada się na niego okres wyraźnego wzrostu temperatury otoczenia od ponad  $8,5^\circ\text{C}$  do około  $11,0^\circ\text{C}$ . Dla temperatur  $\leq 8,5^\circ\text{C}$  wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  maleją. Podobne zależności odnotowałam w zestawieniu z temperaturą gruntu. Wraz z jej wzrostem, w zakresie  $8,0^\circ\text{C} - 11,5^\circ\text{C}$  wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  utrzymywały się na najniższym poziomie. Spadek temperatury gruntu poniżej  $8,5^\circ\text{C}$  indukował wyraźny wzrost stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Zauważyłam, że dla dodatniego gradientu temperatury wynoszącego od 0 do nieco ponad

2,0°C w październiku wartości stężenia aktywności radonu są najmniejsze. Obniżenie jego wartości do około 1,0 a nawet -0,5°C prowadziło do wzrostu wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Odnotowałam, że między godziną 6:00 a 15:00 prędkość wiatru miała wpływ na wielkość notowanego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Średnia prędkość wiatru wynosząca 1,5 m/s stanowiła granicę dla zauważalnych zmian wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Dla wiatrów o sile  $\leq 1,5$  m/s wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zaczynały rosnąć. Dla prędkości przekraczających 1,5 m/s wyraźnie malały.

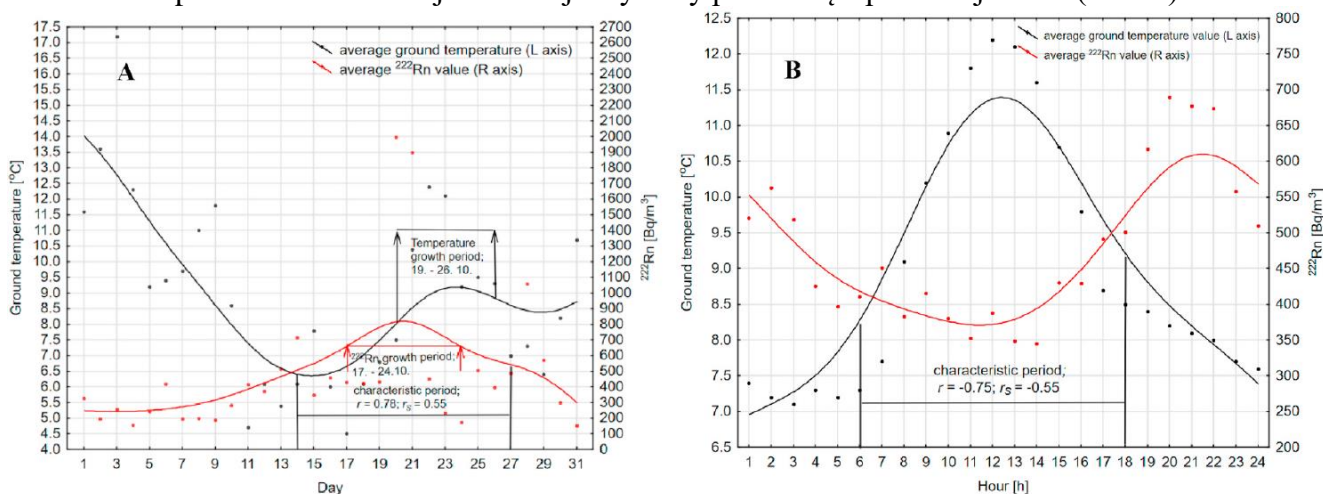
We wrześniu (Rys. 27) utrudnienia w procesie wymiany powietrza były powiązane z wyraźnym spadkiem temperatury powietrza atmosferycznego oraz temperatury gruntu. Rozpoczęły się one w II połowie (piętnasta doba) i trwały praktycznie do końca miesiąca (dwudziesta siódma doba). Towarzyszyło im szybkie obniżanie temperatury powietrza atmosferycznego do poziomu bliskiego średniej temperaturze wewnątrz obiektu (9,5°C–10,0°C). W maju samo zahamowanie procesu konwekcyjnej wymiany powietrza pomiędzy wnętrzem obiektu a atmosferą zajmowało aż 2 dni. Był to czas niezbędny na osiągnięcie przez powietrze atmosferyczne temperatury z zakresu  $> 8,5^\circ\text{C}$  do ponad  $12,0^\circ\text{C}$ , a przez grunt z zakresu  $> 9,5^\circ\text{C} - 12,5^\circ\text{C}$  (Rys. 28). Przy mniejszych wartościach temperatury powietrza, jak i temperatury gruntu dochodziło do wznowienia procesu naturalnej wymiany powietrza. W cyklu godzinowym maja (Rys. 28C, D) okresom o wyraźnie mniejszych wartościach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  towarzyszył wzrost temperatury otoczenia od nieco ponad  $10,5^\circ\text{C}$  do około  $11,5^\circ\text{C}$  trwający od godziny 11:00 do godziny 17:00 (Rys. 28C). Podobne prawidłowości zauważyłam względem temperatury gruntu (Rys. 28D).



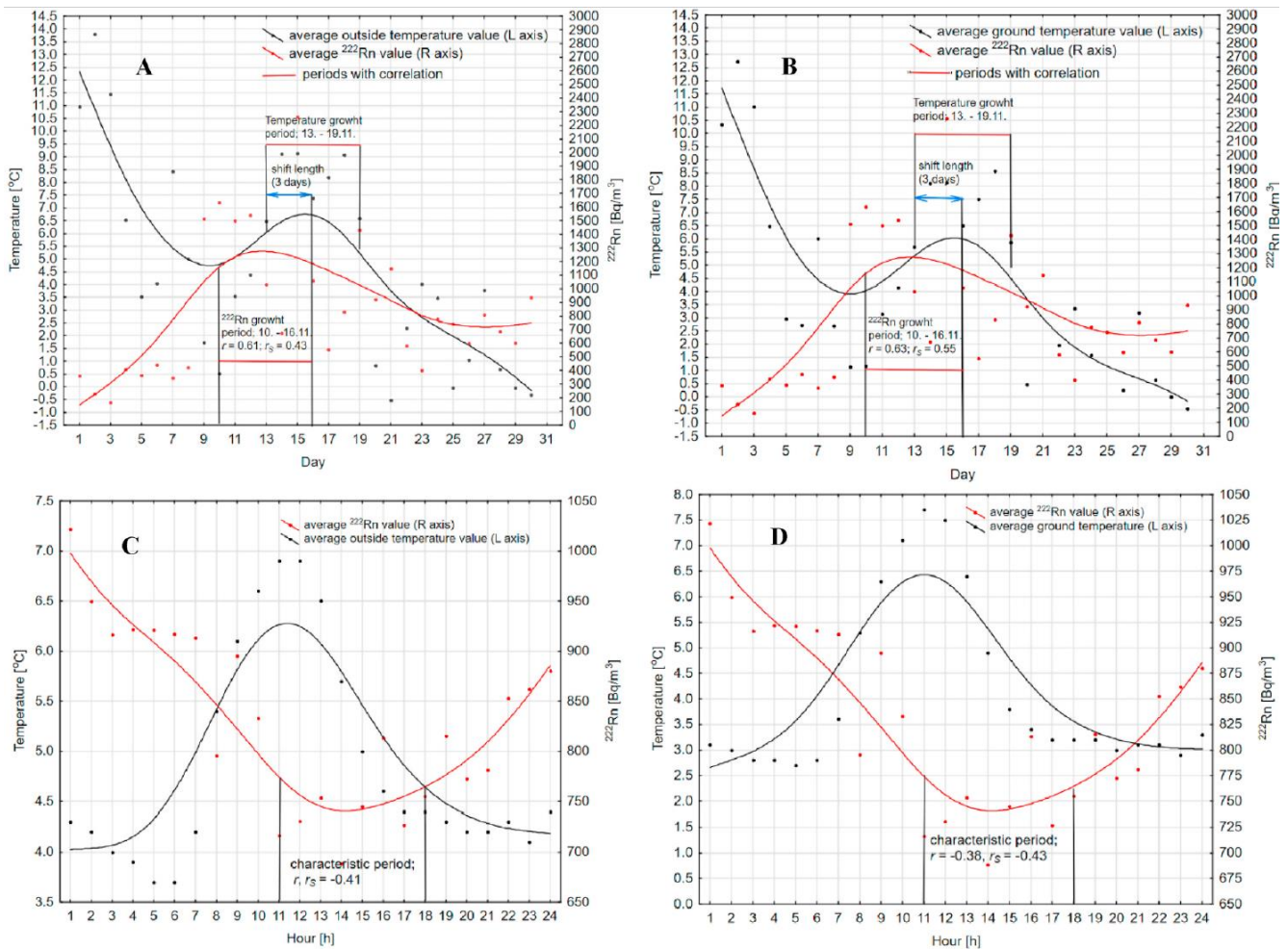
Rys. 23. Zakres zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowany dwukrotnie dla każdego z dwunastu miesięcy roku podczas 2-letniego okresu pomiarowego na podszyciu szybu Jan w podziemnej trasie turystycznej w Krobicy. Wykres pochodzi z publikacji nr 10 (Tab. 1).



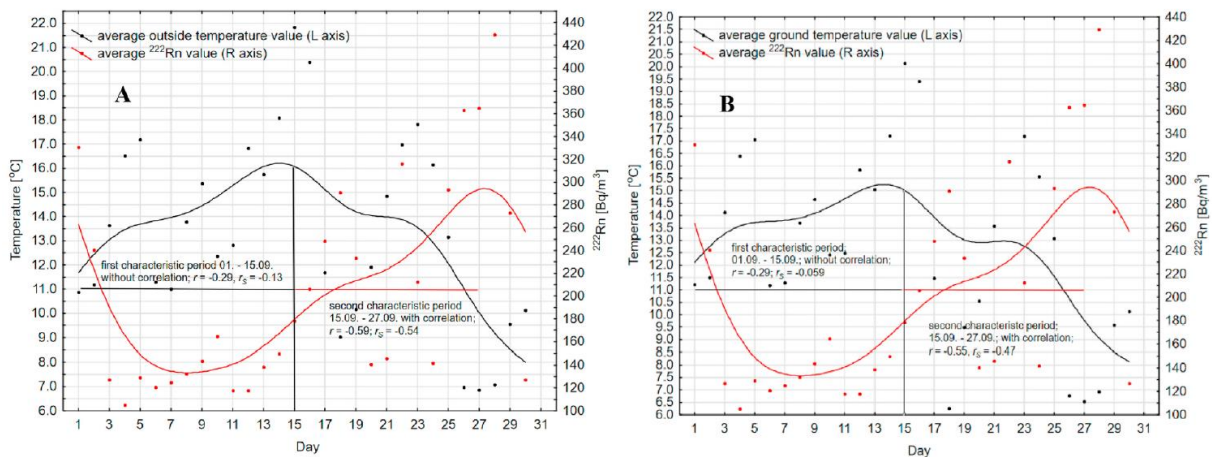
Rys. 24. Charakterystyka zmian średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowana w cyklu dobowym (A) i godzinowym (B) w październiku 2020 roku względem zmian średniej temperatury powietrza atmosferycznego. Objaśnienia: Punkty – wartości średnie z dopasowaniem średniej ruchomej. Wykresy pochodzą z publikacji nr 10 (Tab. 1).



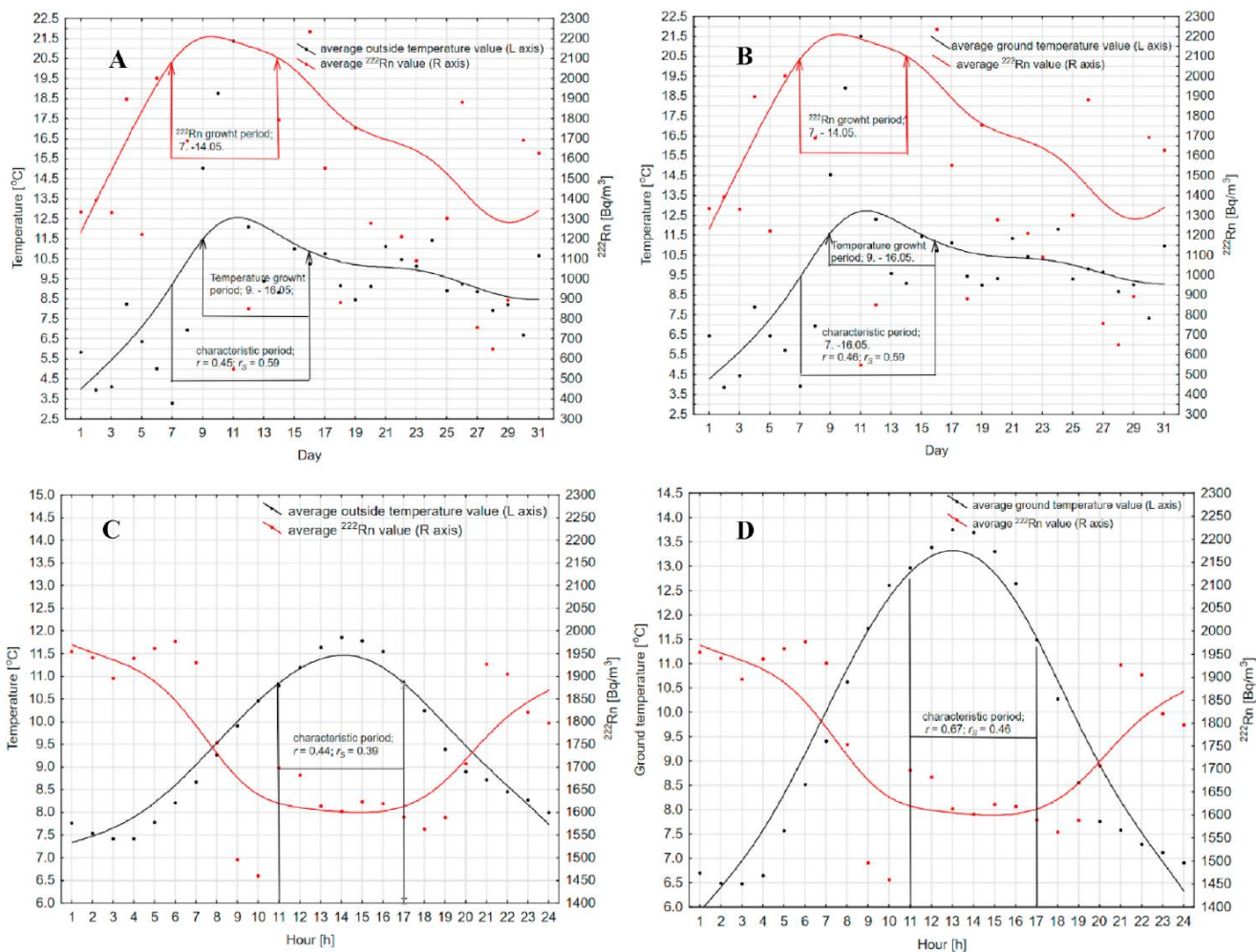
Rys. 25. Charakterystyka zmian średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowana w cyklu dobowym (A) i godzinowym (B) w październiku 2020 roku względem zmian średniej temperatury gruntu. Objaśnienia: Punkty – wartości średnie z dopasowaniem średniej ruchomej. Wykresy pochodzą z publikacji nr 10 (Tab. 1).



Rys. 26. Charakterystyka zmian średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  rejestrowana w listopadzie 2020 roku w cyklu dobowym względem zmian średniej temperatury powietrza atmosferycznego (A) i temperatury gruntu (B) oraz w cyklu godzinowym względem temperatury powietrza atmosferycznego (C) i temperatury gruntu (D).  
 Objasnienia: Punkty – wartości średnie z dopasowaniem średniej ruchomej. Wykresy pochodzą z publikacji nr 10 (Tab. 1).



Rys. 27. Charakterystyka zmian średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowana w cyklu dobowym we wrześniu 2020 roku względem zmian średniej temperatury powietrza atmosferycznego (A) i temperatury gruntu (B).  
 Objasnienia: Punkty – wartości średnie z dopasowaniem średniej ruchomej. Wykresy pochodzą z publikacji nr 10 (Tab. 1).



Rys. 28. Charakterystyka zmian średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowana w maju 2021 roku w cyklu dobowym względem średniej temperatury powietrza atmosferycznego (A) i temperatury gruntu (B) oraz w cyklu godzinowym względem temperatury powietrza atmosferycznego (C) i temperatury gruntu (D). Objaśnienia: Punkty – wartości średnie z dopasowaniem średniej ruchomej. Wykresy pochodzą z publikacji nr 10 (Tab. 1).

W cyklu godzinowym mają okresowi malejących wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  towarzyszył okres wzrostu temperatury gruntu w zakresie od nieco ponad 9,5°C do około 13,5°C. Wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wyraźnie malały wraz z rosnącym w zakresie  $> 2,0^\circ\text{C}$  do  $< 4,5^\circ\text{C}$  gradientem temperatury. Dla malejących wartości gradientu temperatury notowane wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były większe. Okresom o większych wartościach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  towarzyszyła prędkość wiatru mniejsza od 2,8 m/s. Okres o najmniejszych wartościach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  był dodatnio skorelowany z temperaturą gruntu ( $r = 0,67$ ), temperaturą powietrza atmosferycznego ( $r = 0,44$ ) i gradientem temperatury ( $r = 0,44$ ). Mało istotne statystycznie, ujemne zależności występowały pomiędzy stężeniem aktywności  $^{222}\text{Rn}$  a prędkością wiatru ( $r = -0,36$ ). Współczynniki korelacji rangowej Spearmana były porównywalne dla temperatury powietrza ( $r_s = 0,39$ ), temperatury gruntu ( $r_s = 0,46$ ) i gradientu temperatury ( $r_s = 0,39$ ).

Wyniki pomiarów szeroko przedyskutowane w ośmiu publikacjach cyklu wykorzystałam w **opracowaniu bazy miesięcznych i kwartalnych współczynników korekcyjnych służących szacowaniu średniego rocznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w atmosferze obiektów podziemnych, będących miejscami pracy.** Celem realizacji tak nowatorskiego w skali kraju, jak i w świecie zagadnienia była potrzeba znalezienia rozwiązania pozwalającego w szybki i prosty sposób określać średni roczny poziom stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w podziemnych miejscach pracy nie będących zakładami górnictwymi w Polsce. Takie podejście jest w mojej ocenie alternatywnym rozwiązaniem dla czaso-, praco- i kosztochłonnych pomiarów stężenia

aktywności radonu w kilku interwałach np.: rok, kwartał, miesiąc. Zaproponowane rozwiązanie obarczone jest znaczną niepewnością, ale pozwala dużo szybciej i taniej typować obiekty, w których średnie roczne stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  może przekroczyć  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Pozwala ono również na szybsze podjęcie działań prowadzących do zmniejszenia narażenia pracowników na niekorzystne skutki zdrowotne oddziaływania promieniowania jonizującego pochodzącego od radonu i jego promieniotwórczych pochodnych. W mojej opinii przyniesie to korzyści zarówno pracownikom, osobom zarządzającym pracownikami obiektów podziemnych, jak i kierownikom instytucji państwowych (w Polsce Głównemu Inspektorowi Sanitarnemu) sprawującym nad nimi kontrolę. Tego typu rozwiązanie oparte o wyznaczanie miesięcznych lub kwartalnych współczynników korekcyjnych było dotychczas stosowane do wyznaczania średniego rocznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w budynkach mieszkalnych w kilku krajach na świecie, w tym w Polsce (Kozak i in., 2011). W przypadku obiektów podziemnych jedynym źródłem danych w tym zakresie jest moja współautorska publikacja zatytułowana: *Monthly and quarterly correction factors for determining the mean annual radon concentration in the atmosphere of underground workplaces in Poland* opublikowana w Environmental Geochemistry and Health w 2022 roku (poz. 8, Tab. 1).

Tab. 13. Statystyki opisowe współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  (A) i  $k_{3m}$  (B). Tabela pochodzi z publikacji nr 8 (Tab. 1).

| Month     | $N_{\text{important}}$ | Arithmetic mean | Geometric mean | CL (- 95%) | CL (+95%) | Median | Minimum | Maximum | Standard deviation | Interval |
|-----------|------------------------|-----------------|----------------|------------|-----------|--------|---------|---------|--------------------|----------|
| <b>A</b>  |                        |                 |                |            |           |        |         |         |                    |          |
|           | $k_{1m}$               |                 |                |            |           |        |         |         |                    |          |
| January   | 47                     | 1.50            | 1.37           | 1.30       | 1.70      | 1.27   | 0.27    | 3.79    | 0.69               | 3.52     |
| February  | 48                     | 1.42            | 1.27           | 1.23       | 1.61      | 1.30   | 0.21    | 4.24    | 0.67               | 4.04     |
| March     | 48                     | 1.18            | 1.10           | 1.05       | 1.30      | 1.13   | 0.29    | 2.53    | 0.43               | 2.24     |
| April     | 48                     | 0.89            | 0.82           | 0.80       | 0.98      | 0.90   | 0.22    | 1.54    | 0.31               | 1.32     |
| May       | 55                     | 0.76            | 0.70           | 0.69       | 0.83      | 0.77   | 0.14    | 1.72    | 0.26               | 1.58     |
| June      | 50                     | 0.69            | 0.66           | 0.63       | 0.75      | 0.66   | 0.27    | 1.51    | 0.22               | 1.24     |
| July      | 50                     | 0.79            | 0.74           | 0.69       | 0.89      | 0.69   | 0.32    | 2.35    | 0.35               | 2.02     |
| August    | 45                     | 0.78            | 0.72           | 0.67       | 0.89      | 0.67   | 0.32    | 2.10    | 0.37               | 1.78     |
| September | 47                     | 0.95            | 0.86           | 0.80       | 1.09      | 0.75   | 0.36    | 2.59    | 0.51               | 2.24     |
| October   | 49                     | 1.07            | 1.05           | 1.00       | 1.15      | 1.00   | 0.57    | 1.74    | 0.25               | 1.16     |
| November  | 49                     | 1.30            | 1.26           | 1.20       | 1.41      | 1.24   | 0.54    | 2.78    | 0.37               | 2.24     |
| December  | 46                     | 1.59            | 1.49           | 1.40       | 1.79      | 1.49   | 0.57    | 4.79    | 0.67               | 4.22     |
| <b>B</b>  |                        |                 |                |            |           |        |         |         |                    |          |
| Quarter   | $N_{\text{important}}$ | Arithmetic mean | Geometric mean | CL (- 95%) | CL (+95%) | Median | Minimum | Maximum | Standard deviation | Interval |
|           | $k_{3m}$               |                 |                |            |           |        |         |         |                    |          |
| 1         | 50                     | 1.33            | 1.23           | 1.18       | 1.48      | 1.25   | 0.30    | 3.2     | 0.53               | 2.90     |
| 2         | 55                     | 0.77            | 0.72           | 0.70       | 0.84      | 0.80   | 0.20    | 2.0     | 0.28               | 1.80     |
| 3         | 53                     | 0.86            | 0.78           | 0.73       | 0.99      | 0.75   | 0.30    | 3.0     | 0.47               | 2.70     |
| 4         | 50                     | 1.37            | 1.29           | 1.20       | 1.53      | 1.19   | 0.56    | 4.0     | 0.57               | 3.44     |

Bazę współczynników korekcyjnych opracowałam dla różnych typów obiektów podziemnych niezwiązanych ze współcześnie prowadzoną aktywnością górniczą, dla których dysponowałam wynikami pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  przez okres od roku do kilku lat. Były to: jedna trasa turystyczna w nieczynnej kopalni podziemnej (kopalnia), jedna trasa turystyczna w sztolni będącej częścią rozległej kopalni podziemnej (sztolnia), jedna jaskinia (wyróżniono w niej 2 poziomy: leżący płycej pod powierzchnią poziom turystyczny oraz głębszy dostępny jedynie dla grotolazów), jedno podziemne geofizyczne laboratorium naukowe. Jako reprezentatywne wybrałam obiekty o różnej genezie (naturalne, antropogeniczne), różnym stopniu izolacji od atmosfery (zwietrzały i naruszone uskokami górotwór, śluzy, obudowa górnicza), różnej genezie i litologii skał podłoża i otoczenia (skały krystaliczne, w tym szczelinowate i spękane oraz okruczowe skały osadowe) oraz różnym

systemie i efektywności wentylacji (przepływ naturalny – konwekcyjny lub wymuszony – wentylacja mechaniczna). Podczas wyboru obiektów zwróciłam także uwagę na warunki sprzyjające gromadzeniu się radonu w ich wnętrzu, w tym charakterystykę sezonowych i krótkookresowych zmian stężenia tego gazu.

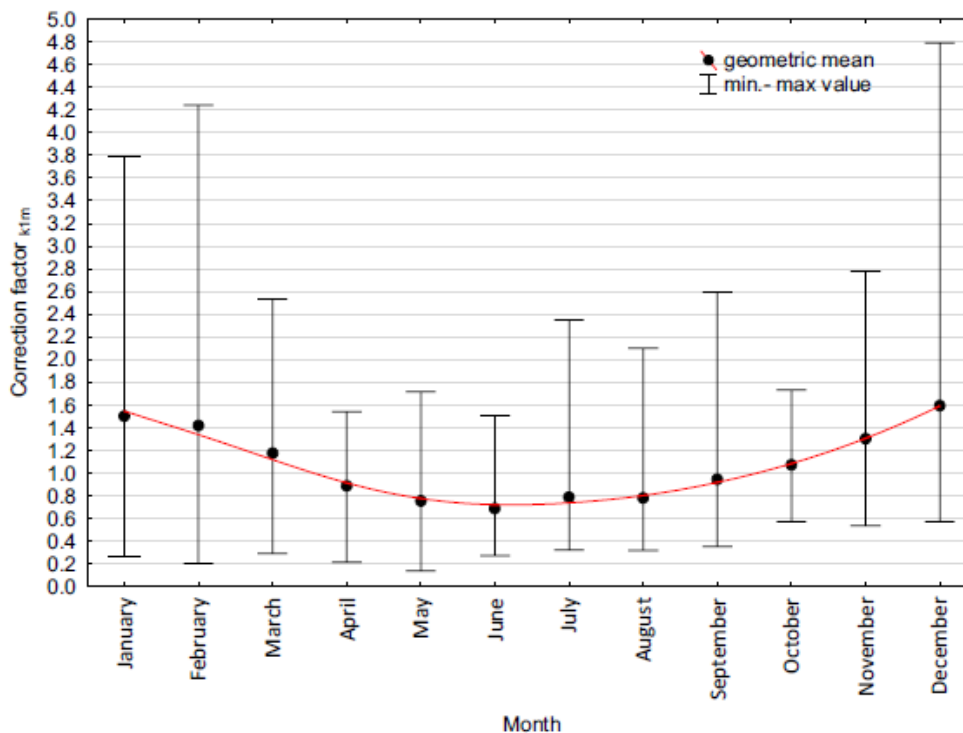
Łącznie oszacowałam wartości 582 współczynników korekcyjnych dla miesiąca ( $k_{1m}$ ) i wartości 208 współczynników korekcyjnych kwartalnych ( $k_{3m}$ ). Dzięki analizie statystycznej wskazałam, że współczynniki korekcyjne  $k_{1m}$  wykazują wyraźny trend charakterystyczny dla wywołanej zmiennymi warunkami termicznymi otoczenia obiektów cyrkulacji powietrza (konwekcji). Zauważyłam, że równie istotne znaczenie ma stopień izolacji obiektów (naturalny, sztuczny) od wpływu atmosfery i warunków zewnętrznych. W wyniku zmiany warunków termicznych w okresach letnich zmniejszała się, a w okresach chłodniejszych zwiększała wymiana powietrza cyrkulującego pomiędzy wnętrzem obiektu a otoczeniem. Dodatkowo na okresy o zmniejszonej, jak i wzmożonej konwekcji nakładały się tzw. okresy przejściowe. Taka sytuacja występowała pod koniec marca, początku kwietnia (2 kwartał roku) i pod koniec października – na początku listopada (4 kwartał roku). Drugi kwartał roku był okresem, w którym z uwagi na niewielką różnicę temperatur pomiędzy powietrzem atmosferycznym a powietrzem wewnątrz obiektu podziemnego następowało zahamowanie naturalnej wymiany powietrza. Jej odblokowanie następowało wraz z rosnącą różnicą temperatury otoczenia względem wnętrza dopiero wczesną jesienią (4 kwartał roku). W okresie przejściowym (kwiecień, październik) oraz w maju i czerwcu amplituda zmian współczynników korekcyjnych w stosunku do ich wartości średniej była zbliżona. Nie zaobserwowałam wartości odstających (powyżej  $3\sigma$ ), wartość średnia była równa medianie (Tab. 13).

**Dla chłodniejszych okresów roku, tj. od stycznia do marca oraz od października do grudnia oszacowałam większe wartości współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  (Tab. 13A) i  $k_{3m}$  (Tab. 13B).** Współczynniki te charakteryzowały się również największą amplitudą zmian (Rys. 29). Od stycznia do marca wahania współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  odnotowałam w kopalni oraz na turystycznym poziomie jaskini. W marcu i kwietniu współczynniki korekcyjne  $k_{1m}$  podlegały wahaniom w podziemnym laboratorium geofizycznym. Również dla tego obiektu, jak i turystycznej części jaskini wyraźnie zmienne były współczynniki korekcyjne  $k_{1m}$  od października do listopada. W grudniu taka sytuacja miała miejsce w kopalni, a wartości współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  w stosunku do wartości średniej na poziomie 3,0 zmieniały się od 1,7 do 1,8 (Rys. 29). Zmiany współczynników korekcyjnych wyznaczonych dla okresów kwartalnych ( $k_{3m}$ ) korespondowały ze zmianami współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  (Rys. 29–30). **Największe wartości współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  wyznaczyłam w 1 i 4 kwartale roku kalendarzowego (Tab. 13B).** Największą amplitudą zmian charakteryzowały się współczynniki korekcyjne  $k_{3m}$  w sztolni, jak i w turystycznym poziomie jaskini w 4 kwartale roku kalendarzowego (Rys. 30B). W 1 kwartale wyraźne wahania współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  względem wartości średniej obserwowałam w kopalni oraz w turystycznych partiach jaskini (Rys. 30A).

Wskazane zależności dla wartości współczynników  $k_{1m}$  potwierdziłam analizą składowych głównych PCA (ang. Principal Components Analysis). W dalszych weryfikacjach wykorzystałam założenia analizy skupień. Dla  $k_{1m}$  wyznaczyłam 3 skupienia (grupy obiektów), do których zaliczyłam: kopalnię i turystyczną część jaskini (skupienie 2), podziemne laboratorium geofizyczne i jaskinię – partie dostępne jedynie dla grotolazów (skupienie 3). Jako osobny obiekt (skupienie 1) potraktowałam sztolnię (Tab. 14). Dla wartości współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  wykonałam segmentację obiektów badań (Tab. 15), która pozwoliła mi przyporządkować je do dwóch skupień. W grupie numer 1 znalazły się jaskinia (obie części), kopalnia oraz podziemne laboratorium geofizyczne. Do osobnej grupy zakwalifikowałam sztolnię (skupienie numer 2). Do weryfikacji poprawności przedstawionych analiz wykorzystałam wyniki pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  z dwunastu miesięcy 2020 roku z obiektu o naturalnej wentylacji – w podziemnym laboratorium geofizycznym (obiekt bazowy). Następnie obliczone wartości  $k_{1m}$  i  $k_{3m}$  porównałam z wynikami uzyskanymi we wszystkich



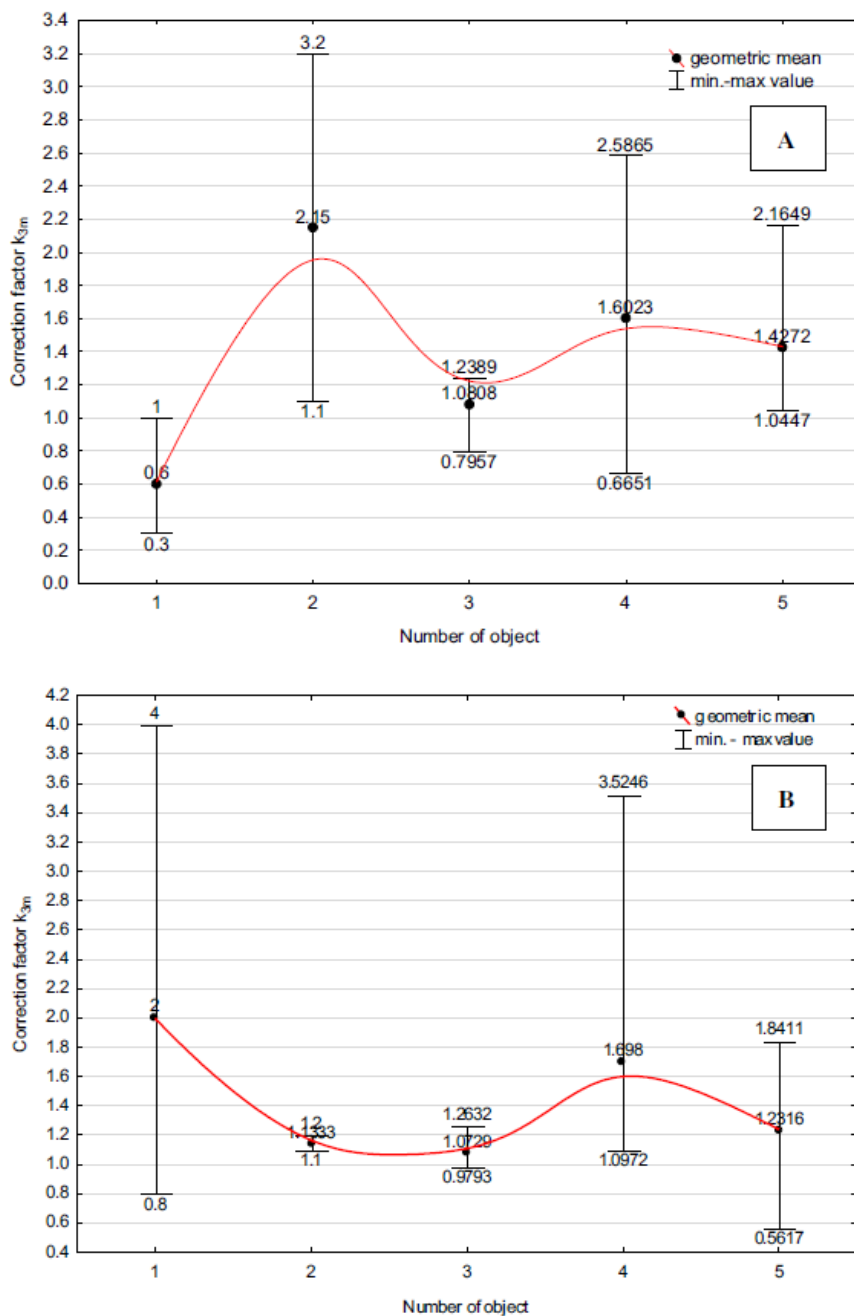
obiektach, w tym wskazanych jako reprezentatywne dla obiektów podziemnych z uwagi na ich cechy indywidualne (Rys. 31).



Rys. 29. Wartości współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  wraz z amplitudą ich zmian oszacowane dla 12 miesięcy roku kalendarzowego. Wykres pochodzi z publikacji nr 8 (Tab. 1).

Najlepsze dopasowanie współczynników korekcyjnych obiektu bazowego wystąpiło w zestawieniu wszystkich obiektów łącznie (Tab. 16A). **W przypadku obiektu z systemem mechanicznej wentylacji znacznie lepsze dopasowanie wyników w odniesieniu do obiektu bazowego uzyskałam dla współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  na poziomie 94%, 89%, 79% oraz 95% odpowiednio w I, II, III i IV kwartale roku (Tab. 16B).**

**W przypadku obiektów przewietrzanych naturalnie lepsze dopasowanie wyników uzyskałam dla współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$ .** Dla obiektów izolowanych od atmosfery, od stycznia do lutego, w kwietniu oraz w październiku i grudniu procent dopasowania był najmniejszy (Tab. 16C). Dla współczynników  $k_{1m}$  najlepsze dopasowanie na poziomie ponad 70% obserwowałam od maja do lipca oraz we wrześniu i listopadzie. Dla współczynników kwartalnych najlepsze dopasowanie uzyskałam w drugim kwartale roku (Tab. 17). Dla pozostałych obiektów (Tab. 16D) najlepsze dopasowanie otrzymałam dla współczynnika korekcyjnego  $k_{1m}$ . Było ono porównywalne w całym roku kalendarzowym (Tab. 16). **Dla obiektów wyposażonych w system wentylacji mechanicznej większe wartości współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  uzyskiwałam dla cieplejszych (lipiec–wrzesień), a mniejsze dla chłodniejszych (październik–grudzień) miesięcy roku kalendarzowego.**



Rys. 30. Wartości współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  wraz z amplitudą ich zmian oszacowane dla okresów 3-miesięcznych: kwartał I (A) – styczeń–marzec i kwartał IV (B) – październik–grudzień roku kalendarzowego. Objasnienia dla numeracji obiektów: 1 – sztolnia, 2 – kopalnia, 3 – jaskinia, poziom głębszy dostępny tylko dla grotolazów, 4 – jaskinia, poziom turystyczny, 5 – laboratorium geodynamiczne. Wykresy pochodzą z publikacji nr 8 (Tab. 1).

Tab. 14. Statystyki opisowe dla współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  zgodnie z przynależnością do skupień. Skupienie: 1 – sztolnia, 2 – kopalnia i część turystyczna jaskini, 3 – laboratorium geodynamiczne oraz dostępna tylko dla grotłazów głębsza część jaskini. Objaśnienia: SD – standard deviation, SE – standard error. Tabela pochodzi z publikacji nr 8 (Tab. 1).

| Group    | $k_{1January}$ mean | $k_{1January}$ $N_{important}$ | $k_{1January}$ SD | $k_{1January}$ SE | $k_{1February}$ mean | $k_{1February}$ $N_{important}$ | $k_{1February}$ SD | $k_{1February}$ SE | $k_{1March}$ mean     | $k_{1March}$ $N_{important}$     | $k_{1March}$ SD     | $k_{1March}$ SE     |
|----------|---------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1        | 0.73                | 4                              | 0.49              | 0.24              | 0.38                 | 4                               | 0.19               | 0.09               | 0.52                  | 4                                | 0.22                | 0.11                |
| 2        | 3.34                | 4                              | 0.36              | 0.18              | 2.8                  | 4                               | 1.06               | 0.53               | 1.56                  | 4                                | 0.7                 | 0.35                |
| 3        | 1.41                | 37                             | 0.33              | 0.05              | 1.38                 | 37                              | 0.38               | 0.062              | 1.19                  | 37                               | 0.35                | 0.06                |
| Totally  | 1.52                | 45                             | 0.7               | 0.1               | 1.42                 | 45                              | 0.68               | 0.1                | 1.16                  | 45                               | 0.44                | 0.65                |
| Group    | $k_{1April}$ mean   | $k_{1April}$ $N_{important}$   | $k_{1April}$ SD   | $k_{1April}$ SE   | $k_{1May}$ mean      | $k_{1May}$ $N_{important}$      | $k_{1May}$ SD      | $k_{1May}$ SE      | $k_{1June}$ mean      | $k_{1June}$ $N_{important}$      | $k_{1June}$ SD      | $k_{1June}$ SE      |
| 1        | 0.4                 | 4                              | 0.17              | 0.08              | 0.4                  | 4                               | 0.18               | 0.09               | 0.73                  | 4                                | 0.56                | 0.28                |
| 2        | 0.55                | 4                              | 0.19              | 0.09              | 0.83                 | 4                               | 0.24               | 0.12               | 0.6                   | 4                                | 0.26                | 0.13                |
| 3        | 0.96                | 37                             | 0.25              | 0.04              | 0.77                 | 37                              | 0.27               | 0.05               | 0.71                  | 37                               | 0.18                | 0.03                |
| Totally  | 0.88                | 45                             | 0.31              | 0.05              | 0.74                 | 45                              | 0.28               | 0.04               | 0.7                   | 45                               | 0.23                | 0.03                |
| Group    | $k_{1July}$ mean    | $k_{1July}$ $N_{important}$    | $k_{1July}$ SD    | $k_{1July}$ SE    | $k_{1August}$ mean   | $k_{1August}$ $N_{important}$   | $k_{1August}$ SD   | $k_{1August}$ SE   | $k_{1September}$ mean | $k_{1September}$ $N_{important}$ | $k_{1September}$ SD | $k_{1September}$ SE |
| 1        | 1.76                | 4                              | 0.5               | 0.25              | 1.8                  | 4                               | 0.3                | 0.14               | 2.4                   | 4                                | 0.2                 | 0.1                 |
| 2        | 0.7                 | 4                              | 0.25              | 0.13              | 0.56                 | 4                               | 0.1                | 0.05               | 0.63                  | 4                                | 0.09                | 0.05                |
| 3        | 0.71                | 37                             | 0.15              | 0.025             | 0.69                 | 37                              | 0.16               | 0.03               | 0.83                  | 37                               | 0.27                | 0.05                |
| Totally  | 0.81                | 45                             | 0.36              | 0.05              | 0.78                 | 45                              | 0.37               | 0.05               | 0.95                  | 45                               | 0.52                | 0.08                |
| Group    | $k_{1October}$ mean | $k_{1October}$ $N_{important}$ | $k_{1October}$ SD | $k_{1October}$ SE | $k_{1November}$ mean | $k_{1November}$ $N_{important}$ | $k_{1November}$ SD | $k_{1November}$ SE | $k_{1December}$ mean  | $k_{1December}$ $N_{important}$  | $k_{1December}$ SD  | $k_{1December}$ SE  |
| 1        | 1.2                 | 4                              | 0.36              | 0.18              | 1.6                  | 4                               | 0.64               | 0.32               | 1.6                   | 4                                | 0.58                | 0.29                |
| 2        | 1.4                 | 4                              | 0.29              | 0.14              | 1.2                  | 4                               | 0.16               | 0.08               | 2.7                   | 4                                | 1.58                | 0.79                |
| 3        | 1                   | 37                             | 0.2               | 0.03              | 1.3                  | 37                              | 0.35               | 0.06               | 1.5                   | 37                               | 0.41                | 0.07                |
| totality | 1.1                 | 45                             | 0.24              | 0.04              | 1.3                  | 45                              | 0.38               | 0.06               | 1.6                   | 45                               | 0.68                | 0.1                 |

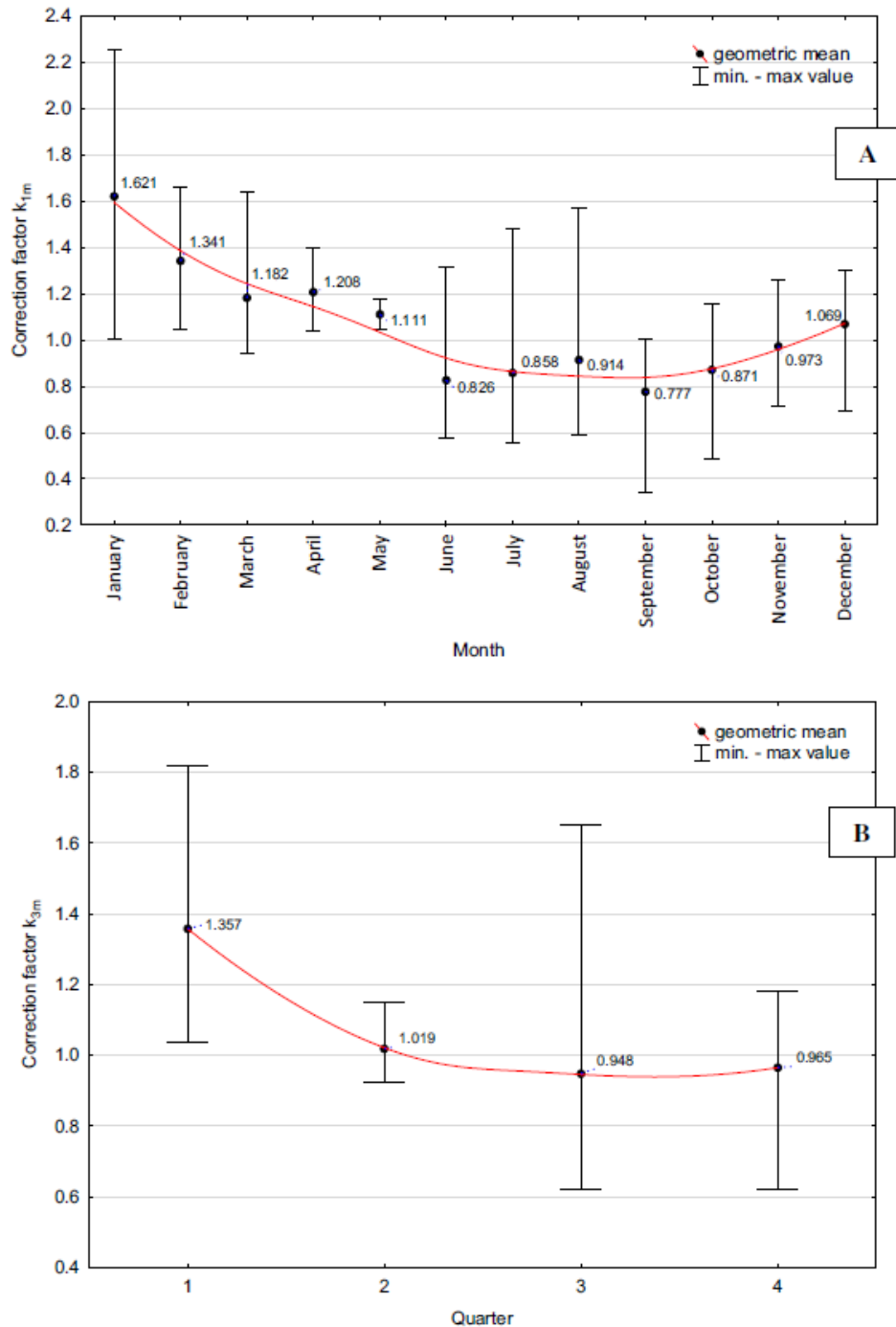
Clusters: 1—adit, 2—mine and tourist part of the cave, 3—geophysical laboratory and deeper part of the cave accessible only to cavers  
SD standard deviation, SE standard error

Tab. 15. Statystyki opisowe dla współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  zgodnie z przynależnością do skupień. Skupienie 1 —sztolnia, 2 – pozostałe obiekty. Tabela pochodzi z publikacji nr 8 (Tab. 1).

| Group    | $k_{3m}$        |                            |              |                 |                            |               |                 |                            |               |                 |                            |               |
|----------|-----------------|----------------------------|--------------|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------|
|          | quarter 1, mean | quarter 1, $N_{important}$ | quarter 1 SD | quarter 1, mean | quarter 2, $N_{important}$ | quarter 2, SD | quarter 3, mean | quarter 3, $N_{important}$ | quarter 3, SD | quarter 4, mean | quarter 4, $N_{important}$ | quarter 4, SD |
| 1        | 1.4             | 44                         | 0.47         | 0.81            | 44                         | 0.18          | 0.72            | 44                         | 0.16          | 1.31            | 44                         | 0.43          |
| 2        | 0.62            | 5                          | 0.31         | 0.76            | 5                          | 0.72          | 2.14            | 5                          | 0.56          | 1.96            | 5                          | 1.21          |
| totality | 1.32            | 49                         | 0.51         | 0.8             | 49                         | 0.27          | 0.87            | 49                         | 0.49          | 1.37            | 49                         | 0.57          |

Clusters: 1—adit, 2—remaining facilities, SD standard deviation

**Wskazałam, że w obiektach o naturalnej (głównie konwekcyjnej) wymianie powietrza pomiędzy wnętrzem a otoczeniem, dobrze odizolowanych od wpływu atmosfery poprzez śluzę, szczelny górotwór, czy obudowę górniczą, większe współczynniki korekcyjne  $k_{1m}$  powinny być dobierane od stycznia do marca oraz od października do grudnia.** Mniejsze współczynniki korekcyjne  $k_{1m}$  należy stosować od kwietnia do września. Podkreśliłam, że współczynniki korekcyjne  $k_{3m}$  ustalone dla wszystkich obiektów łącznie (bez wskazywania cech obiektu), dla pierwszego i czwartego kwartału roku powinno dobierać się większe (Tab. 17A). Mniejsze natomiast w drugim kwartale i częściowo w trzecim kwartale roku (od września). **W przypadku obiektów z naturalną wymianą powietrza wartości współczynników korekcyjnych  $k_{3m}$  należy przyjmować na poziomie mniejszym w pierwszym kwartale oraz większym w trzecim i czwartym kwartale roku (Tab. 17C).**



Rys. 31. Zestawienie porównawcze współczynników korekcyjnych  $k_{1m}$  (A) i  $k_{3m}$  (B) wyznaczonych dla roku weryfikacyjnego – 2020 w podziemnym laboratorium geodynamicznym (A). Wykresy pochodzą z publikacji nr 8 (Tab. 1).

Tab. 16. Współczynniki korekcyjne  $k_{1m}$  w zestawieniu porównawczym obiektu bazowego do wszystkich obiektów łącznie (A), obiektu z systemem mechanicznej wentylacji (B), obiektami o naturalnej wentylacji, dobrze izolowanymi od atmosfery (C), obiektami o naturalnej izolacji (D). Tabela pochodzi z publikacji nr 8 (Tab. 1).

| Month     | A<br>Totality (presented as summary) |          |                         | B<br>Mechanically ventilated (presented as group 1) |                         | C<br>Spaces with natural ventilation, well insulated (presented as group 2) |                         | D<br>Spaces with natural ventilation, breathing deeply (presented as group 3) |                         |
|-----------|--------------------------------------|----------|-------------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
|           | $k_{1m}$ verification                | $k_{1m}$ | Difference $k_{1m}$ (%) | $k_{1m}$  | Difference $k_{1m}$ (%) | $k_{1m}$  | Difference $k_{1m}$ (%) | $k_{1m}$  | Difference $k_{1m}$ (%) |
| January   | 1.62                                 | 1.52     | 6                       | 0.73  | 55                      | 3.34  | 106                     | 1.41  | 13                      |
| February  | 1.34                                 | 1.42     | 6                       | 0.38  | 72                      | 2.80  | 109                     | 1.38  | 3                       |
| March     | 1.18                                 | 1.16     | 2                       | 0.52  | 56                      | 1.56  | 32                      | 1.19  | 1                       |
| April     | 1.21                                 | 0.88     | 27                      | 0.40  | 67                      | 0.55  | 54                      | 0.96  | 21                      |
| May       | 1.11                                 | 0.74     | 33                      | 0.40  | 64                      | 0.83  | 25                      | 0.77  | 31                      |
| June      | 0.83                                 | 0.70     | 15                      | 0.73  | 12                      | 0.60  | 27                      | 0.71  | 14                      |
| July      | 0.86                                 | 0.81     | 6                       | 1.76  | 105                     | 0.70  | 18                      | 0.71  | 17                      |
| August    | 0.91                                 | 0.78     | 15                      | 1.80  | 97                      | 0.56  | 39                      | 0.69  | 24                      |
| September | 0.78                                 | 0.95     | 22                      | 2.40  | 209                     | 0.63  | 19                      | 0.83  | 7                       |
| October   | 0.87                                 | 1.10     | 26                      | 1.20  | 38                      | 1.40  | 61                      | 1.00  | 15                      |
| November  | 0.97                                 | 1.30     | 34                      | 1.60  | 64                      | 1.20  | 23                      | 1.30  | 34                      |
| December  | 1.07                                 | 1.60     | 50                      | 1.60  | 50                      | 2.70  | 153                     | 1.50  | 40                      |

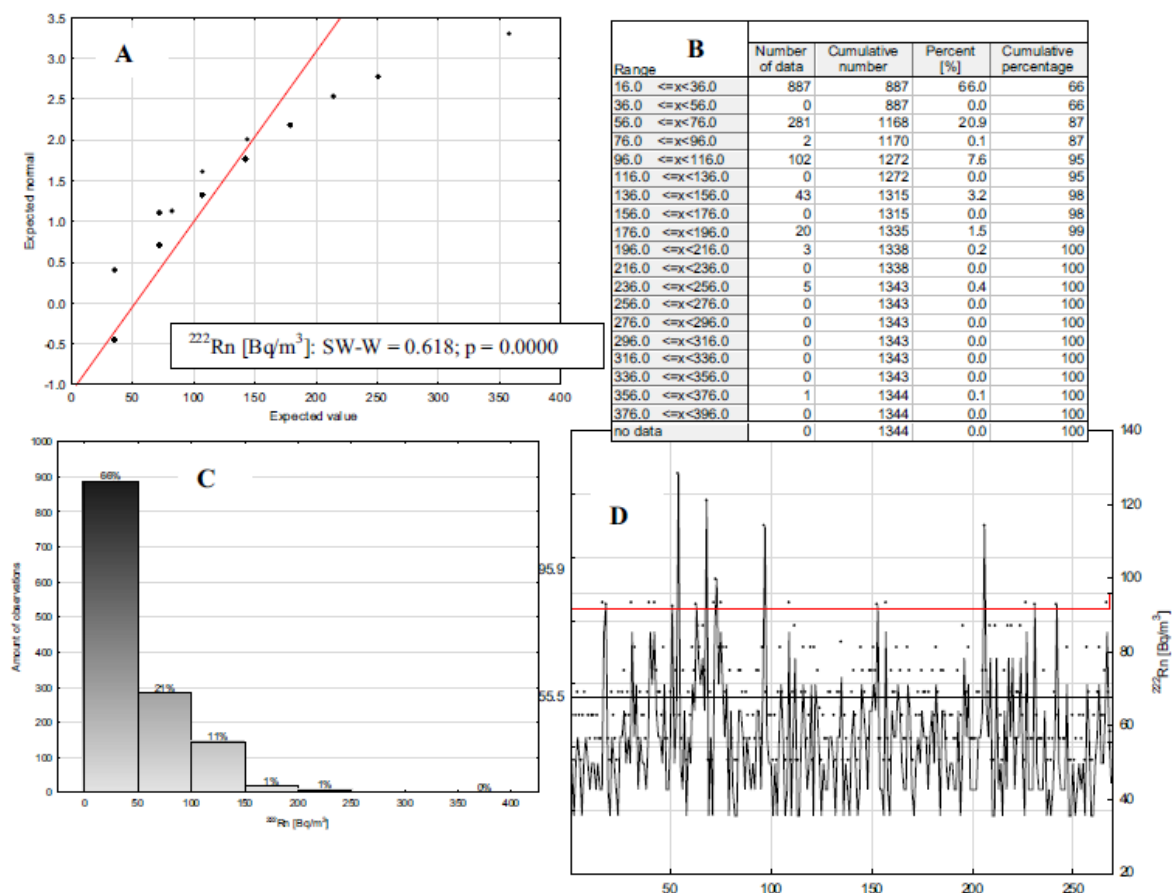
Tab. 17. Współczynniki korekcyjne  $k_{3m}$  w zestawieniu porównawczym obiektu bazowego do wszystkich obiektów łącznie (A), obiektu z systemem mechanicznej wentylacji (B), obiektami o naturalnej wentylacji (C). Tabela pochodzi z publikacji nr 8 (Tab. 1).

| Quarter | $k_{3m}$ verification | $k_{3m}$ (A) | Difference $k_{3m}$ (%) (for A) | $k_{3m}$ (B) | Difference $k_{3m}$ (%) (for B) | $k_{3m}$ (C) | Difference $k_{3m}$ (%) (for C) |
|---------|-----------------------|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|
| 1       | 1.36                  | 1.32         | 3.0                             | 1.40         | 3.0                             | 0.62         | 54.0                            |
| 2       | 1.02                  | 0.90         | 12.0                            | 0.81         | 21.0                            | 0.76         | 25.0                            |
| 3       | 0.95                  | 0.87         | 8.0                             | 0.72         | 24.0                            | 2.14         | 125.0                           |
| 4       | 0.96                  | 1.37         | 43.0                            | 1.31         | 36.0                            | 1.96         | 104.0                           |

Szczegółowym celem moich badań naukowych przedstawionych w cyklu tematycznie powiązanych publikacji była **weryfikacja ustalonej przez GIS specyfikacji prowadzenia pomiarów w miejscu pracy na podstawie pomiarów porównawczych** w obiekcie hydrotechnicznym w Dobromierzu. W tym zakresie sprawdziłam stosowane w badaniach naukowych i komercyjnie przyrządy pomiarowe. Zweryfikowałam czułość testowanych urządzeń oraz rekomendowane do zachowania prawidłowych warunków pomiaru kryteria ekspozycji, w tym możliwość ich modyfikacji. Zwróciłam uwagę na precyzję pomiaru, czas ekspozycji, stopień trudności wykonania. Ten ostatni wymóg obejmował prowadzenie pomiaru dwuetapowo (czasochłonny) w przypadku techniki pasywnej (detektory śladowe CR-39), lub w sposób ciągły (na bieżąco, przyjazny użytkownikowi, lecz kosztowny) z wykorzystaniem aktywnej techniki pomiarowej (sonda radonowa oraz detektor AlphaE). Zwróciłam również uwagę na możliwość modyfikacji pomiaru przez zleceniodawcę, np. w związku ze zmianą stanowiska pracy, czasu pracy na danym stanowisku, w tym czasu ekspozycji na promieniowanie jonizujące. W świetle badań dozymetrycznych wykonane pomiary porównawcze w tak szerokim zakresie mają szczególne znaczenie, głównie z uwagi na rzadko prowadzone w warunkach terenowych pomiary kontrolne dla wielu urządzeń i metod pomiaru. Uzyskane rezultaty badań przedstawiłam w artykule wieloautorskim: *Intercomparison of equipment measuring radon activity concentration in the air—an example from a hydrotechnical structure in Dobromierz (SW Poland)* opublikowanym w Journal of

Radioanalytical and Nuclear Chemistry w 2023 roku (poz. 9, Tab. 1). Testy przeprowadziłam w trybie krótko- i długookresowym. **Wykorzystałam w nich nowy i niestosowany jak dotąd, w pomiarach radiologicznych w Polsce czujnik AlphaE**, oraz sprawdzone w długookresowej ekspozycji detektory półprzewodnikowe SRDN-3a, czuły i precyzyjny instrument AlphaGUARD oraz zalecane do pomiarów średniorocznych wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  detektory śladowe CR-39.

Szczegółową analizę porównawczą przeprowadziłam na czterech różnej wielkości zbiorach danych. Jako pojedynczy rekord traktowałam wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  mierzoną co godzinę przez sondę SRDN-3a i urządzenie AlphaE, w ciągu 10-minut przez przyrząd referencyjny AlphaGUARD oraz dla 2-miesięcznego (pierwsza ekspozycja) i kwartalnego (druga ekspozycja) okresu pomiarowego prowadzonego każdorazowo z wykorzystaniem trzech detektorów śladowych CR-39. Ekspozycja nr 1 trwała 1344 godziny liczone od 12:00, 25.03.2022 do godziny 9:00, 20.05.2022. Uczestniczyły w niej równolegle 3 detektory, a 4 jako urządzenie referencyjne włączyłam do pomiarów 3-godzinnych w pierwszym i ostatnim dniu ekspozycji (z 10-minutowym interwałem zapisu danych).



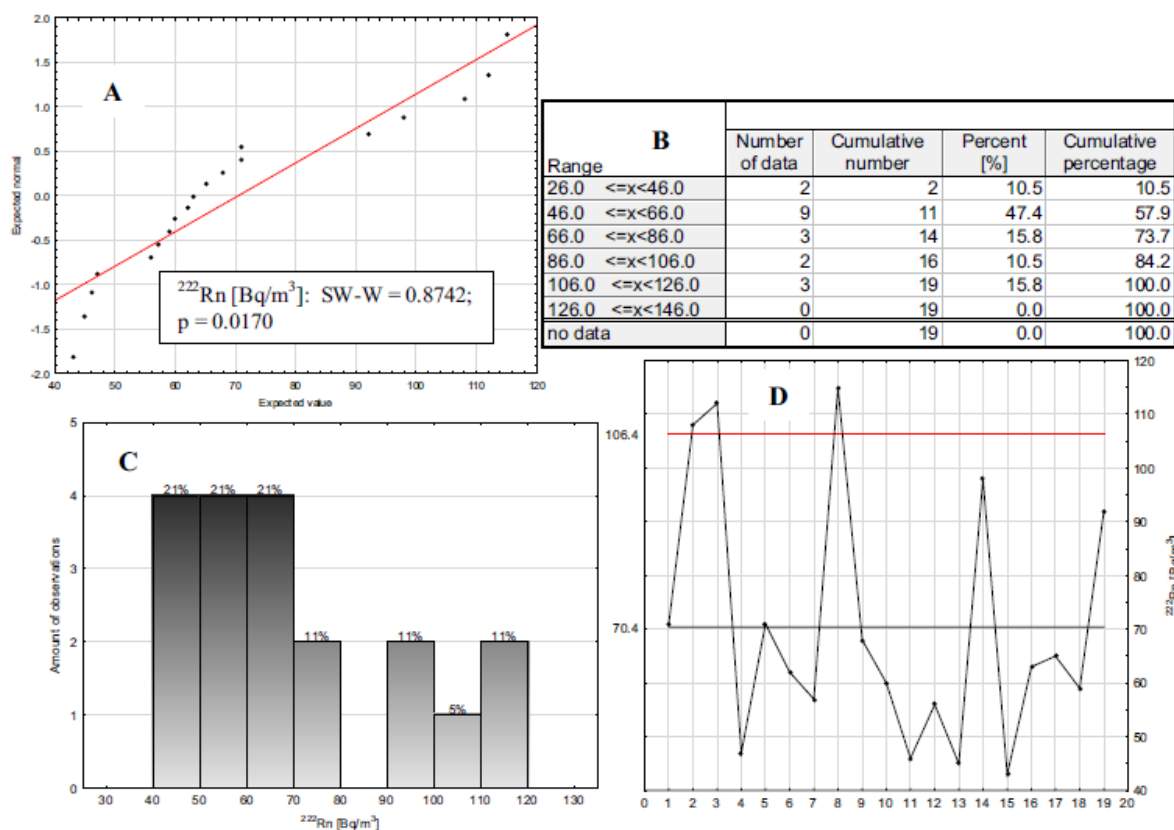
Rys. 32. Zestawienie wyników analiz statystycznych dla pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w trakcie pierwszej ekspozycji czujnika AlphaE: wykres normalności z testem Shapiro–Wilka SW–W (A), tabelę licznosci danych w każdej klasie (B), histogram ich rozkładu (C) oraz karta kontrolna Shewharta danych odstających z obszaru krytycznego  $+3\text{SD}$  (D). Linia centralna (czarna) wskazuje wartość średnią  $55,5 \text{ Bq/m}^3$ . Obszar krytyczny wyznacza górna UCL (czerwona) linia kontrolna ( $+3\text{SD}$ ) równa  $95,9 \text{ Bq/m}^3$ . W obszarze krytycznym znajduje się 13,0% danych uznanych za odstające. Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

Wyniki testu Shapiro–Wilka dla czujnika AlphaE wykazały rozproszenie rejestrowanych wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  względem średniej z pomiarów (Rys. 32A). Zaobserwowałam, że dane oddalone od średniej stanowią aż 87% wszystkich wyników. Były to zarówno wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  mniejsze od średniej w ilości 66% oraz większe od średniej w ilości 21%. Do pierwszej grupy zaliczyłam wartości z przedziału  $0 \text{ Bq/m}^3 - 50$

Bq/m<sup>3</sup>, natomiast do drugiej wynoszące od 50,0 Bq/m<sup>3</sup> do 100,0 Bq/m<sup>3</sup> (Rys. 32B, C). Obszarowi krytycznemu określającemu górną granicą kontrolną UCL = 95,9 Bq/m<sup>3</sup> (Rys. 32D) przyporządkowałam 13,0% danych odstających (Rys. 32B, D).

Wskazałam, że strukturę zbiorowości wartości stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn notowanych w kolejnych godzinach doby przez czujnik AlphaE cechowała prawostronna asymetria rozkładu danych (Rys. 32C). Największe zróżnicowanie wartości stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn występowało od 4:00 do 5:00, o godzinie 7:00, od 18:00 do 19:00 oraz o 22:00. W tych godzinach zakres zmienności wartości stężenia aktywności radonu sięgał do ±2δ w stosunku do średniej z pomiarów. W pozostałych godzinach doby zakres ten nie przekraczał ±1δ względem średniej dla godziny (Rys. 32D). Przekroczenia górnej granicy kontrolnej (UCL) obszaru krytycznego występowały nieregularnie w wielu godzinach w ciągu doby, tj.: 2:00 – 5:00, 8:00 – 9:00, 11:00, 14:00, 16:00, 19:00 – 24:00.

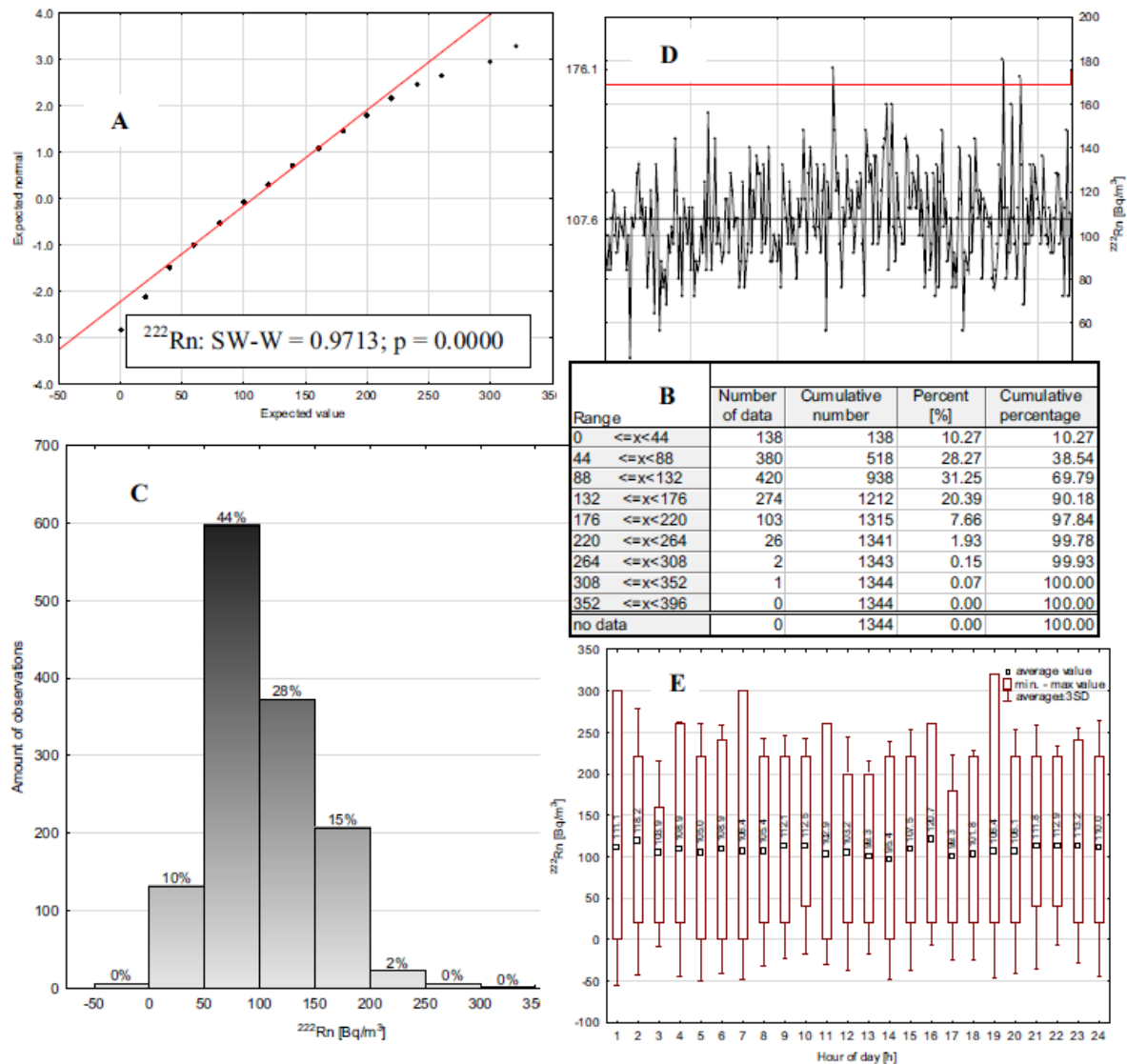
Dla urządzenia AlphaGUARD zaobserwowałam równie mocne rozproszenie wartości stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn względem wartości średniej z pomiarów (Rys. 33A). Aż 63% wyników przypisałam wartościom z przedziału 40,0 Bq/m<sup>3</sup> – 70,0 Bq/m<sup>3</sup>, tj. poniżej wartości średniej (70,4 Bq/m<sup>3</sup>) z pomiarów (Rys. 33B, C).



Rys. 33. Zestawienie wyników analiz statystycznych dla pomiarów stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn w trakcie pierwszej ekspozycji detektora radonu AlphaGUARD: wykres normalności z testem Shapiro–Wilka SW–W (A), tabele licznosci danych w każdej klasie (B), histogram ich rozkładu (C) oraz karta kontrolna Shewharta danych odstających z obszaru krytycznego +3SD (D). Linia centralna (czarna) wskazuje wartość średnią 70,4 Bq/m<sup>3</sup>. Obszar krytyczny wyznacza górna UCL (czerwona) linia kontrolna (+3SD) równa 106,4 Bq/m<sup>3</sup>. W obszarze krytycznym znajduje się 15,8% danych uznanych za odstające. Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

**Wyniki sondy radonowej SRDN–3a były porównywalne z wynikami otrzymanymi przez urządzenie AlphaE.** Największą rozpiętość wyników (> ±1δ) zanotowałam o godzinie 1:00, 7:00 oraz 19:00. Najmniejszym rozrzutem wartości w zakresie do ±1δ względem wartości średniej charakteryzowały się pozostałe godziny doby (Rys. 34). Wyraźny rozrzut wartości względem średniej (w zakresie ±2δ) cechował wyniki dla przyrządu referencyjnego

AlphaGUARD. Był on najlepiej widoczny w godzinach: 9:00, 10:00 i 11:00 (Rys. 34D). Porównywalny poziom średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  odnotowałam w godzinach: 9:00 – 10:00 (Rys. 35) oraz 11:00 – 12:00 (Rys. 36).



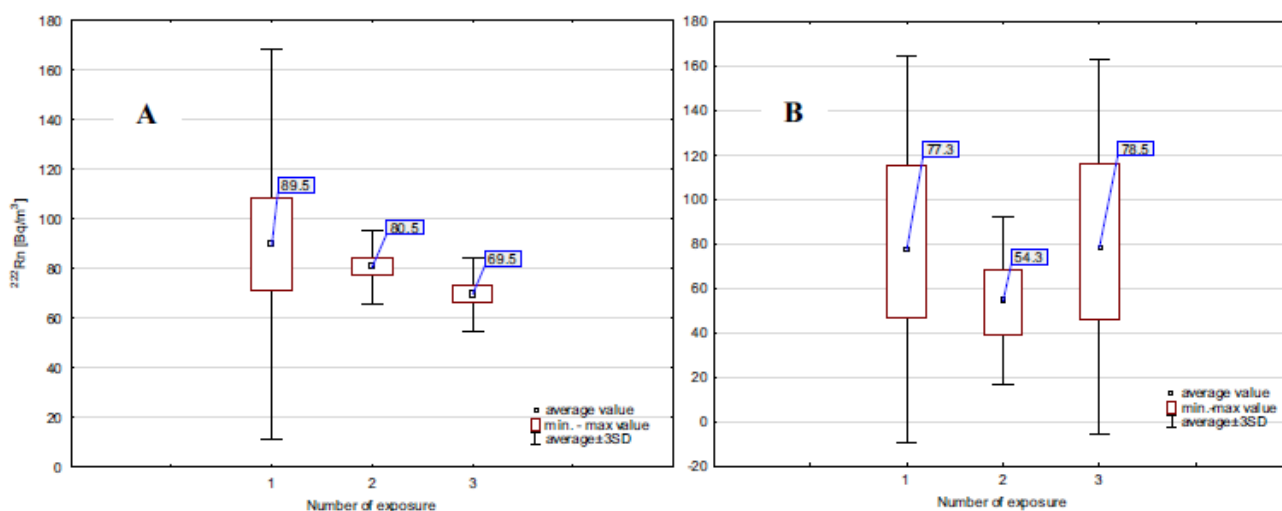
Rys. 34. Zestawienie wyników analiz statystycznych dla pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w trakcie pierwszej ekspozycji sondy radonowej SRDN–3a: wykres normalności z testem Shapiro–Wilka SW–W (A), tabele licznosci danych w każdej klasie (B), histogram ich rozkładu (C), karta kontrolna Shewharta danych odstających z obszaru krytycznego +3SD (D) oraz wykres ramka–wąsy dla wartości w ciągu doby (E). Linia centralna (czarna) wskazuje wartość średnią 107,6 Bq/m<sup>3</sup>. Obszar krytyczny wyznacza górna UCL (czerwona) linia kontrolna (+3SD) równa 176,1 Bq/m<sup>3</sup>. W obszarze krytycznym znajduje się 9,81% danych uznanych za odstające. Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

Druga ekspozycja detektora AlphaE trwała 2808 godzin mierzonych od godziny 9:00 20.05.2022 do godziny 10:00 14.09.2022. Zgodnie z warunkami ekspozycji nr 1 urządzenie referencyjne AlphaGURAD włączałam do pomiarów dwukrotnie, na początku i na końcu czasu ekspozycji. Detektor pracował z 10-minutowym interwałem zapisu danych, przez 3 pełne godziny (9:40–12:40), w dniach: 20.05.2022 (ekspozycja 2) oraz 14.09.2022 (ekspozycja 3). Uzyskane wyniki przeanalizowałam w sposób tożsamy z analizą danych z ekspozycji 1.

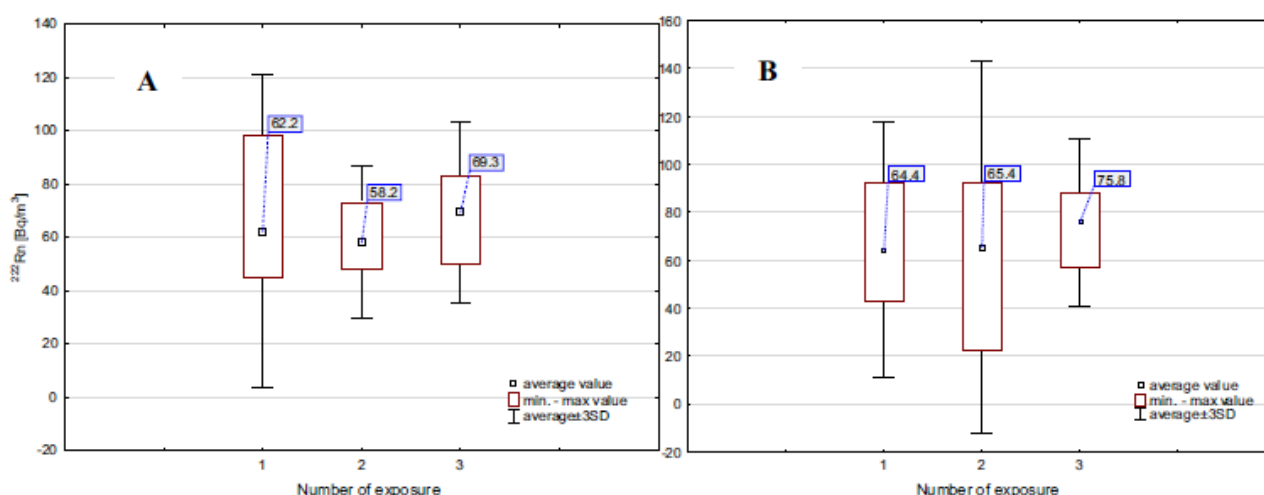
Wyniki testu Shapiro–Wilka potwierdziły wyraźne rozproszenie obserwacji względem wartości średniej z pomiarów (Rys. 37A). Prawostronna asymetria rozkładu wskazała, że 66% wyników stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  to wartości z przedziału od 0,0 Bq/m<sup>3</sup> do 50,0 Bq/m<sup>3</sup> (Rys. 37B, C). Ponad 3–krotnie mniej (19%) wyników odpowiadało wartościom powyżej średniej



opisanej przedziałem  $50,0 \text{ Bq/m}^3 - 100,0 \text{ Bq/m}^3$  (Rys. 37B, C). Do obszaru krytycznego ( $+3\text{SD}$ ) ponad górną granicę kontrolną ( $\text{UCL} = 98,5 \text{ Bq/m}^3$ ) przypisałam 13,5% danych odstających (Rys. 37B, D).



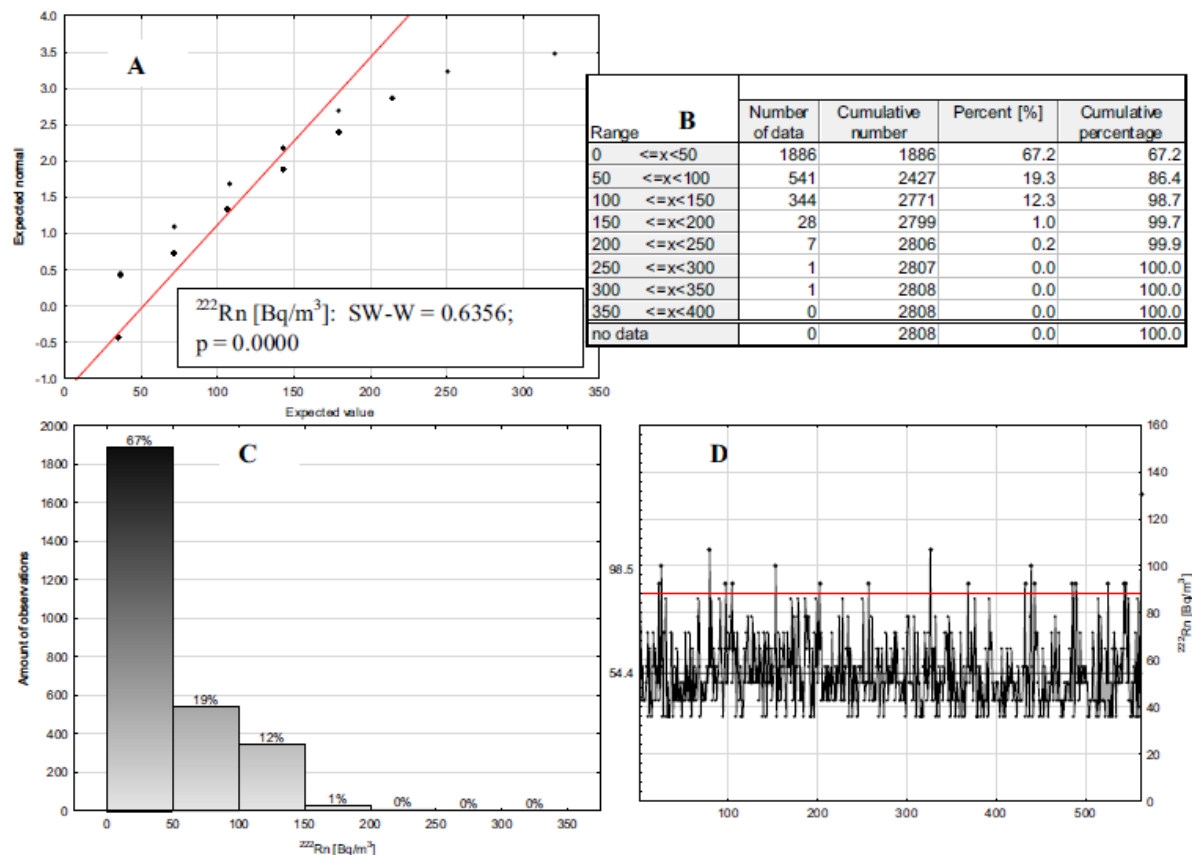
Rys. 35. Wykres ramka–wąsy dla wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowanych dla godziny 9:00 (A) i 10:00 (B) podczas trzech kolejnych ekspozycji urządzenia referencyjnego monitora radonu AlphaGUARD w dn. 20.03.2022 (ekspozycja nr 1), 25.03.2022 (ekspozycja nr 2) i 14.09.2022 (ekspozycja nr 3). Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).



Rys. 36. Wykres ramka–wąsy dla wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowanych dla godziny 11:00 (A) i 12:00 (B) podczas trzech kolejnych ekspozycji urządzenia referencyjnego monitora radonu AlphaGUARD w dn. 20.03.2022 (ekspozycja nr 1), 25.03.2022 (ekspozycja nr 2) i 14.09.2022 (ekspozycja nr 3). Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

Wyniki testu Shapiro–Wilka, który przeprowadziłam na danych z urządzenia AlphaGUARD nie wykazały podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  w drugiej ekspozycji (Rys. 38A). Odnotowywałam wartości równomiernie rozłożone wokół średniej stanowiącej wartość oczekiwaną dla  $n$  danych. Przedziałowi  $62,6 \text{ Bq/m}^3 \pm 3\text{SD}$  odpowiadało aż 99,7% wyników (Rys. 38C). Przekroczenia górnej granicy kontrolnej (UCL) odnotowałam w godzinach o największym rozproszeniu względem średniej. Dolnej, wynoszącej  $42,4 \text{ Bq/m}^3$  i górnej, na poziomie  $82,8 \text{ Bq/m}^3$ , granicy kontrolnej przyporządkowano aż 10,5% danych uznanych za odstające (Rys. 38D). Dla pozostałych godzin doby nie wyróżniłam danych odstających.

Wyniki cyklu godzinowego drugiej ekspozycji czujnika AlphaE były porównywalne z ekspozycją nr 1. Największe rozproszenie względem średniej zauważyłam wczesnym rankiem, w godzinach: 4:00 – 6:00, 8:00 – 9:00 oraz wieczorem o: 19:00, 21:00 i 23:00. Przekroczenia górnej granicy kontrolnej (UCL) zaobserwowałam w godzinach o największym rozproszeniu względem średniej. Dla pozostałych godzin doby nie wyróżniłam danych odstających

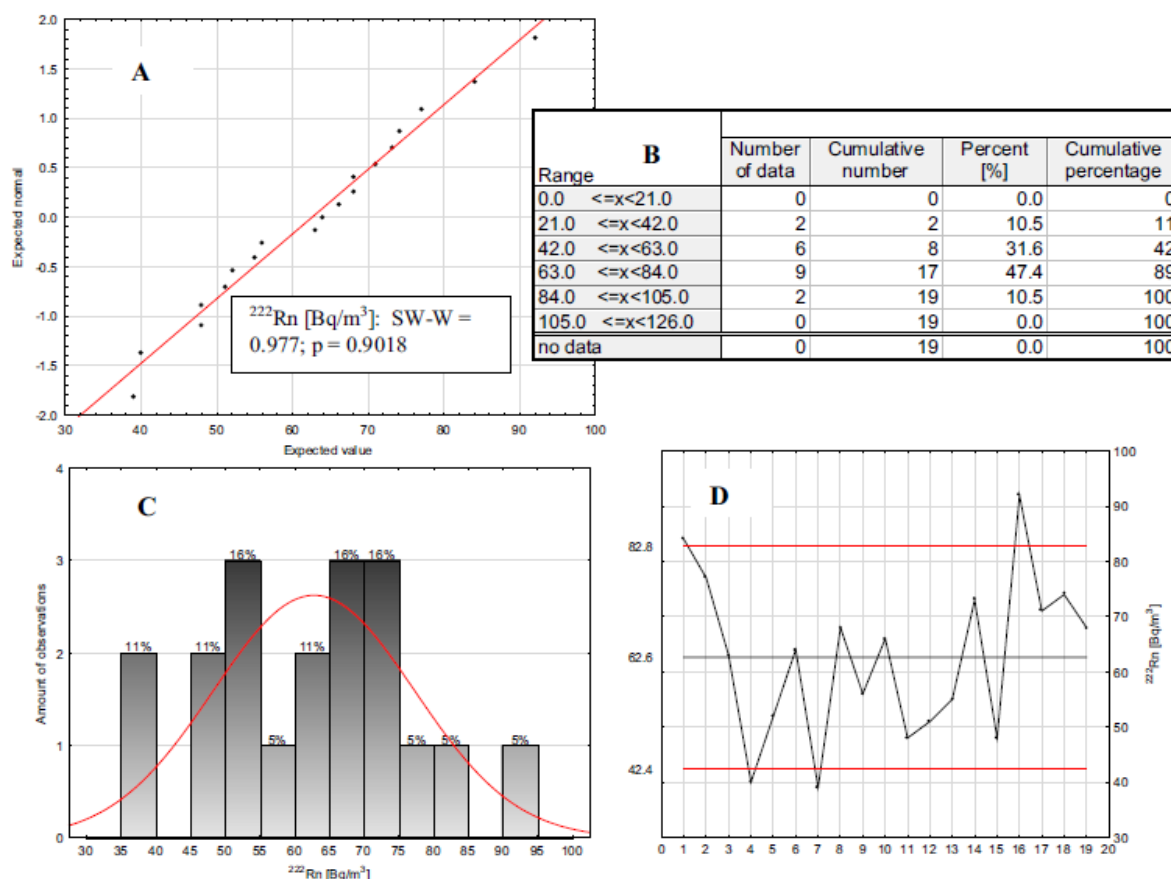


Rys. 37. Zestawienie wyników analiz statystycznych dla pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w trakcie drugiej ekspozycji detektora radonu AlphaE: wykres normalności z testem Shapiro–Wilka SW–W (A), tabelę liczości danych w każdej klasie (B), histogram ich rozkładu (C) oraz karta kontrolna Shewharta danych odstających z obszaru krytycznego  $+3\text{SD}$  (D). Linia centralna (czarna) wskazuje wartość średnią  $54,4 \text{ Bq/m}^3$ . Obszar krytyczny wyznacza górna UCL (czerwona) linia kontrolna ( $+3\text{SD}$ ) równa  $98,5 \text{ Bq/m}^3$ . W obszarze krytycznym znajduje się 13,5% danych uznanych za odstające. Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

Ekspozycję z wykorzystaniem trzech detektorów śladowych przeprowadziłam dwukrotnie. Czas każdej z nich wyniósł odpowiednio 56 dni, tj. 1344 godziny oraz 117 dni, tj. 2808 godzin. Wyniki pomiarów pierwszej ekspozycji dla trzech detektorów pokazały, że w korytarzu technicznym średnia wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w wyznaczonym czasie wynosi kolejno:  $193 \pm 32 \text{ Bq/m}^3$ ,  $343 \pm 47 \text{ Bq/m}^3$  oraz  $203 \pm 33 \text{ Bq/m}^3$ . Dla drugiej ekspozycji wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były równe:  $86 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$ ,  $78 \pm 14 \text{ Bq/m}^3$  oraz  $114 \pm 18 \text{ Bq/m}^3$ . Dla detektorów usytuowanych w tych samych punktach pomiaru, które określiłam roboczo jako: 1, 2, 3 rozstęp mierzonych wartości był największy na drugim detektorze i wynosił aż  $265 \text{ Bq/m}^3$ , a najmniejszy na detektorze nr 3 ( $89 \text{ Bq/m}^3$ ). Dla detektora numer 1 rozstęp średniej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  pierwszej względem drugiej ekspozycji był równy  $107 \text{ Bq/m}^3$ . Ze względu na zbyt małą liczebność zbioru danych, nie weryfikowałam hipotez statystycznych rozkładu danych dla detektorów CR-39.

Całą analizę wyników dla urządzenia SRDN-3a przedyskutowałam w oparciu o wyniki ekspozycji nr 1. Nie przedstawiałam osobno wyników ekspozycji nr 2, ponieważ były one porównywalne z wynikami ekspozycji nr 1, co potwierdziła weryfikacja obu zbiorów danych.

W każdym z dwóch cykli pomiarowych (1334 godziny versus 2808 godzin) sonda pracowała w atmosferze o stężeniu od 0 do około  $250 \text{ Bq/m}^3$ . Niemal 55% danych stanowiły wyniki wyraźnie rozproszone, przyjmujące wartości poniżej średniej. Dodatkowo 21,5% tego zbioru danych stanowiły wartości poniżej poziomu dolnego progu detekcji (LLD) sondy SRDN-3a. Stwierdziłam, że praca w warunkach o tak małym poziomie stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  obarczona jest dużym nawet ponad 20% błędem pomiaru. Wobec czego, aby otrzymać większą wiarygodność wyników, zarekomendowałam, na podstawie wieloletnich doświadczeń, aby pomiary sondą radonową były wykonywane w atmosferze o stężeniu co najmniej 2-krotnie większym od LLD sondy (najlepiej w zakresie  $\geq 500 \text{ Bq/m}^3$ ).



Rys. 38. Zestawienie wyników analiz statystycznych dla pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w trakcie drugiej ekspozycji detektora radonu AlphaGUARD: wykres normalności z testem Shapiro–Wilka SW–W (A), tabele licznosci danych w każdej klasie (B), histogram ich rozkładu (C) oraz karta kontrolna Shewharta danych odstających z obszaru krytycznego  $\pm 3\text{SD}$  (D). Linia centralna (czarna) wskazuje wartość średnią  $62,6 \text{ Bq/m}^3$ . Obszar krytyczny wyznaczają: dolna (LCL) i górna UCL (czerwone) linie kontrolne ( $\pm 3\text{SD}$ ) równe:  $42,4 \text{ Bq/m}^3$  i  $82,8 \text{ Bq/m}^3$ . W obu przedziałach mieści się po 10,5% danych uznanych za odstające. Wykresy pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

Tab. 18. Wyniki testu z-score ekspozycji detektorów w całym okresie pomiarowym (A) i w cyklu dobowym, interwał 1-na godzina (B). Wynik zadowolający (+), wynik wątpliwy, lecz do przyjęcia ( $\pm$ ), wynik niezadowolający (-). Tabele pochodzą z publikacji nr 9 (Tab. 1).

| Value of z indicator IZI |                |                          |                  |                |
|--------------------------|----------------|--------------------------|------------------|----------------|
| Radon detector           | Exposure no. 1 | Exposure no. 2           | Score evaluation |                |
|                          |                |                          | Exposure no. 1   | Exposure no. 2 |
| <b>A</b>                 |                |                          |                  |                |
| AlphaE                   | 2.0            | 1.0                      | +                | +              |
| SRDN-3a                  | 3.0            | comparable to exposure 1 | $\pm$            | $\pm$          |
| CR-39 no. 1              | 11.0           | 3.0                      | -                | +              |
| CR-39 no. 2              | 25.0           | 1.0                      | -                | +              |
| <b>CR-39 no. 3</b>       | 12.0           | 6.0                      | -                | -              |

| Value of z indicator IZI |         |          |                |                |                  |                |       |   |
|--------------------------|---------|----------|----------------|----------------|------------------|----------------|-------|---|
| Radon detector           |         | Hour (h) | Exposure no. 1 | Exposure no. 2 | Score evaluation |                |       |   |
|                          |         |          |                |                | Exposure no. 1   | Exposure no. 2 |       |   |
| AlphaE                   | SRDN-3a | 01:00    | 3.0            | 3.0            | 1.0              | $\pm$          | $\pm$ | + |
|                          |         | 02:00    | 2.0            | 4.0            | 2.0              | +              | -     | + |
|                          |         | 03:00    | 2.0            | 3.0            | 2.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 04:00    | 1.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 05:00    | 1.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 06:00    | 1.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 07:00    | 1.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 08:00    | 2.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 09:00    | 2.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 10:00    | 2.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 11:00    | 2.0            | 3.0            | 2.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 12:00    | 2.0            | 3.0            | 2.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 13:00    | 2.0            | 2.0            | 1.0              | +              | +     | + |
|                          |         | 14:00    | 1.0            | 2.0            | 2.0              | +              | +     | + |
|                          |         | 15:00    | 2.0            | 3.0            | 2.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 16:00    | 2.0            | 4.0            | 2.0              | +              | -     | + |
|                          |         | 17:00    | 2.0            | 2.0            | 2.0              | +              | +     | + |
|                          |         | 18:00    | 2.0            | 2.0            | 2.0              | +              | +     | + |
|                          |         | 19:00    | 1.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 20:00    | 2.0            | 3.0            | 2.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 21:00    | 2.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 22:00    | 2.0            | 3.0            | 2.0              | +              | $\pm$ | + |
|                          |         | 23:00    | 3.0            | 3.0            | 2.0              | $\pm$          | $\pm$ | + |
|                          |         | 00:00    | 2.0            | 3.0            | 1.0              | +              | $\pm$ | + |

Jako kryterium oceny wyników pomiarów każdego detektora zastosowałam rekomendowaną dla pomiarów porównawczych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA, 2007) wartość wskaźnika z dla testu z-score. Uzyskałam zadowolające wyniki dla czujnika AlphaE oraz dla sondy radonowej SRDN-3a (wartość  $A < B$ ) względem wartości urządzenia referencyjnego w obu ekspozycjach, jak i dla detektorów śladowych CR-39 w drugiej ekspozycji. **Wyniki najbliższe wartościom referencyjnym pochodziły z pomiarów detektorem AlphaE w drugiej - kwartalnej ekspozycji (Tab. 18).**

## Podsumowanie

Prace składające się na cykl publikacji szeroko pokazują istotę problemu związanego z występowaniem stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , o wartościach w znaczącej większości przekraczających ustalony dopuszczalny limit  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Uzyskane rezultaty stanowią źródło istotnych danych naukowych, jak i praktycznych wniosków w tym zakresie. Wśród nich znalazły się także nowe rozwiązania (metody przeliczeniowe, metody kontrolne) nie tylko w skali kraju, Europy, ale i świata. Uważam, że zaprezentowane osiągnięcie naukowe stanowi istotny wkład w badania z zakresu inżynierii górniczej, geochemii, chemii środowiska i radiochemii i doskonale wpisuje się w tematykę dyscypliny: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. W mojej opinii jest także istotnym bodźcem do kontynuowania badań w rozpoznanym zakresie.

Podsumowanie tematycznie powiązanych obszarów badawczych przedstawiłam chronologicznie. W sformułowanych wnioskach odniosłam się szczegółowo do definiowanych celów trzech obszarów.

W obszarze dotyczącym **kompleksowej analizy charakteru zmienności stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiektach podziemnych**:

- Potwierdziłam, że w obiektach o naturalnym sposobie wentylacji (głównie konwekcji) przebieg zmian sezonowych w największym obszarze radon prone area w Polsce jest porównywalny. Mniejsze wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  są notowane jesienią i zimą, a większe od kwietnia do września. **W obiektach dobrze izolowanych od atmosfery początek wzrostu i początek spadku wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  nakłada się z tzw. okresami przejściowymi, występującymi wczesną wiosną i jesienią**. Jest to typowe, w sytuacji, kiedy naturalny, grawitacyjny przepływ powietrza jest mocno ograniczony, lub niemal zupełnie hamowany. Dzieje się tak, z uwagi na niewielką różnicę temperatury powietrza pomiędzy wnętrzem obiektu, a otoczeniem. Utrudniona cyrkulacja, a tym samym wymiana powietrza z otoczeniem sprawia, że wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  są największe od wiosny do lata.
- Na przykładzie podziemnego laboratorium geodynamicznego w Książu opisałam wpływ izolacji górotworu żelbetową obudową górniczą na charakter zmian sezonowych. Wskazałam, że obudowa stanowi barierę ograniczającą wielkość strumienia radonu wydostającego się z górotworu do wnętrza wyrobisk – zmniejszając porowatość ośrodka skalnego. Jest to szczególnie dobrze widoczne w miejscu wyraźnej akumulacji w strefie uskoku, gdzie rejestrowane stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były 3-krotnie większe od tych, jakie występowały w strefie izolowanego górotworu.
- Wykazałam, że obiekty, w których wentylacja odbywa się w sposób wymuszony charakteryzuje inny przebieg zmian sezonowych. Pokazałam, że w Sztolni Fluorytowej w Kletnie w ciepłym okresie roku (przypadającym pod koniec lata), aż do połowy jesieni wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były małe i mało zmienne. Wyraźna zmienność poziomu stężenia rozpoczynała się późną jesienią i trwała do zimy. Większe średnie wartości stężenia radonu reprezentowały pierwszą połowę roku kalendarzowego (od stycznia do czerwca), a mniejsze drugą (od lipca do grudnia).
- Na przykładzie Sztolni Fluorytowej w Kletnie oraz sztolni nr 19 i 19a w Kowarach doprecyzowałam charakterystykę zmian krótkookresowych w obiektach wyposażonych w system wentylacji mechanicznej. **Wskazałam, że w Sztolni Fluorytowej w Kletnie znaczne dobowe wahania stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  były notowane praktycznie przez cały rok, z wyjątkiem okresu od końca lipca do końca września**. Dobowe zmiany koncentracji radonu wewnątrz sztolni podporządkowane były okresom załączania wentylacji mechanicznej. Do jej uruchomienia dochodziło po zamknięciu obiektu dla zwiedzających. W czasie działania systemu od około godziny 17:00 stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  systematycznie się obniżało do niemal stałej minimalnej wartości. Wartość tą, w zależności od początkowego maksymalnego poziomu, stężenie osiągało około godziny 19:00 w zimie lub dopiero około godziny 1:00 w nocy (wiosną i latem), kiedy to w ciągu dnia stężenie aktywności  $^{222}\text{Rn}$  wzrastało do wartości maksymalnych dla całego roku

kalendaryzowanego. Mimo podobnego przebiegu zmian dobowych w zimie, wiosną i latem, wyraźnie zaznaczały się różnice w wartościach stężenia aktywności radonu. Potwierdziło to występowanie konwekcji w okresie zimowym. Wykazałam, że **radon jest wynoszony z obiektu w sposób naturalny jedynie gdy uruchomione zostają prądy konwekcyjne, nawet w sytuacji, kiedy wentylacja mechaniczna jest wyłączona**, tj. w ciągu dnia od 10:00 do 16:00 jesienią oraz od 9:00 do 16:00 zimą. **W okresie późnowiosennym i letnim konwekcja nie występuje, co prowadzi do znacznego zwiększenia stężenia aktywności radonu wewnątrz sztolni** względem okresu chłodniejszego, kiedy to temperatura powietrza atmosferycznego spada poniżej średniej rocznej temperatury powietrza wewnątrz obiektu. Sprzyja temu wyłączenie systemu mechanicznej wentylacji w ciągu dnia, tj. od 9:00 do 17:00 wiosną oraz od 8:00 do 17:00 latem. Stężenie aktywności radonu jest skorelowane z temperaturą powietrza atmosferycznego.

- W przypadku sztolni nr 19 i 19a w Kowarach wykazałam, że operowanie systemem wentylacji mechanicznej prowadzone jest w nieprawidłowy (mało efektywny) sposób. Okresy załączania systemu wentylacji nie są dostosowywane do godzin pracy obiektu. Również czas działania wentylatorów jest zbyt krótki w odniesieniu do wielkości notowanego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  i tempa wzrostu jego wartości. Wskazałam, że niezbędna jest kontrola dawek promieniowania jonizującego otrzymywanych przez każdego z pracowników (dozymetria indywidualna) oraz pomiary dozymetryczne w środowisku pracy. Zaproponowałam skrócenie czasu pracy pracowników, usprawnienie systemu wentylacji mechanicznej, a następnie monitorowanie (na bieżąco) sytuacji radiacyjnej osób przebywających we wnętrzu kopalni. Jedno z rozwiązań polepszających warunki pracy wykonywanej w narażeniu zostało wdrożone. Uruchomiono 3 wentylatory: dwa na trasie turystycznej w sztolni nr 19a, jeden w szybie wentylacyjnym. Maszyny wirnikowe zainstalowane w szybie miały być załączane automatycznie wraz z uruchomieniem instalacji elektrycznej trasy turystycznej. Dzięki temu jedna część systemu wentylacyjnego obiektu miała działać praktycznie bez przerwy w ciągu dnia, natomiast druga złożona z dwóch wentylatorów umieszczonych wzdłuż trasy turystycznej w sztolni nr 19a miała być załączana tylko przed otwarciem obiektu, między godziną 7:00, a 8:00 rano i wyłączana po trzech godzinach pracy między 10:00, a 11:00 przed południem.
- Dzięki przeprowadzonym po raz pierwszy pomiarom stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w **podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu wykonałam pierwszą charakterystykę zmian krótkookresowych.** Okresy o wyraźnie większych lub wyraźnie mniejszych wartościach stężenia nie występują w obiekcie w ciągu dnia.
- Wskazałam, że **podziemne laboratorium geodynamiczne w Książu mimo położenia w silnie spękanych i mocno nasiąkliwych skałach osadowych jest obiektem dobrze odizolowanym od wpływu czynników zewnętrznych, głównie zmian temperatury powietrza atmosferycznego. Konwekcja nie działa od wiosny do jesieni (maj–październik).** W tym czasie, gdy średnia dobową temperaturą powietrza atmosferycznego rośnie powyżej średniej temperatury powietrza wewnątrz (ok.  $10^{\circ}\text{C}$ ) radon gromadzony jest w stagnującym powietrzu wewnątrz. Naturalna wentylacja obiektu inicjująca konwekcyjny przepływ powietrza rozpoczyna się dopiero w listopadzie i trwa do kwietnia, kiedy to średnia dobową temperaturą powietrza atmosferycznego jest mniejsza od średniej temperatury wewnątrz laboratorium (spada poniżej  $10^{\circ}\text{C}$ ). Im większa różnica temperatur tym wspomniany proces zachodzi sprawniej.
- Charakterystykę zmienności krótkookresowej w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu uzupełniłam oceną wpływu żelbetowej obudowy górniczej izolującej wielkość strumienia radonu wydostającego się z górotworu do wnętrza wyrobisk. Wskazałam, że stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  podlegają nieregularnym zmianom krótkookresowym (dobowym), szczególnie widocznym w tzw. okresach przejściowych. Co dodatkowo potwierdziło fakt, że zmiany dobowe są uzależnione od zmian sezonowych. Widoczne w ciągu doby okresy, w których stężenie rośnie lub maleje są bardzo krótkie. Również różnice pomiędzy wartościami stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w tych okresach są

niewielkie (na poziomie niepewności pomiaru urządzenia SRDN-3). W przypadku wyrobiska bezpośrednio odizolowanego od górotworu obudową żelbetową blokowanie konwekcji rozpoczynało się już we wrześniu i trwało przez 15 dni. Od października konwekcję w całym obiekcie spowalniał wzrost temperatury powietrza atmosferycznego o 2 – 3°C względem średniej temperatury panującej wewnątrz. Swobodny i nieograniczony przepływ powietrza rozpoczynał się dopiero w listopadzie i trwał do początku kwietnia.

- Jako pierwsza wykonałam kompleksową charakterystykę zachowania się radonu w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Potwierdziłam, że zmiany krótkookresowe (dobowe) stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występują w tej części obiektu głównie w okresach przejściowych, tj. wczesną wiosną oraz jesienią i podlegają zmianom podporządkowanym cyklom naturalnej konwekcyjnej wymiany powietrza z atmosferą. W pozostałych miesiącach roku koncentracje radonu są nieregularnie i mało zmienne w ciągu doby. Największe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  występują jednak częściej w ciągu dnia, tj. od rana do południa.

**W obszarze oceny kontrolnej warunków panujących w obiektach podziemnych w aspekcie przepisów ochrony radiologicznej w Polsce:**

- Potwierdziłam, że w Sztolni Fluorytowej w Kletnie nie ma ryzyka przekroczenia dawki efektywnej uznanej przepisami prawa za dopuszczalną (1 mSv/rok) dla osób z ogółu ludności. W ciągu jednej wizyty trwającej 30 minut zwiedzający są narażeni na otrzymanie dawki efektywnej wynoszącej od 0,004 do 0,02 mSv.
- Oszacowałam, że już po jednej godzinie spędzonej zarówno w sztolni nr 19, jak i 19a w Kowarach dawki efektywne były bliskie 1 mSv wartości dopuszczalnej w ciągu roku dla osób z ogółu ludności. Największe narażenie na promieniowanie wystąpiło w cieplejszym okresie roku.
- Wskazałam że prawdopodobieństwo otrzymania przez zwiedzających efektywnej dawki przekraczającej (ustalony mocą ustawy „Prawo atomowe”) dopuszczalny roczny limit 1 mSv/rok, ze względu na krótki czas zwiedzania (przebywania wewnątrz) nie występuje w turystycznych sztolniach Kopalni Złota w Złotym Stoku. Pozwala to przypuszczać, że warunki panujące wewnątrz obiektu są bezpieczne dla dzieci i kobiet w ciąży.
- Wskazałam, że w podziemnej trasie turystycznej pod dziedzińcem zamku Książ dawki efektywne otrzymywane w ciągu jednej godziny wynoszą średnio od 0,003 – 0,005 mSv/h. Dla osób z ogółu ludności, głównie turystów, w tym także osób nieletnich jak uczniowie, praktykanci przebywający w obiekcie jednorazowo na okres nie dłuższy niż jedna godzina w ciągu doby (czas zwiedzania wynosi około 40 minut), ryzyko otrzymania dawki efektywnej na poziomie większym niż 1 mSv/rok nie istnieje.
- Wykazałam, że zatrudnieni w Sztolni Fluorytowej w Kletnie mogą w ciągu roku otrzymywać dawki efektywne przekraczające roczny dopuszczalny limit (20 mSv/rok) wartości dla pracowników w Polsce. Wszyscy, zatrudnieni do obsługi ruchu turystycznego pracują w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące i powinni zostać bezwzględnie przydzieleni do odpowiedniej kategorii narażenia pracowników (głównie A).
- Oszacowałam, że w turystycznej sztolni nr 19a w Kowarach pracownicy byli narażeni na otrzymywanie dawki efektywnej wielokrotnie przekraczającej dopuszczalny w ciągu roku próg wartości (20 mSv/rok). Moim zdaniem pracownicy powinni zostać zakwalifikowani przez kierownika obiektu do odpowiedniej kategorii A (dawka indywidualna > 6 mSv/rok) narażenia. Dawki promieniowania na poziomie narażenia kategorii B pracowników (większym niż 1 mSv/rok) według moich obliczeń otrzymywali oni już po jednej godzinie wewnątrz każdej ze sztolni w Kowarach. Podobnemu poziomowi narażenia poddawane były osoby wykonujące niezbędne prace adaptacyjne w nieturystycznej sztolni 19 w Kowarach. **Należy podkreślić, że warunki panujące w sztolniach w Kowarach są wysoce szkodliwe dla zdrowia pracowników i zwiedzających.**
- Ustaliłam, że w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu efektywne roczne dawki promieniowania dla pracowników wynoszą od 1 do 10 mSv/rok. Największe, ustalone

w strefie uskoku mogą nieznacznie przekraczać 20 mSv/rok. Osoby zatrudnione do obsługi ruchu obiektu należy zakwalifikować do pracowników kategorii B (>1 mSv/rok). Czas efektywnie przepracowany jest zróżnicowany. W najgorszym przypadku może sięgać 1768 godzin w roku, w najlepszym nie przekracza 50 godzin w ciągu roku. Przyjmowane w ciągu godziny dawki efektywne wynoszą od 0,001 do 0,12 mSv/h i są odpowiednio większe w cieplejszych, a mniejsze w chłodniejszych okresach roku. **Przebywanie w podziemnym laboratorium geodynamicznym w Książu jest bezpieczne z punktu widzenia ochrony radiologicznej oraz przepisów BHP.**

- Określiłam, że w nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie roczna dawka promieniowania jonizującego jest bliska lub może nawet przekroczyć wartość graniczną ustaloną zarówno dla pracowników B i A kategorii narażenia. Ryzyko to rośnie wraz z wydłużeniem czasu pracy. Począwszy od około stu godzin pracy niezbędnych do przekroczenia wartości 1 mSv/rok przewidzianego dla pracowników kategorii B.
- Ustaliłam, że dla osób zatrudnionych do obsługi ruchu turystycznego w podziemnej trasie turystycznej pod dziedzińcem zamku Książ najbezpieczniejszymi pod względem ochrony radiologicznej miesiącami pracy w okresie zimowym, są styczeń, luty i marzec, a jesienią od października (a w roku 2017 od wyjątkowo zimnego sierpnia) do grudnia. Natomiast wiosną i latem oszacowane wartości dawki efektywnej promieniowania jonizującego pochodzącego od  $^{222}\text{Rn}$  i produktów jego rozpadu są największe. Dawka efektywna może w najgorszym przypadku sięgać 7,8 mSv w skali roku.
- Określiłam, że **średnie roczne wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  są większe od maksymalnego dopuszczalnego w polskich przepisach prawa prognozy wartości w praktycznie wszystkich badanych obiektach podziemnych**. Wartość 300 Bq/m<sup>3</sup> w Sztolni Fluorytowej w Kletnie jest przekroczona wielokrotnie, w podziemnym laboratorium geodynamicznym średnio od kilku, a w strefie uskoku nawet do kilkunastu razy. W nowo odkrytych partiach Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie średnia roczna wartość stężenia jest niemal 10-krotnie większa od dopuszczalnego limitu 300 Bq/m<sup>3</sup> w ciągu roku. W sztolniach w Krobicy średni roczny limit wartości stężenia jest przekraczany przez 8 miesięcy roku (od października do maja). W podziemnej trasie turystycznej pod dziedzińcem zamku Książ dla niemal 3-letniego okresu badań średnia wartość stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  jest równa 1025 Bq/m<sup>3</sup>.
- **Wykonałam pierwszą w Polsce kompleksową ocenę warunków narażenia na zwiększone promieniowanie na wszystkich etapach powstawania podziemnej trasy turystycznej w Książu i Krobicy**. W przypadku Książa wskazałam, że w okresie niezaburzonym pracami budowlanymi wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  podlegały zmienności sezonowej charakterystycznej dla obiektów podziemnych dobrze izolowanych od atmosfery. Po rozpoczęciu prac udostępniających wpływ na charakter obserwowanych zmian miały warunki wymuszonej wentylacji obiektu, tj. wielkość przepływającego strumienia powietrza i kierunek jego cyrkulacji. W wyniku czego w cieplejszych okresach roku (maj–wrzesień) notowałam stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  na podobnym lub nieznacznie mniejszym poziomie wartości niż jesienią i zimą. Kierunek przepływu powietrza, głównie latem wskazywał, że cyrkulacja odbywała się z północnego–zachodu na południe. Powietrze było wyprowadzane z wyrobisk do atmosfery przez okno wentylacyjne znajdujące się około 15 metrów poniżej poziomu klatek schodowych. Zimą proces wymiany powietrza zachodził w odwrotnym kierunku. Warunki przewietrzania obiektu miały wpływ na rozkład dobowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  jedynie w tzw. okresach przejściowych (kwiecień – październik) dodatkowo niezaburzonych pracami udostępniającymi. **Widoczne zmiany dobowe stężenia radonu zachodziły w ciągu nie więcej niż kilkunastu dni w roku, kilku dni wiosną i kilku jesienią. W związku z tym nie odgrywają one istotnego znaczenia w planowaniu czasu pracy pod ziemią. Na przykładzie sztolni w Krobicy wykazałam, jak ważne jest prowadzenie działań zaradczych**. Po wprowadzeniu otamowania ślepego wyrobiska narażenie na **zwiększone promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu i jego pochodnych występuje tylko w okresach o utrudnionej wymianie powietrza (tzw.**



**okresach przejściowych) zaobserwowanych między pierwszym a drugim tygodniem maja, w drugiej połowie września i października oraz przez 10 dni listopada.**

- Na przykładzie trasy turystycznej w Książu i Krobicy potwierdziłam, że prowadzenie pomiarów monitoringowych stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w okresie poprzedzającym udostępnienie obiektu dla turystów, w czasie trwania prac budowlanych (adaptacyjnych) oraz po udostępnieniu jest niezbędne. Pozwala to kompleksowo określić charakter naturalnej wentylacji obiektu, zmiany poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiekcie, w tym po zintensyfikowaniu wprowadzonymi działaniami zaradczymi wentylacji (wykonanie tamy ślepego wyrobiska, klatek schodowych dla turystów w szybach oraz otwarcie okna wentylacyjnego).
- **Jako pierwsza w Polsce opracowałam bazę danych o współczynnikach korekcyjnych (kwartalnych i miesięcznych) do szacowania wartości (poziomu) średniego rocznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w podziemnych miejscach pracy. Jej zastosowanie jest możliwe także dla obiektów znajdujących się w innych krajach Europy, na innych kontynentach, w zbliżonych do Polski strefach klimatycznych, tj. w klimacie umiarkowanym o cechach przejściowych pomiędzy klimatem kontynentalnym a klimatem oceanicznym (morskim) z wyraźnie zaznaczonymi czterema porami roku, tj. wiosną, latem, jesienią oraz zimą.**
- Potwierdziłam, dla lepszego oszacowania poziomu średniego rocznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  współczynnik korekcyjny (przeliczeniowy) należy dobierać do indywidualnych cech obiektu podziemnego (głównie sposobu wymiany powietrza i stopnia izolacji jego wnętrza od atmosfery). Dla obiektów o naturalnej wymianie powietrza dokładniejsze szacowanie poziomu rocznego stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  można uzyskać przy wykorzystaniu współczynników korekcyjnych miesięcznych  $k_{1m}$ . W przypadku obiektów wentylowanych mechanicznie większą dokładność w określaniu średniego rocznego poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  otrzymuje się przy zastosowaniu współczynników korekcyjnych kwartalnych  $k_{3m}$ . W przypadku braku informacji na temat intensywności wentylacji lub gdy obiekt przewietrzany jest w sposób kombinowany (mieszany) jako reprezentatywne dla wyznaczenia średniej rocznej wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  można z powodzeniem przyjąć wartości średnie zarówno  $k_{1m}$ , jak i  $k_{3m}$ .
- Uważam, że opracowana po raz pierwszy i jedyna dostępna w Polsce baza współczynników korekcyjnych jest pierwszym użytecznym narzędziem w określaniu poziomu wielkości (lub rzędu wielkości) stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiektach podziemnych. Z pewnością przysłuży się usprawnieniu pracy kierowników obiektów podziemnych. Jej zastosowanie może stanowić alternatywne rozwiązanie dla długookresowych pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , głównie w przypadku niewielkiego zaplecza finansowego i pomiarowego. Dotyczy to głównie miejsc, w których zapewnienie optymalnych i bezpiecznych w myśl przepisów ochrony radiologicznej warunków pracy jest kluczowe z uwagi na zwiększone koncentracje stężenia radonu.
- Zweryfikowałam ustaloną przez GIS specyfikację prowadzenia pomiarów dozymetrycznych w miejscu pracy, w oparciu o wyniki badań terenowych. W porównaniach wykorzystywałam 4 rodzaje detektorów radonu: półprzewodnikowe sondy SRDN-3a, czujnik AlphaE z diodą krzemową w komorze dyfuzyjnej, monitor AlphaGUARD z komorą jonizacyjną oraz detektory śladowe CR-39. Pomiary przeprowadziłam po raz pierwszy w Polsce w obiekcie hydrotechnicznym dobrze odizolowanym od wpływu warunków atmosferycznych obudową żelbetową i o znanej specyfice pracy osób obsługi – średnia aktywność przez dwie godziny w tygodniu.
- Wykazałam, że równoległe prowadzona kampania pomiarowa z wykorzystaniem urządzeń do pomiarów krótkookresowych pozwala na dokładną ocenę ze wskazaniem różnic i podobieństw stosowanych metod oraz technik pomiaru. Potwierdziłam, że **detektory do pomiarów screeningowych są mniej odporne na zmiany (nawet niewielkie) warunków pomiaru. Uwidacznia to duże rozproszenie danych względem wartości średniej z pomiarów od 1δ do 2δ. W takich przypadkach rozkład danych przyjmuje najczęściej**

asymetrię prawostronną. Wpływ na rozkład rejestrowanych wartości ma także długość pomiaru i częstotliwość rejestracji. Krótszy pomiar (nawet zbiór  $n < 50$ ) prowadzony z dużą częstotliwością (zapis danych co 10–minut) pozwala na uzyskanie stabilnych, nierozproszonych wyników, co przekłada się na niewielką, wręcz jednostkową liczbę danych identyfikowanych jako odstające.

- **Wskazałam, że czas trwania okresu pomiarowego, jak i częstotliwość zapisu danych należy dobrać do charakteru prowadzonych pomiarów.** Rutynowe pomiary nastawione jedynie na podanie wyniku dla określenia średniorocznego poziomu stężenia aktywności radonu można prowadzić w każdym cyklu zapisu danych w okresie minimum 1 – 3 doby z wykorzystaniem detektorów do pomiarów screeningowych, jak i kwartału pasywną techniką pomiaru. Detektory śladowe w przeciwieństwie do detektorów półprzewodnikowych nie dają pełnego obrazu rozkładu w czasie stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiekcie. Ich wykorzystanie do obrazowania zmian w cyklu sezonowym jest możliwe w przypadku prowadzenia pomiarów kwartalnych przez okres minimum jednego roku. **Dzięki przeprowadzonym testom wykazałam, że z uwagi na możliwość uzyskania dużej rozpiętości wyników w dwóch różnych okresach pomiaru (2 miesiące, kwartał) najbezpieczniej jest czas jednego pomiaru ustawić na minimum 3 miesiące w trybie z co najmniej jednym powtórzeniem, lub też dla sprawdzenia wyniku prowadzić równoległe pomiary z wykorzystaniem dodatkowego detektora CR–39.**
- **Potwierdziłam, że z uwagi na dużą wiarygodność (dokładność) pomiarów w prowadzonych ekspozycjach wszystkie z testowanych detektorów mogą być powszechnie stosowane w pomiarach rutynowych, jak i naukowych.** Uważam, że do pomiarów mających na celu poza podaniem wyniku średniego, również wskazanie szczegółowego zakresu i charakteru zmian rejestrowanego stężenia najlepiej wybierać aktywne techniki pomiaru. Mając na uwadze komfort użytkownika (kierownika zakładu, zleceniodawcy) pomiar z wykorzystaniem detektorów do pomiarów screeningowych jest prostszy, pozwala na bieżącą kontrolę stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , jednak jest bardziej kosztowny. Natomiast pomiar z zastosowaniem detektorów śladowych mimo, że nie daje możliwości podglądu wyników w trakcie trwania pomiarów, to nie nakłada na zleceniodawcę konieczności ponoszenia tak dużych nakładów finansowych związanych z zakupem aparatury, wobec czego jest dostępniejszy, przez co lepiej sprawdza się w pomiarach typowo komercyjnych.
- **Wskazałam, że zastosowany po raz pierwszy w pomiarach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiektach podziemnych w Polsce detektor AlphaE (łącznie 4152 godziny pracy) przy umiarkowanych kosztach łączy zalety urządzeń dedykowanych do pomiarów krótkookresowych i monitoringowych.** Umożliwia on detekcję stosunkowo niewielkich (od  $20 \text{ Bq/m}^3$ ) wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , może stanowić interesującą alternatywę dla wszystkich pozostałych testowanych detektorów, pod warunkiem, że przy pomiarach screeningowych będzie pracował minimum 1 – 3 doby, a w pomiarach długookresowych najlepiej przez co najmniej 1 kwartał.
- Wskazałam, że podstawę do zmiany urządzenia pomiarowego może stanowić zbyt mała liczebność zbioru danych ( $n < 100$ ), lub znaczący udział procentowy danych odstających ( $>20\%$  względem ogółu danych). Istotny jest również poziom czułości detektora (LLD), minimum 2-krotnie mniejszy od spodziewanego średniego stężenia aktywności radonu w powietrzu badanego obiektu.
- Zauważyłam, że proces pomiarowy można prowadzić w szerokim zakresie stężenia aktywności radonu ( $0,02\text{--}10\,000 \text{ kBq/m}^3$ ). Jednak dla niskich progów czułości urządzenia (LLD) zaleca się jego zastąpienie detektorami śladowymi. Dla wartości stężenia aktywności radonu większych od  $\text{LLD} \geq 100 \text{ Bq/m}^3$  można z powodzeniem korzystać z detektorów półprzewodnikowych. Każdy z detektorów cechuje stabilny proces pomiaru, a o charakterystyce danych odstających decyduje położenie obszaru krytycznego: wartość średnia  $\pm 3\text{SD}$  (obszar dwustronny) oraz wartość średnia  $+ 3\text{SD}$  (asymetria prawostronna). Procentowy udział danych odstających w obszarach krytycznych jest porównywalny. Dla

czujnika AlphaE to: 13,0% i 13,5% odpowiednio w dwumiesięcznej i kwartalnej ekspozycji, dla sondy radonowej SRDN-3a to 9,81% danych z ekspozycji dwumiesięcznej. Dla urządzenia referencyjnego AlphaGUARD jest to 15,8% względem ekspozycji dwumiesięcznej oraz 10,5% względem ekspozycji kwartalnej.

- Rozszerzyłam bazę obiektów podziemnych w obszarze Sudetów i Przedgórze Sudeckiego (największy i najważniejszy obszar *radon prone area* w Polsce), w których prowadzone są długookresowe (ciągłe) pomiary stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  o charakterze środowiskowym i dozymetrycznym. Do 2012 roku były to: dwie sztolnie, jedna kopalnia, jedna jaskinia. Od 2014 do 2023 roku do bazy włączyłam kolejno: dwie sztolnie, nowe partie jaskini, jedno podziemne laboratorium, jedną trasę w podziemiach zamku oraz jeden korytarz techniczny w obiekcie hydrotechnicznym.

**W obszarze wykorzystania pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w obiektach podziemnych do badań znacznikowych ruchów powietrza, na granicy litosfera–atmosfera:**

- Sprawdziłam, że wykorzystanie radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) jako znacznika efektywności wymiany powietrza turystycznego obiektu podziemnego z atmosferą ma ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa i komfortu pracy w obiektach podziemnych, oraz zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego osób zwiedzających podziemne obiekty turystyczne.
- Na przykładzie sztolni w Krobicy określiłam warunki wymiany powietrza, efektywność działania naturalnej wentylacji, jak i sposób cyrkulacji powietrza. W sytuacji, gdy odbywa się ona w całym systemie wyrobisk o intensywności wentylacji (krotności wymiany powietrza w obiekcie) decydują czynniki atmosferyczne. Uzyskałam wyniki, które pokazały **utrudnienia w wymianie powietrza między wnętrzem obiektu a atmosferą. Wskazałam, że trwają one 7 dób (od 7 do 14) w maju, w II połowie września (od 15 do 27 doby) oraz od 2 do 3 dób w październiku i listopadzie. W każdym przypadku zatrzymanie procesu wymiany powietrza następuje w ustalonych warunkach temperatury powietrza atmosferycznego i temperatury gruntu.** Mniej istotnym parametrem atmosferycznym wpływającym na proces wymiany powietrza w okresach przejściowych jest kierunek wiatru. Tylko w tym konkretnym obiekcie wiatry o kierunku zachodnim i północno–zachodnim wspierają proces wymiany powietrza przez kilka dni kwietnia (4 doby) oraz maja (4 doby).
- **Wskazałam potrzebę wyraźnej optymalizacji warunków wymiany i przepływu powietrza w sztolniach w Krobicy we wrześniu, październiku, listopadzie, kwietniu i maju.** Jako najlepszą z metod zarekomendowałam wprowadzenie wymuszonego przepływu powietrza na poziomie równym lub większym niż  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  i spiętrzeniu rzędu 2–5 Pa pozwalającym na co najmniej 5–krotną w ciągu godziny wymianę objętości powietrza w obiekcie.
- **Zaobserwowałam, że w sztolniach w Krobicy w okresach przejściowych, tj.: w maju, październiku i listopadzie wymiana powietrza zachodzi bez zakłóceń średnio od 6 do 8 godzin w ciągu doby.** Wskazałam, że niezaburzonej wymianie powietrza trwającej w ciągu dnia od godziny 6:00 do 18:00 w październiku, od 11:00 do 18:00 w listopadzie oraz od godziny 11:00 do 17:00 w maju towarzyszy widoczna różnica temperatur pomiędzy wnętrzem obiektu a otoczeniem. Wynosi ona od nieco poniżej  $1^\circ\text{C}$  do  $3^\circ\text{C}$  w październiku, od ponad  $2^\circ\text{C}$  do ponad  $4^\circ\text{C}$  w listopadzie oraz co najmniej  $3^\circ\text{C}$  w maju w sztolniach w Krobicy.
- Na przykładzie sztolni w Krobicy wykazałam, że izotop  $^{222}\text{Rn}$  można traktować jako znacznik naturalnej wymiany powietrza między wnętrzem obiektu podziemnego a atmosferą. Dobrej, gdy powietrze wzbogacone w radon wypływa na zewnątrz lub utrudnionej, gdy powietrze zubożone w radon wpływa do sztolni, a w jej wnętrzu dochodzi do akumulacji i wyraźnego wzrostu wartości stężenia. Takiemu zastosowaniu radonu sprzyja duża samodzielność geochemiczna. Dzięki niej radon łatwo uwalnia się z litosfery

i w strumieniu gazów przemieszcza się lub stagnuje w zamkniętych przestrzeniach podziemnych miejsc pracy.

## Literatura

Szczegółowy wykaz literatury prezentującej przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w podziemnych obiektach turystycznych w Polsce, Europie i w świecie zawiera 10 publikacji naukowych cyklu. Spis literatury przedstawiony w autoreferacie zawiera tylko nieliczne źródła, w zakresie przepisów krajowych i unijnych oraz głównych kierunków badań nad radonem prowadzonych przez ośrodki naukowe w Polsce.

- Chibowski S., Komosa A., 2001. Radon concentration in basements of old town buildings in the Lublin region, Poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 247. 1. 53–56.
- Ciężkowski M., 1978. Wstępne pomiary stężenia niektórych gazów i radioaktywności w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, No. 311. *Studia Geograficzne XXIV*. 91–95.
- Ciężkowski W., 1989. Badania hydrogeologiczne obszaru krasowego Masywu Śnieżnika. [w:] *Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie. Badania i udostępnienie*. Red. Alfred Jahn, Stefan Kozłowski, Teresa Wiszniowska. Polska Akademia Nauk Oddział we Wrocławiu. Wrocław. 180–201.
- EU Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. and repealing Directives 89/618/Euratom. 90/641/Euratom. 96/29/Euratom. 97/43/Euratom and 2003/122/ Euratom. *Official Journal of the European Union*. 17.1.2014., L 13/1 – L 13/73.
- Fijałkowska-Lichwa L., 2012. Krótkookresowe zmiany stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w podziemnych obiektach turystycznych. Praca doktorska. Niepublikowana. Politechnika Wrocławska. Wrocław.
- Fijałkowska-Lichwa L., 2014. Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 135. 25–35.
- Fijałkowska-Lichwa L., 2016. Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned uranium mine ‘Podgórze’ in Kowary (Sudety Mts., Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*. 165. 13–23.
- Fijałkowska-Lichwa L. 2020. The assessment of lining structure impact on radon behaviour inside selected underground workings under the cour d’honneur of Książ castle. *Journal of Environmental Radioactivity*. 165. 253–269.
- Fijałkowska-Lichwa L., Przylibski T. A., 2011. Short term  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration changes in underground spaces with limited air exchange with the atmosphere. [in:] *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 11. 1179–1188.
- Fijałkowska-Lichwa L., Przylibski T. A., 2016. First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences. *Journal of Environmental Radioactivity*. 165. 253–269.
- Fijałkowska-Lichwa L., Przylibski T. A., 2020. A comprehensive characteristic of  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration changes and ionising radiation exposure in newly discovered parts of Bear Cave in Kletno, Poland. *Radiation Protection Dosimetry*. doi.org/10.1093/rpd/ncz263.
- IAEA, 2007. International Atomic Energy Agency. Report on the IAEA-CU-2006-03 World-wide open proficiency test on the determination of gamma emitting radionuclides. Vienna.
- IAEA, 2014. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. No. GSR Part 3. Vienna.
- ICRP, 2011. International Commission On Radiation Protection. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny. ICRP Publication 115. Ann.
- ICRP, 2014. International Commission On Radiation Protection. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43 (3).

- ICRP, 2017. International Commission On Radiation Protection. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Vol. 46 No. 3/4.
- Instrukcja producenta AlphaE, 2020. Bertin Technologies. 1–40. [praca niepublikowana].
- Kozak K., Mazur J., Vaupotić J., Kobal I., Grządziel D., Kovács T., Omran K. M. H. 2010. Poziom radioaktywności naturalnej w starych sztolniach uranowych (Dolina Białego), schroniskach tatrzańskich oraz w Jaskiniach Mylnej i Mroźnej. Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek. Zakopane. Poland.
- Kozak K., Mazur J., Kozłowska B., Karpińska M., Przylibski T.A., Mamont-Cieśla K., Grządziel D., Stawarz O., Wysocka M., Dorda J., Żebrowski A., Olszewski J., Hovhannisyan H., Dohojda M., Kapała J., Chmielewska I., Kłós B., Jankowski J., Mnich S., Kołodziej R. 2011. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. Applied Radiation and Isotopes. 69. 1459–1465.
- Kozak K., Mazur J., Vaupotić J., Grządziel D., Kobal I., Omran K.M.H. 2013. The potential health hazard due to elevated radioactivity in old uranium mines in Dolina Białego, Tatra Mountains, Poland. Isotopes in Environmental and Health Studies. 49 (2). 274–282.
- Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy. Monitor Polski. 2021. poz. 169.
- Ogorzałek A., 2009. Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie – przewodnik. Wydawnictwo Zet. Wrocław. 3–48.
- Olszewski J., 2006. Ekspozycja na radon w podziemnych trasach turystycznych. [w:] Radon w środowisku życia, pracy i nauki mieszkańców Dolnego Śląska. Polski Klub Ekologiczny. Okręg Dolnośląski. Wrocław. 55–62.
- Olszewski J., Chruścielewski W., Jankowski J., 2005. Radon on underground tourist routes in Poland. International Congress Series 1276. Elsevier. 360–361.
- Olszewski J., Kacprzyk J., Kamiński Z. 2010. Assessment of radiation exposure of miners to radon and its daughter products in selected non-ferrous metal mines. Medycyna Pracy. 61. 6. 635–639.
- Olszewski J., Zmyślony M., Wrzesień M., Walczak K., 2015. Occurrence of radon in the Polish underground tourist routes. Medycyna Pracy. 66 (4). 557–563.
- Olszewski J. 2019. Ocena zawodowego narażenia powstałego w wyniku ekspozycji na radon w podziemnych trasach turystycznych i uzdrowiskach. Monografia habilitacyjna. Instytut Medycyny Pracy w Łodzi Zakład Ochrony Radiologicznej. 1–61. Łódź.
- Opracowanie Głównego Inspektoratu Sanitarnego (GIS). 2021. Dobre praktyki dotyczące sposobów pomiarów stężenia aktywności radonu w miejscach pracy, budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. 1–33. Warszawa.
- UNSCEAR, 2000, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources and effects of ionizing radiation*. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations. New York.
- Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (Dz.U. 2021.1941, Dz.U.2023.1173).
- Przylibski T. A., 1996. Zmienność koncentracji radonu w powietrzu Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie (Sudety). Przegląd Geologiczny. 44. 9. 942–944.
- Przylibski T. A., 1999. Radon concentration changes in the air of two caves in Poland. Journal of Environmental Radioactivity. 45. 81–94.
- Przylibski T. A., 2001. Radon and its daughter products behavior in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Złoty Stok (Sudety Mountains, SW Poland). Journal of Environmental Radioactivity. 57. 87–103.
- Przylibski T.A. 2015. Radon research in Poland: A Review. Solid State Phenomena. 238. 90–115.
- Przylibski T.A., Ciężkowski, W. 1999. Seasonal changes in radon concentration in Niedźwiedzia Cave (SW Poland). II Nuovo Cimento. 22C. 3–4. 463–469.

- Przylibski T. A., Bartak J., Kochowska E., Fijałkowska–Lichwa L., Kozak K., Mazur J., 2010. New SRDN–3 probes with a semi–conductor detector for measuring radon activity concentration in underground spaces. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 289. 599–609.
- Przylibski T.A., Fijałkowska-Lichwa L., Żak S. 2012. Określenie poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  i jego zmienności oraz podstawowych parametrów mikroklimatu zespołu sztolni „Leopold” i „Rungenschen” w Krobicy. Politechnika Wroclawska. Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii. Instytut Górnictwa. Zakład Geologii i Wód Mineralnych. Raport Ser. SPR. I-11/S-16/2012. Wrocław. [praca niepublikowana].
- Przylibski T.A., Domin E., Żak S. 2015. Ocena zagrożenia występowaniem promieniotwórczego gazu radonu  $^{222}\text{Rn}$  w wybranych wyrobiskach podziemnych historycznych kopalń rud na obszarze Sudetów. Politechnika Wroclawska. Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii. Instytut Górnictwa. Zakład Geologii i Wód Mineralnych. Raport W6/2015/S-012. Wrocław. [praca niepublikowana].
- Przylibski T.A., Kaczorowski M., Fijałkowska–Lichwa L., Kasza D., Zdunek R., Wronowski R. 2020. Testing of  $^{222}\text{Rn}$  application for recognizing tectonic events observed on water–tube tiltmeters in underground Geodynamic Laboratory of Space Research Centre at Książ (the Sudetes, SW Poland). *Applied Radiation and Isotopes*. 163. 108967. Doi.Org/10.1016/J.Apradiso.2019.108967.
- Rosiek F., Sikora M., Urbański J., Wójtowicz K. 2012. Możliwości naturalnego przewietrzania podziemnej trasy turystycznej w Kopalni „Św. Jana” w Krobicy. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*. 135. *Studia i Materiały*. Nr 42. [praca niepublikowana].
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz. U. z 2005 r. Nr 20, poz. 168).
- Skowronek J., Wysocka M., Giebel M., 2004. Radon w jaskiniach Jury Krakowsko–Częstochowskiej. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i środowisko*. Kwartalnik 3. 77–87.
- Tchorz–Trzeciakiewicz D.E., Solecki A.T. 2011. Seasonal variation of radon concentrations in atmospheric air in the Nowa Ruda area (Sudety Mountains) of southwest Poland. *Geochemical Journal*. 45. 455–461.
- Tchorz–Trzeciakiewicz D., E., Parkitny T., 2015. Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the Underground Tourist Route “Coal Mine” (SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*. 149. 90–98.
- Walczak K., Olszewski J., Politański P., Zmyślony M., 2017. Occupational exposure to radon for underground tourist routes in Poland: Doses to lung and the risk of developing lung cancer. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 30. 5. 687–694. doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00987
- Wysocka M. 2007. Radon w jaskiniach Jury Krakowsko–Częstochowskiej. *Research reports mining and environment*. Quarterly. 3/2007. 77–87.
- Wysocka M. 2011. Radon in jurassic caves of the Kraków–Częstochowa Upland. *Geochemical Journal*. 45. 447–453.
- strony internetowe:  
[http://danepubliczne.imgw.pl/data/dane\\_pomiarowo\\_obserwacyjne/](http://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/); dostęp 2021.  
[www.danepubliczne.imgw.pl/docs/regulamin\\_udostepniania\\_danych.pdf](http://www.danepubliczne.imgw.pl/docs/regulamin_udostepniania_danych.pdf); dostęp 2021.

## **5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

W ramach aktywności naukowej podjęłam współpracę z uczonymi z zagranicznych instytucji naukowych oraz ośrodków naukowo-badawczych Francji, Anglii, Czech i Stanów Zjednoczonych. W ramach współpracy z Kolegami z Francji i Anglii brałam udział w realizacji projektu nr 571: *Radon, Health and Natural Hazards*. W prace nad realizacją projektu były zaangażowane poza ważnymi ośrodkami naukowymi Europy, takich jak: Kingston University,

University of Northampton w Anglii oraz Institut de Physique du Globe de Paris we Francji również ośrodki naukowe Azji jak: Guru Nanak Dev University w Indiach, National Center for Research on Earthquake Engineering w Tajwanie. Prace projektowe były częścią programu International Geoscience Programme (IGCP) organizowanego przy współpracy United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) i International Union of Geological Sciences (IUGS). Rezultaty badań realizowanych w ramach współpracy projektowej zaprezentowałam na konferencjach międzynarodowych w Austrii: *European Geosciences Union General Assembly*, w Serbii: *The Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research, Niš*, w Macedonii na *Sixth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, Ohrid*, oraz na Węgrzech w ramach *The 1<sup>st</sup> International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (RANC), Budapeszt*. Prace realizowane w ramach projektu: *Radon, Health and Natural Hazards* zostały również opublikowane na łamach *Natural Hazards and Earth System Sciences*. W artykule współautorskim pod tytułem: ***Short-term <sup>222</sup>Rn activity concentration changes in underground spaces with limited ai exchange with the atmosphere*** zaprezentowałam przeprowadzoną na podstawie pierwszych badań w Polsce, charakterystykę krótkookresowych zmian stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn w obiektach podziemnych o utrudnionej wymianie powietrza z atmosferą.

Współpracę naukowo–badawczą z Kolegami z Uniwersytetu Karola w Pradze rozpoczęłam w 2011 roku. Wyniki pierwszych wspólnie zrealizowanych prac badawczych zaprezentowałam na konferencji *11<sup>th</sup> International Workshop on the Geological aspects of Radon risk mapping* odbywającej się w 2012 roku w Pradze. Kolejne prace kontynuowałam w ramach Programu Wykonawczego z Republiką Czeską w latach 2013–2014 pt. „*Radon in groundwaters of the Sudety Mountains*”, *etap III, Region Chrastava – Bogatynia w Górach Izerskich*. Współpraca obejmowała 21–dniowe wyjazdy terenowe w Region Chrastava. W ramach współpracy prowadziłam badania terenowe mające na celu poszukiwanie i dokumentowanie źródeł wody radonowej. Brałam udział w opracowaniu metody eksploracji polegającej na wykorzystaniu metod GIS (ArcMap 9.1-10.2) w zestawieniu z polowym mapowaniem radiohydrogeochemicznym w skali 1:10 000. Podczas prac terenowych pobraliśmy 2354 próbki wody. Stężenie aktywności radonu zmierzaliśmy w 660 źródłach znajdujących się na całym terenie Sudetów. Spośród nich aż w 111 stężenie aktywności <sup>222</sup>Rn przekroczyło 1500 Bq/m<sup>3</sup>, czyli wartość uznawaną za progową dla radonowych wód mineralnych zgodnie z czeskim prawem. Największe stężenie aktywności <sup>222</sup>Rn zmierzaliśmy w źródle Michael koło Nowego Miasta pod Smrkiem (aż do 6237 Bq/m<sup>3</sup>). Wyniki długoletnich wspólnych prac naukowo–badawczych opublikowaliśmy w czasopiśmie *Water* w 2022 roku. Był to artykuł wieloautorski zatytułowany: ***Exploration and Investigation of High–Level Radon Medicinal Springs in the Crystalline Units: Lucicum***.

W 2020 roku rozpoczęłam współpracę naukowo–badawczą z dr. Kayode Ayai pracującym w Centrum Kontroli i Zapobiegania Chorobom, Narodowego Instytutu Bezpieczeństwa i Higieny Pracy w Pittsburghu (Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh, USA). Od ponad 2 lat pracujemy nad modelowaniem mechanizmu przepływu radonu ze stref uskoków (spękań) do wnętrza obiektów podziemnych. W szacowaniach wykorzystaliśmy wyniki wieloletnich pomiarów stężenia aktywności radonu prowadzonych bezpośrednio w strefie uskoku, jak również w całym systemie korytarzy (głównie nieturystycznych) obiektu podziemnego pod zamkiem Książ. Wyniki tych pomiarów wykorzystaliśmy do opracowania modelu numerycznego (Discrete Fracture Network DFN), który mógłby stanowić alternatywne narzędzie do wyznaczania współczynnika ekshalacji radonu z przestrzeni uskoków oraz całego systemu wyrobisk. Jego zastosowanie może stanowić rozwiązanie zastępujące długookresowe pomiary stężenia aktywności radonu w znanym środowisku (głównie systemie rozpoznanych dyslokacji). Na podstawie modelowania udało nam się wyznaczyć i zaproponować wartość współczynnika ekshalacji radonu z przestrzeni uskoków, jak i dla całego systemu podziemnych korytarzy pod dziedzińcem zamku Książ. Wskazaliśmy, że wartość współczynnika ekshalacji powinna zostać

zwiększona do 40% w miejscach o podwyższonych wartościach stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w porównaniu do pozostałych części obiektu, gdzie rejestrowane wartości są znacznie niższe zarówno w okresie cieplejszym (maj-październik), jak i w chłodniejszej (listopad-kwiecień) porze roku. Wykazaliśmy, że wpływ stref pęknięć i szczelin na rejestrowane wartości stężenia jest zauważalny tylko do głębokości 15 metrów. W tym przedziale konsekwentnie obserwowaliśmy najwyższe wartości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ , wahające się od  $1600 \text{ Bq/m}^3$  do  $2000 \text{ Bq/m}^3$ , niezależnie od pory roku. Jednakże wraz ze wzrostem głębokości stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  malały nawet do  $400 \text{ Bq/m}^3$  i stawały się coraz bardziej rozproszone. Wykazaliśmy, że model pokazuje zbieżność z wartościami stężenia radonu uzyskanymi z pomiarów terenowych. W kalibracji modelu uwzględniliśmy ponad 50 000 danych o stężeniu aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w strefie dyslokacji w różnych okresach roku kalendarzowego, do których z wykorzystaniem metod stochastycznych dobieraliśmy wielkość współczynnika ekshalacji radonu. Wyniki walidacji potwierdziły, że zaproponowana metoda i model rozkładu szybkości ekshalacji radonu ze stref spękań, szczelin do wnętrza korytarzy określony w oparciu o dominujący dyfuzyjny mechanizm transportu, mogą mieć dalsze zastosowanie w badaniach różnych parametrów transportu strumienia radonu. Potencjalne przyszłe badania z wykorzystaniem tego modelu będziemy próbowali rozszerzyć o prognozowanie sezonowych zmian stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  (ich amplitudy), określenie wpływu nasycenia wodą szczelinową na wielkość strumienia radonu oraz skutki dyfuzji/adwekcji przy użyciu liczby Pecleta. Manuskrypt zatytułowany: ***Fractal discrete fracture network modeling of radon gas concentration in underground tunnels under Książ Castle in Poland*** przedstawiający wyniki prac realizowanych w ramach współpracy naukowo-badawczej od sierpnia 2023 roku znajduje się recenzji w czasopiśmie Journal of Environmental Radioactivity (zarejestrowany pod numerem JENVRAD-D-23-00290).

Bieżącą współpracę naukową realizuję w ramach Centrum Radonowego Pozarządowej Międzynarodowej Sieci Naukowej. Polega ona na wymianie informacji, dyskusji wyników badań i pomiarów, kalibracji aparatury pomiarowej. We współpracę zaangażowanych jest kilka uczelni i jednostek naukowych w Polsce. Poza Politechniką Wrocławską są to również: Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie, Instytut Medycyny Pracy w Łodzi, Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie, Uniwersytet Łódzki, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku, Uniwersytet Śląski w Katowicach, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie, Instytut Ekologii Terenów Przemysłowych w Katowicach, Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Politechnika Śląska, Uniwersytet Wrocławski, Politechnika Łódzka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie oraz Akademia Kaliska.

W ramach prac realizowanych przez członków Centrum Radonowego uczestniczyłam w VI Krajowej Konferencji Radiochemii i Chemii Jądrowej, Kraków–Prze gorzały w 2013 roku oraz w The 2<sup>nd</sup> International Conference „Radon in the environment” odbywającej się w 2015 roku w Krakowie. Brałam również udział w pomiarach interkalibracyjnych organizowanych przez Instytut Medycyny Pracy w Łodzi i Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie w sztolniach w Kowarach.

W ramach bieżącej współpracy uczelni i jednostek naukowych zrzeszonych w Centrum Radonowym odbyłam dwa 3-tygodniowe staże naukowe w laboratoriach akredytowanych do wykonywania pomiarów stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w miejscach pracy (zaświadczenia w zał. nr 5). Pierwszy z nich realizowałam w styczniu 2022 roku w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie pod opieką Pani Kierownik Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych, dr inż. Katarzyny Wołoszczuk. W ramach stażu naukowego zajmowałam się:

- pomiarem stężenia radonu w powietrzu metodą detektorów śladowych
- pomiarem stężenia radonu w wodzie metodą emanometrii



- wzorcowaniem przyrządów radonowych w zakresie stężenia aktywności radonu i stężenia energii potencjalnej alfa
- wyznaczaniem rozkładu średnic aerozoli promieniotwórczych od pochodnych radonu
- badaniem wpływu osadzania się pochodnych radonu na obudowach detektorów pasywnych CR-39, na pomiary stężenia radonu w powietrzu
- wzorcowaniem przyrządów dozymetrycznych w polu promieniowania gamma, beta, X i neutronowego
- kontrolą dawek indywidualnych osób zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące (metoda TLD)
- oceną wyników uzyskanych z pomiarów równoległych stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$ .

Brałam również udział w pracach terenowych Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych.

Drugi staż naukowy odbyłam na przełomie września i października 2022 roku w Instytucie Medycyny Pracy im. Prof. dr Jerzego Nofera w Łodzi w Zakładzie Ochrony Radiologicznej pod opieką dr hab. Jerzego Olszewskiego, prof. IMP. W ramach stażu naukowego:

- przeprowadziłam wzorcowanie komórek scyntylicyjnych typu EDA produkcji kanadyjskiej i KS produkcji polskiej (ICHTJ)
- wykonałam pomiary stężeń radonu w powietrzu za pomocą komórek scyntylicyjnych
- uczestniczyłam w procesie przygotowywania komory radonowej do wzorcowania detektorów śladowych typu CR-39
- przeanalizowałam proces pomiaru ekspozycji na radon w miejscach pracy i w domach obejmujący:
  - a. przygotowanie detektorów do ekspozycji
  - b. przeprowadzenie obróbki chemicznej detektorów eksponowanych w atmosferze radonu
  - c. wykonanie analizy komputerowej detektorów śladowych
  - d. opracowanie raportu końcowego z przeprowadzonych pomiarów
- analizowałam dane z podziemnych tras turystycznych pod kątem weryfikacji współczynnika przeliczeniowego dla tras podziemnych
- opracowałam założenia pracy badawczej, mającej na celu weryfikację współczynników korekcyjnych umożliwiających przeliczenie jednomiesięcznego średniego stężenia radonu na stężenie średnioroczne w obiektach podziemnych w oparciu o pomiarową bazę danych Instytutu Medycyny Pracy
- zapoznałam się z systemem dozymetrii indywidualnej prowadzonej przez Zakład Ochrony Radiologicznej za pomocą detektorów filmowych i termoluminescencyjnych
- wzięłam udział we wzorcowaniu mierników promieniowania rentgenowskiego.

Brałam również udział w wykładach i szkoleniach realizowanych w ramach działalności edukacyjno-informacyjnej Centrum Radonowego.

Od 2014 roku współpracuję z Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie zgodnie z umową nr P/473/14 zarejestrowaną w Centralnym Rejestrze Umów Politechniki Wrocławskiej. W ramach współpracy zajmujemy się możliwościami wykorzystania  $^{222}\text{Rn}$  do predykcji zjawisk geodynamicznych. Efekty naszej współpracy opublikowaliśmy na łamach *Applied Radiation and Isotopes* w 2020 roku. Wyniki dalszych prac są przygotowywane do publikacji.

Od 2019 roku współpracuję z dr. Andrzejem Tycem z Uniwersytetu Śląskiego w ramach badań znacznikowych mechanizmu przepływu powietrza w przestrzeniach Jaskini Niedźwiedziej Górnej na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej w południowej Polsce. Na przykładzie Jaskini sprawdziliśmy możliwości zastosowania izotopu  $^{222}\text{Rn}$  jako znacznika ruchów powietrza, jak i wymiany powietrza z powietrzem atmosferycznym w skali sezonowej, dobowej i godzinowej. Wskazaliśmy, że  $^{222}\text{Rn}$  jako znacznik można wykorzystać także w określaniu dynamiki zmian mechanizmu przepływu (konwekcji i/lub adwekcji), a w przyszłości również do wyznaczenia modelu szacującego objętość przepływającego i wymienianego strumienia powietrza zarówno w obiektach naturalnych (jaskiniach), jak i innych obiektach

podziemnych leżących poza obszarem o wysokim potencjale radonowym (ang. *radon prone area*). Wyniki wspólnych prac zostały przygotowane do publikacji.

Poza szeroko realizowaną współpracą naukowo-badawczą w kraju i zagranicą wykazuję także aktywność w zakresie realizacji projektów badawczych. **Byłam kierownikiem** zadania badawczego pt.: *Ustalenie poziomu detekcji Rn-222 w korytarzu technicznym zapory wodnej* finansowanego w konkursie NCN: **Miniatura-5** (numer wniosku: **2021/05/X/ST10/01621**) – realizacja od 15.12.2021 do 14.12.2022. Byłam **dwukrotnie kierownikiem projektu realizowanego w ramach Programu Młoda Kadra** – badań naukowych zrealizowanych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich, finansowanych w wewnętrznym trybie konkursowym. Po raz pierwszy od 2015 do 2016 roku realizowałam projekt: *Wykorzystanie możliwości zastosowania radonu jako naturalnego znacznika do identyfikacji zjawisk geodynamicznych zachodzących w litosferze* (Numer wniosku: 0402/0115/15 – B50052W2/K1). Po raz drugi w latach 2017-2018 kontynuowałam badania o tematyce: *Identyfikacja lokalnych zjawisk geodynamicznych zachodzących w litosferze z wykorzystaniem izotopu radonu (Rn-222)*, numer wniosku: 0402/0004/17. Do 2012 roku byłam **wykonawcą projektu badawczego promotorskiego N N525 462136** finansowanego w całości ze środków przeznaczonych na naukę przez Rząd RP - kwota projektu: 169 540 zł. Byłam również **kierownikiem projektu systemowego „Przedsiębiorczy doktorant”** – inwestycja w innowacyjny rozwój regionu” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, kwota całkowita: 37 500 zł.

W ramach prowadzonych badań naukowych nawiązałam także porozumienia o współpracy z jednostkami samorządowymi oraz przedsiębiorstwami. Za najważniejsze z nich uważam porozumienia z:

- Rezerwatem przyrody Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie, pozwolenie nr SPO.V.SM.6630/39a/08 podpisane przez Wojewodę Dolnośląskiego, a następnie przedłużone przez Regionalnego Dyrektora Ochrony Środowiska.
- Podziemną Trasą Turystyczno-Edukacyjną w Starej Kopalni Uranu w Kletnie, pozwolenie podpisane przez prezesa spółki Andrzeja Gustawa.
- Przedsiębiorstwem Usług Turystycznych „Kopalnia Złota” Sp. z o. o. w Złotym Stoku, porozumienie podpisane przez prezesa zarządu Jacka Gruźlewskiego.
- Zakładem Usług Turystycznych „Jaskinia Niedźwiedzia” w Kletnie, porozumienie podpisane przez dyrektora ZUT „Jaskinia Niedźwiedzia”.
- Agencją Turystyczną „Sztolniaczek” w Kowarach Podgórzu, porozumienie podpisane przez Sławomira Adamskiego.
- Uzdrowskim Zakładem Górniczym Zespołu Uzdrowisk Kłodzkich S.A. dotycząca sporządzania dokumentacji geologicznej (porozumienie nr L.Dz.DG/090/Maz/2011).
- Uzdrowskiem Cieplice i Uzdrowskiem Świeradów-Czerniawa dotycząca pomiarów stężenia aktywności <sup>222</sup>Rn w próbkach wód leczniczych. W ramach współpracy brałam udział w sporządzaniu referatów i dokumentacji (porozumienie nr NG 04/12/2011).
- Gminą Świeradów-Zdrój w zakresie występującego na jej obszarze złoża radonowych wód leczniczych.
- Uzdrowskiem Łądek-Długopole w ramach przygotowania projektu badawczego „*Innowacyjne techniki i technologie w bezpiecznym wykorzystaniu radonu w terapii chorób cywilizacyjnych*” na konkurs 1/4.1.4/2018, Projekty Aplikacyjne w ramach IV Osi priorytetowej: „Zwiększenie potencjału naukowo-badawczego” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 –2020, Działania 4.1 „Badania naukowe i prace rozwojowe”, Poddziałania 4.1.4 „Projekty aplikacyjne” ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w trybie przetargu nieograniczonego.
- Państwowym Gospodarstwem Wodnym, Wody Polskie, Zarząd Zlewni w Legnicy na prowadzenie pomiarów dozymetrycznych w obiekcie hydrotechnicznym (zgodnie z pismem WR.ZUW.1.071.41m.2020.AS). Badania zostały objęte finansowaniem w ramach

konkursu Miniatura-5. Ich wyniki zostały również opublikowane na łamach Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry w 2023 roku (publikacja cyklu).

- Z Gminą Złotoryja w zakresie pomiaru stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w podziemnej trasie turystycznej „Aurelia” (od kwietnia 2023 roku).

## 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Za swoje osiągnięcia organizacyjne uważam **członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji naukowo-technicznych** o zasięgu krajowym, jak i międzynarodowym. Były to:

- VIII Konferencja Naukowa Doktorantów „*Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii*” w 2008 roku
- IX Konferencja Naukowa Doktorantów „*Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii*” w 2009 roku
- X Konferencja Naukowa Doktorantów i Młodych Uczonych „*Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii*” w 2010 roku
- III Ogólnopolski Kongres Geotermalny w 2011 roku
- XI Konferencja Naukowo–Techniczna „*Problemy Hydrotechniki*” w 2017 roku
- XIV<sup>th</sup> International Conference on Gas Geochemistry w 2017 roku
- Międzynarodowy Workshop *GEOSTAT Spatial analysis and applications in geological, mining and environmental problems* w 2018 roku.

Do osiągnięć organizacyjnych mogę zaliczyć również rolę **organizatora i wykładowcy** zajęć edukacyjnych dla młodzieży odbywających się w ramach *XXII Dolnośląskiego Festiwalu Nauki* w 2019 roku. **Mój wkład w działalność organizacyjną na szczelbu Uczelni podkreślają także trzy nagrody Rektora z roku 2015, 2020 i 2022.** Z ramienia Politechniki Wrocławskiej jestem również członkiem Rady Naukowej Ośrodka Badawczo – Rozwojowego powołanego w lutym 2018 roku w celu prowadzenia badań naukowych nad bezpiecznym wykorzystaniem radonu w terapiach chorób cywilizacyjnych w uzdrowiskach Łądek i Długopole Zdrój.

Za **osiągnięcia popularyzujące naukę uważam udział w pracach redakcyjnych czasopism naukowo-technicznych o zasięgu międzynarodowym** m.in.:

- jako **recenzent** manuskryptu o nr JRNC–D–20–00946 opublikowanego w *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*
- jako **recenzent** manuskryptu o nr EGAH–D–20–00413R1 opublikowanego w *Environmental Geochemistry and Health*
- jako **recenzent** manuskryptu o nr RPC–2019–1172 opublikowanego w *Radiation Physics and Chemistry*
- jako **recenzent** manuskryptu o nr RPC–2018–333 opublikowanego w *Radiation Physics and Chemistry*
- jako **recenzent** manuskryptów zgłoszonych do publikacji w *Interdyscyplinarnych zagadnieniach w górnictwie i geologii* oraz *Physicochemical Problems of Mineral Processing* wydawanych przez Oficynę Politechniki Wrocławskiej.

Do moich kolejnych **osiągnięć popularyzujących naukę zaliczam aktywny udział w konferencjach o zasięgu międzynarodowym:**

- *European Geosciences Union General Assembly, 2.05.–7.05.2010, Vienna, Austria, jako współautorka prezentująca referat w jęz. angielskim*
- *10. Altbergbau–Kolloquium, 4.11–6.11.2010, Freiberg Essen, referat w języku niemieckim*

- *The international conference of students and young researchers “Topical issues of rational use of natural resources”* 21.04.–23.04.2011 Sankt Petersburg, Technical University, Byłam autorką nagrodzonej prezentacji (III miejsce)
- *11th International Workshop on the Geological aspects of Radon risk mapping*, 18.09–22.09.2012, Praga, Czechy
- *The Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research*, Niš, Serbia, 27.05–30.05.2014, jako współautorka posterów: Solid State Nuclear Track Etch Detectors, 2D and 3D analysis of alpha track oraz A Review of UNESCO IGCP Project 571 “Radon, Health and Nuclear Hazards”
- *The 2<sup>nd</sup> International Conference “Radon in the environment”*, Kraków, 25.05–29.05.2015
- *The 1<sup>st</sup> International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (RANC)*, Budapeszt, 10.04–15.04.2016
- *XIV<sup>th</sup> International Conference on Gas Geochemistry*: Wrocław – Świeradów Zdrój, 24.09.–28.09.2017
- *Sixth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research*, 18.06.–22.06.2018, Metropol Lake Resort, Ohrid, Macedonia, jako autorka posteru: *First <sup>222</sup>Rn activity concentration measurements in new discovered parts of deeper-lying passages of Bear Cave in Kletno (South-West Poland)*.

Za prace **popularyzujące naukę uważam również aktywny udział w konferencjach o zasięgu krajowym:**

- *IX Konferencji Naukowej Doktorantów „Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii”*, 25.05.–27.05.2009, Szklarska Poręba
- *VI Konferencji Dziedzictwo i historia oraz wykorzystanie pozostałości dawnych robót górniczych*, 21.04.–23.04.2010, Piechowice
- *X Konferencji Naukowej Doktorantów i Młodych Uczonych „Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii”*, 19.05.–22.05.2010, Szklarska Poręba
- *Konferencji Współczesne trendy w naukach o Ziemi, III Geo-Symposium Młodych Badaczy Silesia 2010*, 27.10.–29.10.2010, Bytom–Sucha Góra
- *XI Konferencji Naukowej Doktorantów i Młodych Uczonych „Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii”*, 18.05.–23.05.2011, Szklarska Poręba
- *III Ogólnopolskim Kongresie Geotermalnym*, 28.09.–30.09.2011, Łądek Zdrój
- *Współczesne trendy w naukach o Ziemi, IV Geo-Symposium Młodych Badaczy Silesia 2011*, 19.10.–21.10.2011, Cieszyn
- *Konferencji „Wpływ młodych naukowców na osiągnięcia polskiej nauki” – Nowe trendy w naukach przyrodniczych*, 03.12.2011, Wrocław
- *Symposium Naukowym „Współczesne zagadnienia, problemy i wyzwania w badaniach przestrzeni geograficznej”*, 23.03.–24.03.2012, Gdańsk
- *XXXV Zimowej Szkole Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii*, 5.03–9.03.2012, Wisła Jawornik
- *XII Konferencja Naukowa Doktorantów i Młodych Uczonych „Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii”*, 17.05.–20.05.2012, Szklarska Poręba
- *IX Konferencja Dziedzictwo i historia oraz wykorzystanie pozostałości dawnych robót górniczych*, 10.04.–12.04.2013, Złotniki Lubańskie
- *VI Krajowa Konferencja Radiochemii i Chemii Jądrowej*, Kraków–Przegorzały, 21.04.–24.04.2013.

Moje zaangażowanie w działania na rzecz popularyzacji nauki podkreślają **dwie nagrody i jedno wyróżnienie otrzymane za udział w konferencjach.**

Jako **istotne osiągnięcie dydaktyczne** traktuję samodzielność w przygotowywaniu programów zajęć: Geologia inżynierska, Mineralogia i petrografia, Podstawy geologii, Geologia złożowa i górnicza oraz Podstawy ekologii realizowanych na trzech Wydziałach i kierunkach Politechniki Wrocławskiej, jak i niezbędnych materiałów źródłowych dla studentów. Mój wkład i zaangażowanie w pracę dydaktyka potwierdzają oceny (wyróżniające) otrzymywane z rokrocznie przeprowadzanych hospitacji zajęć, jak i wyniki ankiet studenckich (średnia ocena bliska 5,0). Jestem także promotorem i recenzentem prac inżynierskich realizowanych na dwóch kierunkach Uczelni. Angażuję się także w prace studenckich kół naukowych. Między innymi w przygotowanie wyjazdu naukowo-technicznego po obiektach hydrotechnicznych Odrzańskiej Drogi Wodnej oraz wyjazdu terenowego ze studentami do OG Polkowice-Sieroszowice.

## **7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1–6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

Za istotne osiągnięcia w trakcie trwania mojej kariery zawodowej mogę wskazać **udział w pracach zleconych (komercyjnych) i badaniach wykonywanych dla przedsiębiorstw**. Za najważniejsze uważam:

- Zlecenia realizowane dla Zamku Książ w Wałbrzychu Sp. z o.o. z siedzibą przy ul. Piastów Śląskich 1, 58–306 Wałbrzych z dnia 19 X 2016 r. (zlecenie nr 55/10/TiK2016).
- Zlecenia realizowane dla Uzdrowiska Łądek–Długopole S.A. (zlecenie nr 4002/0018/17/5) w ramach badań stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu zbiorników wód podziemnych ujęć Jerzy oraz Skłodowska–Curie.
- Udział w pracach zleconych na rzecz gminy Mirsk służących określeniu poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  i jego zmienności oraz podstawowych parametrów mikroklimatu zespołu sztolni „Leopold” i „Rungenschen” w Krobicy.
- Dokumentowanie wyników prac zleconych w niepublikowanych raportach Politechniki Wrocławskiej, m.in.:

Przylibski T.A., **Fijałkowska-Lichwa L., Żak S. 2012.** *Określenie poziomu stężenia aktywności  $^{222}\text{Rn}$  i jego zmienności oraz podstawowych parametrów mikroklimatu zespołu sztolni "Leopold" i "Rungenschen" w Krobicy.* Raporty Inst. Gór. PWroc. 2012. Ser. SPR 16. 42.

Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L., Kasza D. 2017a.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 1.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 1. 23.

Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L., 2017b.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 2.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 9. 27.

Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L. 2017c.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 3.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 20. 26.

Przylibski T.A., **Fijałkowska-Lichwa L., Kowalska A., Domin E. 2017d.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu zbiorników wód podziemnych ujęć Jerzy i Skłodowska-Curie oraz inhalatorium w Łądku-Zdroju.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. 2017. Ser. SPR nr 10. 22.

Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L. 2018a.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 4.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 1. 26.

- Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L. 2018b.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 5.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 15. 27.
- Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L. 2018c.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 6.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 23. 30.
- Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L. 2018d.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych projektowanej trasy turystycznej w Książu. Cz. 7.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 31. 30.
- Przylibski T.A., **Fijałkowska–Lichwa L. 2019.** *Badania stężenia aktywności radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w powietrzu wyrobisk podziemnych trasy turystycznej w Książu. Cz. 8.* Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej Ser. SPR 2. 24.

**Udział w szkoleniach i kursach podnoszących kwalifikacje dydaktyczne i naukowo-badawcze, w tym:**

- w 2009 roku ukończony kurs „*Rachunkowość od podstaw do poziomu samodzielnego księgowego bilansisty*” zorganizowany przez Stowarzyszenie Księgowych w Polsce
- w 2010 roku ukończone szkolenie *ArcGIS 3D* przeprowadzone przez dział szkoleń ESRI Polska w Warszawie
- w 2011 roku uczestnictwo w szkoleniu służb resortowych w Kołobrzegu
- w 2011 roku udział w szkoleniu w ramach *GISday* organizowanym przez Politechnikę Wrocławską
- w 2014 roku ukończony kurs dydaktyczny Szkoły Wyższej, organizowany przez Studium Nauk Humanistycznych i Społecznych Politechniki Wrocławskiej
- w 2020 roku ukończone szkolenie „*Narodowego Centrum Nauki: Szkolenie dla wnioskodawców*”
- w 2020 roku ukończone szkolenie: „*Analizy wielowymiarowe*” zorganizowane przez StatSoft Polska
- w 2021 roku ukończony cykl warsztatów o tematyce: *Wsparcie w kryzysie zdrowia psychicznego, W świecie różnorodnych możliwości* organizowanych przez Politechnikę w ramach szkoleń: Politechnika Nowych Szans.

Za istotny wkład w moją karierę zawodową traktuję również ukończenie indywidualnego programu szkoleniowego Międzynarodowego Programu Stażu Naukowego „*Laureaci Nagrody Nobla: Badanie Doświadczenia i Osiągnięć Zawodowych dla Kształtowania Osobowości Osiągającej Sukcesy i Transformacji Otaczającego nas Świata*”. Staż trwał 180 godzin i był realizowany zdalnie (online) od 04.11.2022 do 30.12.2022. Celem stażu naukowego było: podniesienie poziomu szkolenia teoretycznego i praktycznego, zdobycie doświadczenia w prowadzeniu działalności badawczej, zapewnienie wymiany informacji i poszerzenia kontaktów naukowych oraz doskonalenie i nabywanie niezbędnych ogólnych i zawodowych kompetencji praktycznych. Program prowadzony był przez osoby wybitne, noblistów z różnych dziedzin nauki.

.....  
(podpis wnioskodawcy)