

*Stanisław Chalupnik, Małgorzata Wysocka*

## POMIARY EKSHALACJI RADONU Z GRUNTU – OPRACOWANIE METODYKI I WYNIKI WSTĘPNE

### Streszczenie

Radon jest gazem szlachetnym i dzięki temu, po opuszczeniu siatki krystalicznej minerału zawierającego izotop macierzysty rad  $^{226}\text{Ra}$ , z dużą łatwością przemieszcza się najpierw w przestrzeni międzyziarnowej, a następnie przedostaje się do szczelin i spękań, i razem z innymi gazami szuka najłatwiejszych dróg migracji. Czas półrozpadu radonu jest dostatecznie długi, by zdążył on przebyć drogę od miejsca, gdzie powstał w wyniku rozpadu izotopu macierzystego, do spękań w fundamentach budynków, a przez nie do mieszkań. W przypadku, kiedy ze skał lub gleby przedostaje się do powietrza atmosferycznego, ma mniejsze znaczenie z uwagi na ochronę radiologiczną, gdyż szybko zostaje rozcieńczony w bardzo dużej objętości powietrza. W przestrzeniach zamkniętych, jakimi są jaskinie, tunele i domy mieszkalne może dojść do znacznych koncentracji radonu „produkowanego” przez izotop macierzysty.

Badania stężeń radonu w budynkach na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) prowadzone przez Główny Instytut Górnictwa wykazały, że w pewnych obszarach Zagłębia możliwe jest występowanie podwyższonych koncentracji tego gazu [19]. Eksploatacja węgla kamiennego oraz indukowane przez nią zjawiska geodynamiczne, takie jak wstrząsy i tąpnięcia, są przyczyną występowania pęknięć poeksploatacyjnych, szczelin i spękań górotworu, co z kolei powoduje osiadanie powierzchni i zniszczenie struktury budynków. Procesy te ułatwiają przemieszczanie się radonu w górotworze. Wskaźnikiem zagrożenia radonowego w badanym terenie jest stężenie tego gazu w powietrzu glebowym. Istotnym czynnikiem, wpływającym na wartość stężenia radonu w budynkach jest przepuszczalność gleby. Pomiar tej wielkości są utrudnione w warunkach terenowych, dlatego część naukowców uważa, że zamiast (lub oprócz) pomiarów stężeń radonu w glebie powinno wykonywać się pomiary ekshalacji radonu z gleby. Przedstawione w artykule badania miały na celu opracowanie metodyki pomiaru ekshalacji oraz kalibrację opracowanej metody. Do pomiarów terenowych skonstruowano komorę kumulacyjną (rys. 1). Kalibrację metody prowadzono w komorze radonowej znajdującej się w Laboratorium Radiometrii Głównego Instytutu Górnictwa (fot. 1). Po wykonaniu pomiarów kalibracyjnych rozpoczęto badania na wytypowanych terenach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. W celu zbadania związku między lokalną budową geologiczną, a poziomem ekshalacji radonu prowadzono pomiary w rejonach o odmiennej budowie geologicznej. Ponadto, badaniami objęto wybrane rekultywowane tereny pogórnice. Wyniki badań wykazały, że w pewnych przypadkach na terenach pogórnicznych można spodziewać się wzmożonej ekshalacji radonu.

### Measurements of radon exhalation from the ground – development of the method and preliminary results

#### Summary

Radon is a noble gas, therefore after recoil from the lattice, in which radium  $^{226}\text{Ra}$  was embedded, relatively easy moves in the fissures and cracks. The half-life of radon is long enough (3.83 days) to enable movement of this radionuclide for relatively long distances in soil, to reach the surface or enter inner spaces of buildings. Of course, when radon exhales into atmospheric air, the radiation hazard is negligible due to fast dilution in big volume of outdoor air. In confined spaces as caves, underground mines or dwellings radon concentrations may sometimes reach high level.

During our investigations in Upper Silesian Coal Basin (USCB), it has been revealed, that in some parts of the basin radon concentrations in dwellings are enhanced [19]. Coal mining in this area leads to specific geodynamic phenomena, as quakes and tremors. On the other hand, underground exploitation induces the presence of emptiness, cracks and fissures in the strata. All mentioned above factors cause very often subsidence of the surface and damages of buildings, located in affected zones. Radon migration in fractured rocks and soil is much easier.

One of possible indicators of radon risk is radon concentration in soil gas, commonly used in many countries. Very important factor, affecting radon levels in dwellings, is permeability of the soil. Measurements of soil permeability are rather difficult, therefore in our opinion a better indicator of radon risk is exhalation rate from the ground.

We decided to implement such technique of measurements in our laboratory in the Central Mining Institute (Phot. 1.). Firstly, an exhalation (accumulation) chamber has been constructed (Fig. 1.). At first, Lucas cells have been applied for measurement of radon concentration in exhalation chambers. Preliminary results showed, that such method has relatively high detection limit – 2 mBq/m<sup>2</sup>\*s for accumulation time 3-4 hours. Therefore we started investigations of possible application of activated charcoal for radon accumulation and liquid scintillation counting of charcoal detectors. A calibration of charcoal detectors is difficult, a lot of efforts have been made to develop the proper calibration procedure.

Afterwards, preliminary field measurements have been started, to investigate relationship between radon exhalation rates and local geological structure in different regions of USCB. Additionally, some areas after ground reclamation have been tested, because we predicted enhanced radon exhalation rates in some specific sites like abandoned settling ponds or waste piles.

## 1. RADON JAKO ŹRÓDŁO ZAGROŻENIA RADIACYJNEGO W DOMACH – MIGRACJA I WNIKANIE DO BUDYNKÓW

Radon jest gazem powszechnie obecnym w środowisku naturalnym. Występuje zarówno w litosferze, jak i hydrosferze i atmosferze. Ze względu na stosunkowo krótki okres połowicznego zaniku (3,83 dnia) w powietrzu atmosferycznym stężenia radonu nie przekraczają zazwyczaj kilku czy kilkunastu bekereli w metrze sześciennym. W przestrzeniach zamkniętych, o ograniczonej wentylacji, takich jak wyrobiska górnicze, piwnice czy mieszkania, radon może występować w znacznie większych stężeniach, mogących wpływać na zdrowie pracowników czy mieszkańców.

Najważniejszymi źródłami radonu w budynkach są skały budujące podłoże i gleba, skąd dzięki dyfuzji i konwekcji przedostaje się przez naturalne szczeliny i spękania bezpośrednio do pomieszczeń mieszkalnych. Innym, mogącym mieć pewne znaczenie źródłem radonu są materiały budowlane. Zawartość radonu w wodzie wodociągowej i gazie ziemnym jest w zasadzie do pominięcia.

Stężenie radonu w glebie jest pochodną promieniotwórczości naturalnej skał macierzystych, z których gleba powstała. Według danych literaturowych średnie stężenie radonu w glebie, na przykład w poszczególnych stanach Ameryki, waha się w granicach od 5000 do około 200 000 Bq/m<sup>3</sup>. W pewnych przypadkach, na przykład w podłożu zbudowanym z mylonitów, stężenie tego gazu w powietrzu glebowym może osiągnąć wysokie 450 000 Bq/m<sup>3</sup> [3]. W krajach skandynawskich za „normalne” uważa się stężenie radonu 4000÷50 000 Bq/m<sup>3</sup>, za podwyższone od 100 000 do 200 000 Bq/m<sup>3</sup>. W ograniczonych obszarach występowania rud uranowych lub łupków aluminowych stężenia radonu przewyższają wartość 1 000 000 Bq/m<sup>3</sup> [8].

Na terenie Polski badaniami stężenia radonu w powietrzu glebowym zajmował się między innymi zespół naukowców z Państwowego Instytutu Geologicznego

w Warszawie. Stwierdzili oni, że jedynie w południowo-zachodniej części kraju, w obrębie masywu karkonosko-izerskiego, występują duże stężenia radonu w powietrzu glebowym, wynoszące średnio  $300\ 000\ \text{Bq/m}^3$  [5]. Według tych samych badaczy na obszarze Suwalszczyzny stężenia radonu w glebie mieszczą się w przedziale od  $10\ 000$  do  $50\ 000\ \text{Bq/m}^3$  [4]. Z kolei w obrębie aglomeracji krakowskiej średnie stężenia radonu w powietrzu glebowym wynoszą około  $15\ 000\ \text{Bq/m}^3$ . Jedynie w wybranych miejscach, gdzie budowa geologiczna sprzyja migracji i gromadzeniu się radonu, stwierdzono większe stężenie tego gazu: średnio około  $38\ 000\ \text{Bq/m}^3$  [13]. Występowanie w naszym kraju rejonów, w których stężenia radonu w glebie przekraczają  $100\ 000\ \text{Bq/m}^3$  potwierdziły również badania prowadzone przez D. Mazura [7].

Analizując potencjalne źródła radonu w budynkach, należy w zasadzie ograniczyć się do gleby i osadów znajdujących się pod budynkami lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie, gdyż według Nazaroffa droga, jaką może przebyć radon jest nie dłuższa niż kilkanaście metrów w czasie od kilku dni do kilku tygodni [10]. W Polsce problemem migracji radonu w górotworze w aspekcie wykorzystania tego zjawiska do prognozowania wyrzutów i tąpnięć w kopalniach węgla kamiennego zajmowała się J. Lebecka wraz z zespołem [6]. W jednej z dolnośląskich kopalń węgla na podstawie wydatku wypływu radonu, a także na podstawie natężenia wypływu gazu oraz stopnia nasycenia górotworu gazem, obliczyła, że droga migracji radonu wynosi około 10 metrów.

### 1.1. Zjawiska powodujące uwolnienie radonu z siatki krystalicznej minerałów

Pierwszym etapem procesów powodujących uwalnianie się radonu z minerałów jest **emanacja**. Jest to uwalnianie gazowego radonu z ziaren substancji stałych do powietrza, znajdującego się w porach tych minerałów.

Współczynnik emanacji definiuje się jako stosunek liczby atomów wydostających się z ziaren substancji stałej do liczby atomów powstających w nich w wyniku rozpadu promieniotwórczego [11]. Liczbowo współczynnik emanacji  $\varepsilon$  określa ilość radonu uwalnianego z siatki krystalicznej do przestrzeni międzyziarnowej. Energia odrzutu uzyskiwana w czasie rozpadu izotopu macierzystego radonu (czyli radu) ma zasadniczy wpływ na wielkość współczynnika emanacji. Dla radonu  $^{222}\text{Rn}$  jest to energia równa  $0,086\ \text{MeV}$ , co pozwala na pokonanie drogi w większości minerałów od  $20$  do  $70\ \text{nm}$ . Dla porównania w powietrzu odległość ta wynosi  $63\ \mu\text{m}$ . W wyniku emanacji w porach międzyziarnowych gromadzi się określona ilość radonu, pozostającego w dynamicznej równowadze promieniotwórczej z izotopem macierzystym, jak i izotopami pochodnymi.

Atom radonu uwolniony z siatki krystalicznej przemieszcza się zarówno w przestrzeniach międzyziarnowych, czy dalej w spękaniach skalnych lub w glebie dzięki dyfuzji i konwekcji. Droga, jaką przebywa zależna jest od środowiska, w którym porusza się. Zdolność migracji radonu określa tzw. współczynnik dyfuzji, który według Tannera [14] wynosi odpowiednio:

- $0,1\ \text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$  – dla migracji w powietrzu,

- $10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  – dla migracji w wodzie,
- $10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  – dla migracji w glebie.

Oznacza to, że radon rozpada się do 10% swej początkowej objętości po przejściu:

- 5 metrów w powietrzu,
- 5 centymetrów w wodzie,
- 2 metrów w glebie.

Niezwykle często zdarza się, że wartość zmierzona współczynnika emanacji różni się w sposób istotny od wartości obliczonej teoretycznie. Badacze tłumaczą to zjawisko dwojako:

- izotop macierzysty – rad – nie jest rozprzestrzeniony równomiernie w materiale skalnym, lecz jest skupiony w części powierzchniowej,
- rozpad promieniotwórczy radu powoduje zniszczenie siatki krystalicznej, tzw. korozję chemiczną, i dzięki temu nowo powstałe atomy radonu mają ułatwioną drogę migracji [14, 15].

W czasie kolejnego etapu wędrówki radon może opuścić materiał, w którym powstał dzięki przemianom promieniotwórczym. Część atomów radonu znajdującego się w przestrzeni międzyziarnowej wydostaje się na zewnątrz drogą dyfuzji i konwekcji. Zjawisko to nazywa się **ekshalacją**. Według Nazaroffa [10] współczynnik ekshalacji można obliczyć ze wzoru:

$$\varphi_{Rn} = \varepsilon A_{\text{rad}} \rho \lambda R_B$$

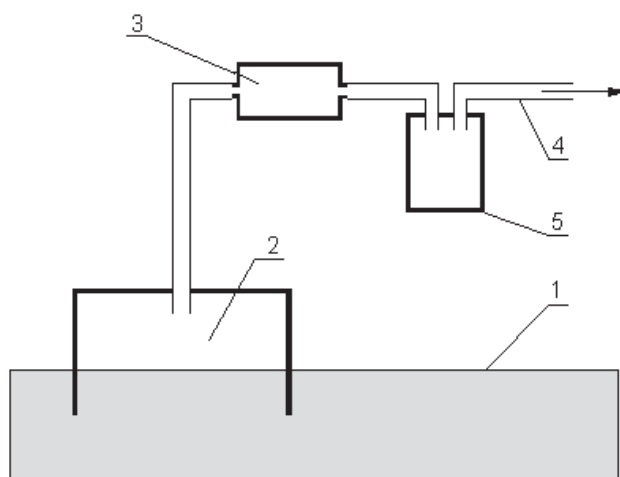
gdzie:

- $\varepsilon$  – współczynnik emanacji,
- $A_{\text{rad}}$  – zawartość radu w glebie,
- $\rho$  – gęstość materiału,
- $\lambda$  – stała rozpadu promieniotwórczego,
- $R_B$  – długość dyfuzji.

Współczynnik ekshalacji radonu z gleby w warunkach normalnych wynosi – na przykład według Wilkeninga –  $17 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  [16]. Porstendorfer natomiast stwierdził, że średni współczynnik ekshalacji z gleby wynosi  $26 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  [11]. Do obliczeń współczynnika ekshalacji autor ten wprowadził następujące założenia: współczynnik emanacji równa się 0,1, zawartość radu w glebie wynosi  $40 \text{ Bq/kg}$ , gęstość gleby  $2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , a długość dyfuzji 1,5 m. Z kolei według Colle'a [1] zakres zmienności współczynnika ekshalacji wynosi od 2 do  $50 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2. METODYKA BADANIA EKSHALACJI RADONU Z GRUNTU

Znajomość współczynnika ekshalacji radonu z gruntu jest pomocna przy szacowaniu ryzyka radonowego badanych obszarów. Teoretyczne obliczanie współczynnika ekshalacji radonu z podłoża wymaga znajomości wielu czynników charakteryzujących badany obszar. Obliczenia teoretyczne mogą prowadzić do grubych błędów, na przykład dla terenów górniczych, gdzie struktura warstwy przypowierzchniowej może być zaburzona. Podobnie w miejscach gromadzenia odpadowych mas skalnych lub odpadów pohutniczych o niejednorodnej strukturze wyznaczenie porowatości i przepuszczalności, niezbędnych do obliczenia współczynnika ekshalacji jest niezwykle trudne. Z tego względu podjęto próbę opracowania metodyki pomiarów współczynnika ekshalacji w warunkach polowych. Skonstruowano komorę kumulacyjną, której schemat przedstawiono na rysunku 1. Komorę stanowi otwarty z jednej strony cylinder aluminiowy, z zamontowanymi dwoma zaworami gazowymi typu Swagelock. Podczas pomiarów cylinder wbija się na kilka centymetrów w glebę, co umożliwia gromadzenie się w nim radonu, wydzielającego się z podłoża. Po określonym czasie, zwykle nie krótszym niż 2,5 i nie dłuższym niż 4 godziny, powietrze z komory kumulacyjnej przepompowuje się do obiegu zamkniętego urządzenia przez komorę Lucasa, a następnie wykonuje pomiar stężenia radonu.



**Rys. 1.** Sposób wykonywania pomiaru ekshalacji radonu z gleby: 1 – gleba, 2 – komora kumulacyjna, 3 – suszka, 4 – pompka, 5 – komora Lucasa

**Fig. 1.** Method to perform the measurements of radon exhalation from soil: 1 – soil, 2 – cumulation chamber, 3 – drier, 4 – pump, 5 – Lucas cell

Zasada wykonywania pomiarów współczynnika ekshalacji za pomocą powyżej przedstawionego urządzenia opiera się na założeniu, że czas pomiaru  $t$  jest krótki w porównaniu z czasem połowicznego zaniku  $T_{1/2Rn}$  i w związku z tym można pominąć poprawkę na rozpad promieniotwórczy:  $t \ll T_{1/2Rn}$ .

Pomiar współczynnika ekshalacji wykonuje się w następujących etapach:

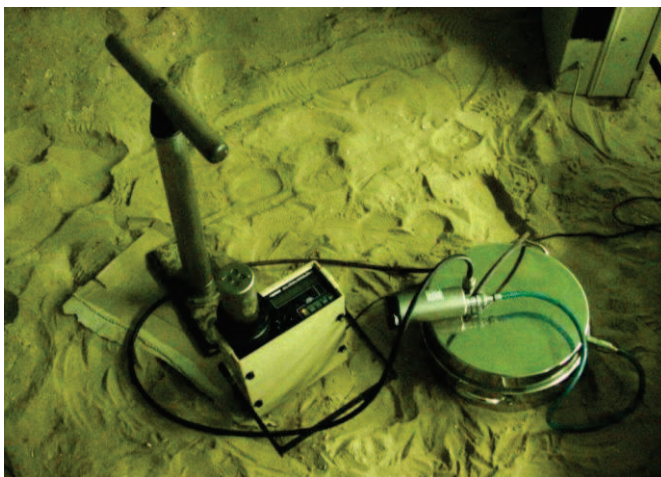
- komorę kumulacyjną instaluje się w wybranym miejscu na około 3 godziny,

- za pomocą komór Lucasa, wykonuje się pomiar stężenia radonu w powietrzu wewnątrz komory kumulacyjnej i oblicza aktywność radonu w całej jej objętości,
- znając czas trwania ekshalacji, powierzchnię, z której następuje oraz wymiary (przekrój) naczynia pomiarowego oblicza się współczynnik ekshalacji.

$$\Phi_{Rn} = A_{Rn}/(St)$$

gdzie:

- $A_{Rn}$  – aktywność radonu w komorze kumulacyjnej, Bq;
- $S$  – powierzchnia ekshalacji (pole przekroju komory kumulacyjnej), m<sup>2</sup>;
- $t$  – czas kumulacji, s.



**Fot. 1.** Pomiar ekshalacji radonu z gleby wewnątrz komory radonowej z zastosowaniem przyrządu AB-5 firmy Pylon i komory Lucasa

**Phot. 1.** Measurements of radon exhalation from soil inside the radon chamber with use of PYLON AB-5 monitor and Lucas cell

Do określania stężenia radonu <sup>222</sup>Rn w powietrzu stosowanych jest kilka metod. Jedną z nich, stosunkowo prostą, jest metoda komór scyntylacyjnych (fot. 1). Tę właśnie metodę stosowano początkowo do określania współczynników ekshalacji radonu z gleby. Próg wykrywalności radonu w powietrzu dla tej metody wynosi około 50÷100 Bq/m<sup>3</sup>. Przy czasie kumulacji radonu w komorze przez okres 3 godzin odpowiada to limitowi detekcji współczynnika ekshalacji na poziomie 1,0 mBq·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Dążąc do poprawy obniżenia progu detekcji, podjęto się opracowania innej metodyki prowadzenia badań ekshalacji radonu, z zastosowaniem alternatywnej metody oznaczania stężenia radonu.

Do pomiaru stężenia radonu wykorzystano detektory z węgla aktywnych. Detektory tego typu stosowane są przez Laboratorium Radiometrii GIG do wstępnego mocowania poziomu stężeń radonu w mieszkaniach [18]. Niektórzy z badaczy stosują technikę węgla aktywnych także do badań ekshalacji [2]. Odczyt detektorów z węgla

aktywnego wykonuje się bądź za pomocą spektrometrii promieniowania gamma, bądź z wykorzystaniem spektrometrii ciekłoscyntylacyjnej. Metoda ciekłoscyntylacyjna zapewnia próg detekcji dla oznaczania współczynnika ekshalacji radonu z gleby na poziomie  $0,1 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Najpoważniejszą trudność przy wdrażaniu tej metodyki, stanowiła kalibracja zestawu pomiarowego. W przypadku standardowych pomiarów radonu w mieszkaniach kalibrację prowadzono w komorze radonowej o objętości  $7,25 \text{ m}^3$ , przy stałym stężeniu radonu. Początkowo w taki sam sposób kalibrowano detektory przeznaczone do badań ekshalacji, z tą różnicą, że czas ekspozycji detektorów w komorze radonowej był znacznie krótszy i wynosił od 2 do 4,5 godziny. Z eksponowanych detektorów radon był wymywany za pomocą scyntylatora toluenowego [17], a następnie próbki były mierzone w spektrometrze ciekłoscyntylacyjnym Quantulus. Równocześnie wykonywano ciągły pomiar stężenia radonu w komorze za pomocą przyrządu Pylon z bierną sondą radonową PRD. Porównując wyniki z radiometru Pylon z odczytami detektorów węglowych otrzymano krzywą kalibracji metody. Uzyskane w taki sposób wartości współczynnika kalibracji były zależne od czasu ekspozycji detektora. Zależność ta wynikała z faktu, że detektory węglowe osiągają stan nasycenia po upływie kilkudziesięciu godzin ekspozycji w warunkach stałego stężenia radonu.

Zmianę częstości zliczeń dla kalibrowanych w komorze radonowej detektorów węglowych opisuje poniższa formuła

$$C = 425t$$

gdzie

$C$  – częstość zliczeń dla detektorów węglowych, cpm;

$t$  – czas ekspozycji, h.

Liniowy współczynnik kalibracji można wyznaczyć ze wzoru

$$K(t) = C_{Rn} / (425t)$$

gdzie:  $C_{Rn}$  – jest stężeniem radonu.

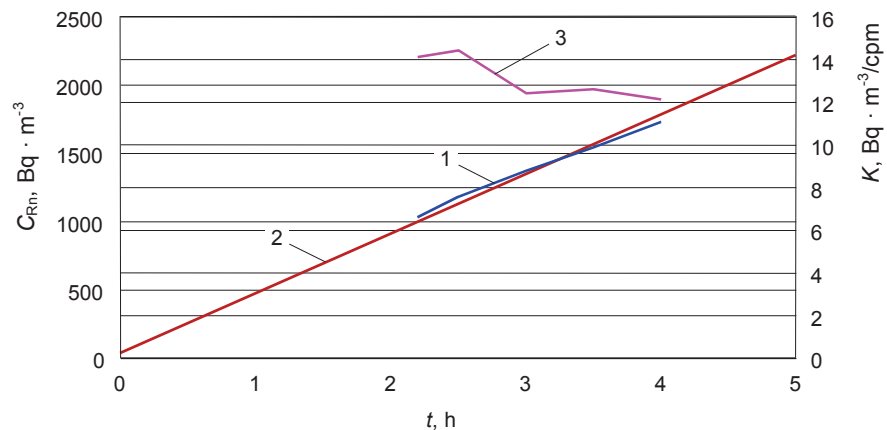
Dla standardowo prowadzonej kalibracji, tzn. trzygodzinnej ekspozycji ( $t = 3 \text{ h}$ ) i stężenia radonu w komorze równego  $C_{Rn} = 13,5 \text{ kBq}/\text{m}^3$ , liniowy współczynnik kalibracji jest równy

$$K(3) \approx 9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}/\text{cpm}$$

Następnym etapem prac było porównanie wyników metody, w której wykorzystano komory Lucasa i metody z zastosowaniem detektorów węglowych w pomiarach terenowych. Komory kumulacyjne umieszczano parami w określonych punktach pomiarowych, a w jednej z nich umieszczano detektor węglowy. Po kilku godzinach z drugiej komory pobierano próbkę powietrza do komory Lucasa, w której określono stężenie radonu. Detektory węglowe następnie poddawano procedurze pomiarowej w laboratorium. Wstępne wyniki porównań ujawniły bardzo dużą, sięgającą 50%, rozbieżność między oznaczeniami wykonanymi obiema metodami. Utwierdziło nas to w przekonaniu, że był to skutek niezbyt prawidłowej kalibracji metody węgli aktywnych. Przypuszczalną przyczyną rozbieżności był fakt, że w czasie ekspozycji detektora w komorze kumulacyjnej stężenie radonu nie jest stałe. W momencie

umieszczenia detektora w komorze kumulacyjnej początkowe stężenie radonu odpowiada jego koncentracji w atmosferze, a więc wynosi zaledwie kilka czy kilkanaście  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Od tej chwili, w czasie ekspozycji detektora wydobywający się z gleby radon kumuluje się w komorze i wzrasta jego stężenie. Ponadto, detektor węglowy wychwytuje radon i końcowe stężenie radonu w komorze kumulacyjnej z węglem aktywnym jest znacznie niższe, niż w sąsiedniej komorze bez detektora. Powyższe obserwacje spowodowały wprowadzenie zmian w procedurze kalibracji.

W komorze radonowej starano się stworzyć podobne warunki, jak w terenie podczas rzeczywistych pomiarów współczynników ekshalacji. W tym celu początkowe stężenie radonu w komorze zmniejszono do wartości podobnych jak na otwartym powietrzu, a następnie włożono do niej detektory węglowe i przepływowe źródło radonowe firmy Pylon. Wcześniej, na podstawie atestu źródła, określono jego wydatek oraz szybkość narastania stężenia radonu w komorze, przy ciągłym przepływie powietrza. Ze źródła uprzednio usunięto cały nagromadzony w nim radon. Kalibracja trwała około 4,5 godziny – w komorze umieszczono kilkanaście detektorów węglowych i począwszy od drugiej godziny z komory wyjmowano co pół godziny po dwa lub trzy detektory węglowe. Wyjęte detektory poddawano odpowiedniej obróbce, a w otrzymanych próbkach określano stężenie radonu. Równocześnie w tym samym czasie pobierano próbki powietrza z komory radonowej do komór Lucasa. Wyniki odczytów komór Lucasa porównano z wynikami odczytów detektorów węglowych. Ku pewnemu zaskoczeniu okazało się, że wyznaczony w ten sposób współczynnik kalibracji nie był w znaczący sposób zależny od czasu ekspozycji detektorów węglowych (rys. 2). Należy przypuszczać, że mogło to być spowodowane faktem dość szybkiej sorpcji radonu na detektorach. W warunkach terenowych przeważająca część radonu z komory kumulacyjnej jest adsorbowana przez detektor, a wypadkowe stężenie radonu wewnątrz komory jest niskie.



**Rys. 2.** Kalibracja detektorów węglowych do badań ekshalacji:  $t$  – czas,  $C_{\text{Rn}}$  – stężenie radonu,  $K$  – współczynnik kalibracji, 1 – liniowy współczynnik kalibracji, 2 – krzywa aproksymacji, 3 – współczynnik kalibracji dla detektorów węglowych

**Fig. 2.** Calibration of carbon detectors for exhalation measurements:  $t$  – time,  $C_{\text{Rn}}$  – radon concentration,  $K$  – conversion coefficient, 1 – linear calibration coefficient, 2 – approximation curve, 3 – calibration coefficient for activated charcoal detectors



### 3. WSTĘPNE WYNIKI POMIARÓW WSPÓŁCZYNNIKA EKSHALACJI RADONU Z GLEBY NA TERENIE GÓRNEGO ŚLĄSKA

Pomiary ekshalacji radonu z gleby wykonano na terenach charakteryzujących się odmienną budową geologiczną skał budujących nadkład utworów karbońskich. Do pomiarów wytypowano następujące obszary:

- obszar występowania wychodni osadów triasowych – Jaworzno i Piekary Śląskie,
- obszar występowania utworów miocenu – okolice Bierunia,
- obszar występowania wychodni utworów karbońskich – Katowice,
- obszar osadnika kopalnianego, przeznaczonego do rekultywacji.

W większości przypadków równocześnie z pomiarami współczynnika ekshalacji wykonywano pomiary stężenia radonu w powietrzu glebowym.

Uzyskane wyniki przeciętnie zawierały się w zakresie  $2\div 50 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  podawanym w literaturze jako wartości charakterystyczne dla różnych typów gleb w warunkach normalnych [16]. Ekstremalne wartości współczynnika ekshalacji stwierdzono w Jaworznie w obszarze występowania wychodni utworów triasowych:  $0,4$  i  $79,4 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wartości współczynników ekshalacji mierzonych na wychodniach triasowych zarówno w Jaworznie, jak i w Piekarach Śląskich wahały się w znacznych zakresach, a ich wartość średnia wynosiła  $14,7 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Porównywalną wartość średnią współczynnika ekshalacji obliczono na podstawie pomiarów wykonanych na wychodniach utworów karbońskich:  $15,6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . W tym przypadku zakres mierzonych wartości nie był tak szeroki, jak w przypadku wychodni triasowych.

W obszarach, w których utwory karbońskie nie tworzą wychodni na powierzchni, lecz przykryte są osadami czwartorzędowymi o miąższościach przekraczających  $10$  metrów, stwierdzono niskie wartości współczynnika ekshalacji, średnio  $3,4 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Najniższe wartości współczynnika, od  $0,7$  do  $2,4 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  zmierzono w okolicach, gdzie występują utwory trzeciorzędowe, wykształcone jako ilaste osady miocenu. Mimo, że stężenia radonu w powietrzu glebowym mierzone w tym obszarze wahały się w dość szerokim zakresie, bo od  $300$  do  $7500 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , to w każdym przypadku współczynniki ekshalacji były niskie.

Uzyskane wyniki potwierdzają tezę, że budowa geologiczna warstwy powierzchniowej ma zasadniczy wpływ na tempo migracji radonu. Ze względu na krótki czas półrozpadu radonu, najistotniejsza jest warstwa skał zalegających na głębokościach nieprzekraczających kilkudziesięciu metrów.

Metoda określania współczynnika ekshalacji została zastosowana także w jednym dość nietypowym przypadku. Wykonywano badania ekshalacji radonu z osadów dennych osadnika kopalnianego, przeznaczonego do rekultywacji (fot. 2). Maksymalne stężenie radu  $^{226}\text{Ra}$  w zalegających na dnie osadach o podwyższonej promieniotwórczości wynosiło  $2,0 \text{ kBq}/\text{m}^3$ , a radu  $^{226}\text{Ra}$  prawie  $4,0 \text{ kBq}/\text{m}^3$ . Mimo upływu około pół roku od spuszczenia wody z osadnika, osady denne były nadal nią nasiąknięte i próby pomiaru stężeń radonu w powietrzu glebowym w osadach nie powiodły się. W niektórych partiach osadnika powierzchnia osadów wyschła na tyle, że na

niewielkim obszarze i blisko brzegu był możliwy pomiar ekshalacji radonu. Maksymalna wartość współczynnika ekshalacji zmierzonego w osadniku to ponad  $200 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Była to najwyższa wartość współczynnika ekshalacji, jaką uzyskano dotychczas w badaniach prowadzonych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Po całkowitym wysuszeniu osadów dyfuzja, a następnie ekshalacja radonu do atmosfery będzie zachodzić ze znacznie grubszej warstwy, niż w chwili wykonywania pomiarów. Oznacza to, że współczynniki ekshalacji radonu z wysuszonego osadu mogą być kilkukrotnie wyższe od aktualnie mierzonych. Wzmógłona ekshalacja radonu może stanowić zagrożenie radiacyjne dla potencjalnych mieszkańców i użytkowników budynków, posadowionych na terenie zrehabilitowanego zbiornika.



**Fot. 2.** Pomiar ekshalacji radonu w opróżnionym osadniku kopalnianym

**Phot. 2.** Measurements of radon exhalation in an empty mine settling pond

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Opracowana metoda pomiaru współczynnika ekshalacji radonu z gleby umożliwia wykorzystanie różnego typu detektorów radonu, a mianowicie:

- komór Lucasa,
- detektorów z węgla aktywnego.

Zastosowanie węgla aktywnych umożliwiło obniżenie progu detekcji metody, ale wiązało się z koniecznością przeprowadzenia kalibracji detektorów w sposób odbiegający od standardowych procedur.

Wyniki wykonanych dotychczas pomiarów wykazały, że istnieje związek między wielkością współczynników ekshalacji radonu, a budową geologiczną warstwy przypowierzchniowej. Skutki działalności górniczej, obserwowane na powierzchni, mogą dodatkowo powodować wzrost ekshalacji radonu.

Najwyższą wartość współczynnika ekshalacji zmierzono w rejonie likwidowanego osadnika wód kopalnianych. Przykład ten wskazuje, że w obszarach likwidowanych kopalń mogą występować miejsca o wzmożonej ekshalacji radonu, stanowiące potencjalne źródła zagrożenia radiacyjnego.

### Literatura

1. Colle R., Rubin R.J., Knab L.I., Hutchins T.M.R.: *Radon transport through and exhalation from building materials*. National Bureau of Standards Technical Note 1139 Springfield, Virginia. National Technical Information Service, 1981.
2. Cosma C., Van Deyne A., Poffijn A.: *A passive radon dosimeter based on the combination of the track etched detector and activated charcoal*. Radiation Measurements 1999 vol. 31, s. 325-330.
3. Geological Control on Radon. The Geological Society of America. Special Paper 271, eds. A.E. Gates, L.C.S. Gundersen, Denver, Co, 1992.
4. Karpińska M., Wołkowicz S., Mnich Z., Zalewski M., Mamont-Cieśla K., Antonowicz K.: *Ocena zagrożenia radonem w wybranych obszarach Suwalszczyzny*. Sesja naukowa „Radon w Środowisku”. Kraków, AGH IFJ 2000.
5. Kusy M., Wołkowicz S., Strzelecki R., Mamont-Cieśla K.: *Identifying enhanced radon in homes on the geological and physical basis in selected regions in Poland*. Workshop: Radon in the Living Environment. Ateny, Technical University of Athena 1999.
6. Lebecka J., Goszcz A., Lebecki K., Kobiela Z., Mnich K.: *Metody radiometryczne w badaniach wyrzutów i tapani*. Zeszyty Naukowe AGH 1988 nr 1218, Geofizyka Stosowana z. 1, s. 503-513.
7. Mazur D., Janik M., Łoskiewicz J., Olko P., Swakoń J.: *Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors*. Radiation Measurements 1999 No 31, s. 295-300.
8. Myrick T.E., Berven B.A., Haywood A.A.: *Determination of concentration of selected radionuclides in surface soil in U.S.* Health Physics 1983 Vol. 45, s. 631.
9. *Naturally Occurring Radioactivity in the Nordic Countries – Recommendations*. The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, 2000.
10. Nazaroff W.W., Nero A.V. (eds): *Radon and its decay products in indoor air*. New York, John Wiley&Sons, Inc. 1988.
11. Porstendorfer J.: *Radon and thoron and their decay products*. Proc. of the 5<sup>th</sup> Internat. Conf. on Natural Radiation Environment. Salzburg, Austria, Vienna IAEA 1991.
12. *Radiologiczny atlas Polski*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1998.
13. Swakoń J., Paszkowski M., Horwacik T., Janik M., Mazur D., Łoskiewicz J., Olko P.: *Pomiary stężenia radonu w powietrzu glebowym*. Sesja naukowa „Radon w Środowisku”. Kraków, IFJ AGH 2000.
14. Tanner A.B.: *Radon migration in the ground: a review*. Proc. of a Symposium on the Natural Radiation Environment. Huston, Texas. J.A.S., Adams and W.M. Lowder (eds.). US Dep. University of Chicago Press 1964, s. 161-190.
15. Tanner A.B.: *Radon migration in the ground*. A supplementary review, In T.F. Gesell and W.M. Lowder (eds). Proc. Natural Environment III, Conf-780422, US Dept. Of Commerce, National Information Service, Springfield, VA 1980.
16. Wilkening M., Clements W.E., Stanley D.: *Radon-222 flux measurements in widely separated regions*. The Natural Radiation Environment II, Adams J.A.S., Lowder W.M., Gasell T.F. (eds). USAEC Report Conf-720805-P2. Springfield, Virginia, National Technical Information Service 1972.
17. Wysocka M., Lebecka J., Chałupnik S., Mielnikow A.: *Survey of radon in houses in an area strongly affected by mining activity*. Gas Geochemistry, C. Dubois ed., Northwood, Science Reviews 1995.

18. Wysocka M., Mielnikow A., Chałupnik S.: *Radon in houses of the Upper Silesian Coal Basin*. Proc. of the 7<sup>th</sup> Tohwa University International Symposium Radon and Thoron in the Human Environment, Singapore, World Scientific 1998.
19. Wysocka M. i inni: *Changes of Radon Concentration in Soil Gas over Some Main Faults in Upper Silesian Coal Basin*. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 1999 M-22 (310).
20. Wysocka M.: *Zależność poziomu stężeń radonu na terenie Górnego Śląska od warunków geologiczno-górnictwowych*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2002 (praca doktorska).

**Recenzent:** dr inż. Leszek Drobek