

Małgorzata Wysocka

ZALEŻNOŚĆ STĘŻEŃ RADONU OD WARUNKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH NA TERENIE GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO

Streszczenie

Radon, promieniotwórczy gaz szlachetny, może być przyczyną zwiększonego ryzyka zachorowań na raka płuc i górnych dróg oddechowych. Stężenia tego gazu w budynkach mieszkalnych nierzadko osiągają wartości znacznie przekraczające dopuszczalny limit, czyli 200 Bq/m³.

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu stwierdzenie, czy w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) występują rejony o podwyższonym potencjale radonowym oraz wskazanie zależności między poziomem stężeń radonu a lokalnymi warunkami geologicznymi i działalnością górnictwem. W czasie realizacji badań wykonano ponad 900 długoterminowych (trwających do 6 miesięcy) pomiarów stężeń radonu w budynkach mieszkalnych usytuowanych na całym obszarze GZW. Podstawową metodą pomiarową była metoda pasywna pomiarów radonu z wykorzystaniem detektorów śladowych cząstek alfa. Ponadto prowadzono wstępne krótkoterminowe pomiary stężenia tego gazu za pomocą detektorów z węgla aktywnego. W celu dokładniejszego wyjaśnienia mechanizmów wpływających na migrację i przenikanie radonu do budynków wykonano pomiary stężenia radonu w powietrzu glebowym i jego ekshalacji z gleby. Budowę warstwy przypowierzchniowej w wybranych miejscach, charakteryzujących się podwyższonym potencjałem radonowym określono na podstawie badań geofizycznych (elektrooporowych).

Wyniki badań oraz analiza danych geologicznych i górnictwem pozwoliła na stwierdzenie, że średnie stężenie radonu w budynkach na obszarze GZW wynosi 46 Bq/m³, istnieje jednak zależność stężeń tego gazu od regionalnych i lokalnych warunków geologicznych. Niskie koncentracje radonu stwierdzono w obszarze występowania ilastych osadów miocenu, czyli w południowej i zachodniej części GZW. Wyższy poziom radonu obserwowano w obszarze pozbawionym izolującej warstwy ilów trzeciorzędowych. Najwyższe stężenia radonu występują w obrębie triasowych niecek (rys. 1 i 2). Stwierdzono, że utworami szczególnie sprzyjającymi migracji i ekshalacji radonu są dolomity kruszczone, tworzące rozległe wychodnie na powierzchni. Na podstawie pomiarów terenowych, laboratoryjnych, opracowano schemat migracji i ekshalacji radonu z wychodni różnych utworów geologicznych (rys. 5). Analiza wyników pomiarów na tle działalności górnictwem wskazała na istnienie związków między eksploatacją rud i węgla kamiennego a poziomem koncentracji radonu w budynkach. Bezpośrednią przyczyną występowania podwyższonych stężeń radonu w budynkach są rozluźnienia skał i gruntów oraz naruszenia budynków, ułatwiające wnikanie gazów do ich wnętrza. W obszarach intensywnej działalności górnictwem, a przede wszystkim w rejonach nakładania się wpływów płytkiej i głębokiej eksploatacji węgla i rud, poziom stężeń radonu w budynkach znacznie przekracza wartości średnie dla GZW (rys. 4). Współczesny rozwój procesów krasowych, wywołanych przez wpływy eksploatacji górnictwem zarówno dawnej, jak i współczesnej, jest zjawiskiem dodatkowo ułatwiającym migrację gazów. Procesy fizyczne i chemiczne powodujące odnowienie krasu, szczególnie intensywnie zachodzą w środowisku skał węglanowych.

Stwierdzono, że w obrębie miast Piekary Śląskie i Jaworzno lokalne warunki geologiczne i górnictwem szczególnie sprzyjają migracji i ekshalacji radonu.

Dependence of radon concentrations on the area of the Upper Silesian Coal Basin on geological and mining conditions

Summary

Radon, a radioactive noble gas can be the reason of increased risk to fall of lungs and upper respiratory tract. Concentrations of this gas in dwellings reach values considerably exceeding the permissible limit, i.e. 200 Bq/m³.

The article presents results of investigations which goals were as follow:

- to find out if in the area of Upper Silesian Coal Basin (USCB) occur regions with enhanced radon potential,
- to find out dependence between the radon levels and geological conditions as well as mining activity.

In frame of the work more than 900 long-term (lasting up to 6 month) measurements of radon concentrations in dwellings situated in the entire USCB were carried out. Preliminary short-term measurements of radon concentration by means of charcoal detectors were done. The passive method, based on solid state nuclear track detectors (SSNTD) has been used for long-term radon measurements. In order to explain more exactly the mechanism influencing the migration and penetration of radon to buildings, measurements of radon in soil concentrations and its exhalation from soil were carried out. The structure of strata situated close to the surface in selected sites characterized by increased radon potential was investigated with the application of geophysical methods (electroresistivity).

The results of investigations and analysis of geological and mining data allowed to calculate that the average radon concentration in buildings in USCB area is equal to 46 Bq/m³, however the correlation between radon concentrations and regional and local geological conditions is observed. Low radon concentrations were measured in the area of occurrence of silty Miocene sediments, i.e. in the southern and western part of USCB. Higher radon levels were observed in areas without the insulating layer of Tertiary clays. The highest radon concentrations occur within the Triassic sinclines (Fig. 1 and 2). It has been found that migration and exhalation of radon is the easiest for ore-bearing dolomites, especially in case of widespread outcrops on the surface. On the basis of field measurements and laboratory tests a scheme of radon migration and exhalation from outcrops of different formations has been developed (Fig. 5). The analysis of the results shown the correlation between mining activity (ore and hard coal mining) and radon levels in dwellings. The main reason of occurrence of increased radon concentrations in buildings are fissures in rocks, ground loosening and damages of buildings structure enables gas penetration to their interiors. In areas of intensive mining activity, first of all in regions where impacts of shallow ore mining are intensified by deep hard-coal extraction, the level of radon concentration considerably exceeds the average values for the Upper Silesian Coal Basin (Fig. 4). The current development of karst processes caused by impact of mining operation both in the past and at the present time is a phenomenon additionally making easier gas migration. Physical and chemical processes causing karst rejuvenation occur particularly intensively in carbonate rocks.

It has been found that within the city Piekary Śląskie and Jaworzno local geological and mining conditions are particularly good for radon migration and exhalation.

1. WPROWADZENIE

Skorupa ziemska zawiera nieznaczne ilości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Są to pierwiastki, których jądra ulegają samorzutnym przemianom, w wyniku czego powstają atomy nowych izotopów oraz następuje emisja cząstek materialnych tworzących tzw. promieniowanie korpuskularne.

Powszechna obecność naturalnych izotopów promieniotwórczych sprawia, że narażenie radiacyjne występuje wszędzie i każdy z mieszkańców Ziemi przez całe swoje życie poddawany jest jego oddziaływaniu.

Z uwagi na ochronę radiologiczną istotne jest występowanie wśród naturalnych izotopów promieniotwórczych, izotopów w postaci gazowej, czyli izotopów radonu. Radon, jako gaz szlachetny jest mało toksyczny, szkodliwe są natomiast produkty jego rozpadu. **Promieniowanie emitowane przez radon i jego krótkożyciowe produkty rozpadu jest przyczyną największych dawek, jakie otrzymuje człowiek ze źródeł naturalnych.**

Narażenie radiacyjne powodowane przez radon występuje przede wszystkim w zamkniętych przestrzeniach o słabej wentylacji. Tak więc miejscami szczególnie zagrożonymi promieniowaniem jonizującym są kopalnie, głównie rud uranowych i metali, ale również węgla kamiennego.

Już w XVI wieku pisano o ujemnym wpływie na zdrowie człowieka wyziewów ziemi, opisując chorobę, na którą zapadali górnicy kopalń rud metali na Rudawach. Dzisiaj wiemy, że bezpośrednią przyczyną zachorowań i zgonów ówczesnych górników były krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, powodujące wzrost zachorowań na nowotwory płuc. Kwestia narażenia radiacyjnego w kopalniach uranu interesowała uczonych już od ponad pięćdziesięciu lat [5, 25]. Od ponad dwudziestu lat podejmowany jest również problem narażenia radiacyjnego w polskich kopalniach węgla kamiennego [15].

Równocześnie z badaniami nad problemem narażenia radiacyjnego i sposobami jego ograniczania w kopalniach, prowadzono pomiary stężenia radonu i jego pochodnych w tunelach, jaskiniach, piwnicach i pomieszczeniach mieszkalnych. Wyniki tych prac wykazały, że przebywając w mieszkaniach, w pewnych przypadkach, możemy być narażeni na dawki promieniowania niewiele mniejsze, niż górnicy pracujący w podziemnych zakładach górniczych [17]. Stwierdzono ponadto, że najpoważniejszymi źródłami radonu występującego w budynkach są skały budujące podłoże i gleba, skąd na drodze dyfuzji i konwekcji przedostaje się on przez naturalne szczeliny i spękania bezpośrednio do pomieszczeń mieszkalnych.

Wyniki dotychczas wykonanych pomiarów stężeń radonu w budynkach na obszarze Górnoląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) wykazały, że w pewnych rejonach Zagłębia możliwe jest występowanie podwyższonych koncentracji tego gazu [27].

Analiza dotychczasowych wyników badań nad występowaniem radonu pozwoliła na wskazanie celu i kierunku dalszych badań. Realizując pracę zbadano, czy istnieje zależność stężeń radonu na terenie GZW od lokalnych warunków geologicznych i działalności górniczej oraz czy możliwe jest wyznaczenie obszarów o podwyższonym potencjale radonowym.

2. STOSOWANE METODY POMIAROWE

Podstawową metodą stosowaną w czasie realizacji badań, była metoda pasywna pomiarów stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych z wykorzystaniem detektorów śladowych cząstek alfa. Jako detektory śladowe wybrano folie typu LR-115, typu *strippable* produkcji firmy Kodak. Komorę dyfuzyjną stanowiły kubki plastikowe o pojemności 150 cm³. Do odczytu folii LR-115 zastosowano iskrowy (mechaniczny) licznik śladów. Dolny próg detekcji zastosowanej metody wynosi

10 Bq/m³, co umożliwiło detekcję radonu na poziomie porównywalnym ze stężeniami tego gazu w powietrzu na otwartym terenie, czyli około 8÷9 Bq/m³ [18].

Za pomocą metod pasywnych mierzy się wartość uśrednioną stężenia radonu w czasie, w jakim detektor był ekspozycyjny w budynku.

W celu lepszego rozpoznania wpływu różnych czynników determinujących stężenie radonu w budynkach wykonano następujące pomiary:

- krótkoterminowe (czterodniowe) pomiary stężenia radonu za pomocą detektorów z węgla aktywnego,
- pomiary ekshalacji radonu z gleby oraz stężenia radonu w powietrzu glebowym,
- pomiary geofizyczne – elektrooporowe.

3. WYNIKI POMIARÓW TERENOWYCH

3.1. Pomiary krótkoterminowe

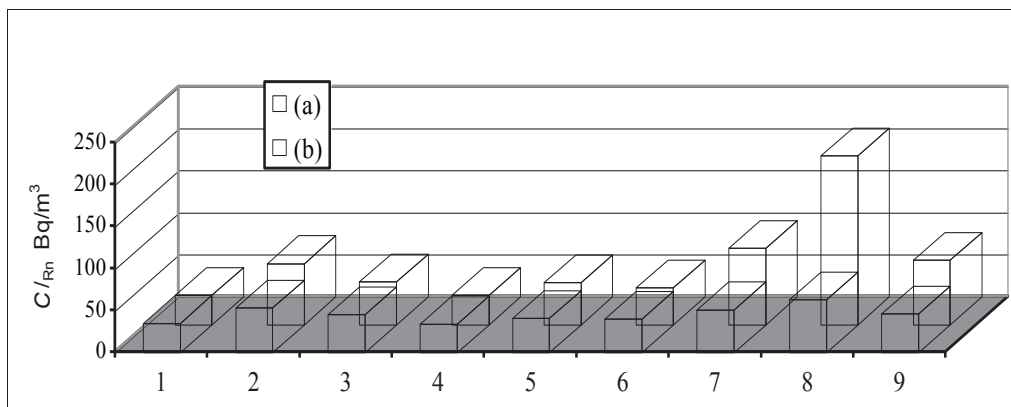
Wstępne, krótkoterminowe, pomiary stężeń radonu w budynkach usytuowanych na obszarze GZW dały podstawę do stwierdzenia, że czynnikami, które mają decydujący wpływ na stężenie gazu w domach są warunki geologiczne i odległość punktu pomiarowego od podłoża (kondygnacja). Niższe stężenia radonu stwierdzono w rejonie występowania pokrywy mioceńskich utworów ilastych, utrudniających migrację fluidów, czyli w południowej i południowo-zachodniej części Zagłębia. Wyższe stężenia tego gazu określono natomiast w północnej i wschodniej części GZW, pozbawionej nieprzepuszczalnych osadów trzeciorzędowych. Nie wykluczono, że na wpływ warunków geologicznych nakładają się efekty działalności górniczej. Powyższe wyniki i wnioski stanowiły założenia do zaplanowania badań długoterminowych.

3.2. Pomiary długoterminowe

Wykonano 916 pomiarów długoterminowych w 492 budynkach, na podstawie których obliczono, że średnie stężenie w pomieszczeniach na parterze wynosi 46 Bq/m³, w piwnicach 77 Bq/m³. Zakres mierzonych stężeń radonu na parterach waha się od 10 do 490 Bq/m³, a w piwnicach od 10 do 860 Bq/m³. Stwierdzono, że rozkład stężeń radonu na obszarze GZW nie jest równomierny. Najwyższe stężenia radonu stwierdzono w obrębie Niecki Bytomskiej i Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej, najniższe w obrębie struktury fałdowej okolic Gliwic (rys. 1).

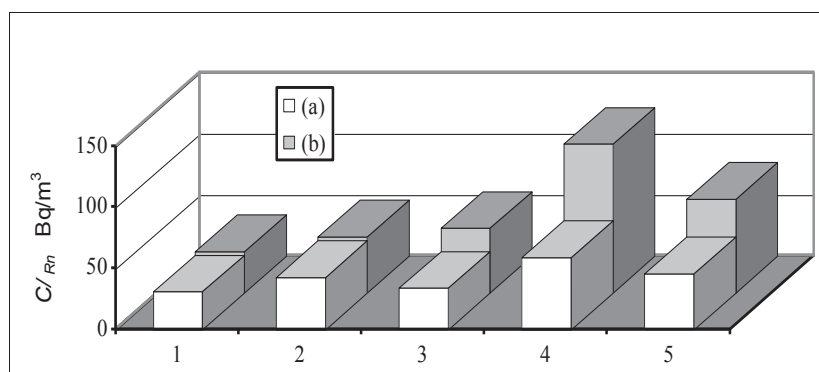
Korzystając z map geologicznych [2, 24] przeanalizowano rozkład stężeń radonu w budynkach zbudowanych w obrębie odmiennych wydzieleni litostratygraficznych. Stwierdzono, że najwyższe stężenia radonu występują w strefach wychodni utworów triasowych, najniższe natomiast tam, gdzie zalegają utwory czwartorzędowe o miąższości ponad 15 metrów, osady trzeciorzędowe (mioceńskie) oraz w miejscach wychodni osadów karbońskich. Różnice w stężeniach radonu w obrębie poszczególnych wydzieleni litologicznych są szczególnie widoczne w przypadku pomiarów prowadzonych w piwnicach. Średnie stężenie radonu, na przykład w piwnicach

budynków zlokalizowanych na triasie czterokrotnie przekracza średnie stężenie w budynkach na obszarach czwartorzędowych. Stężenia w pomieszczeniach na parterach w obszarach triasowych i czwartorzędowych różnią się prawie dwukrotnie (rys. 2).



Rys. 1. Wyniki długoterminowych pomiarów stężenia radonu w domach na terenie GZW: a – parter, b – piwnica; 1 – struktura fałdowa okolic Gliwic, 2 – Niecka Chwałowicka, 3 – Niecka Jejkowicka, 4 – Siodło Jastrzębia, 5 – Siodło Główne, 6 – Niecka Główna, 7 – Niecka Bytomska, 8 – Niecka Chrzanowsko-Wilkoszyńska, 9 – całe GZW; C_{Rn} – stężenie radonu

Fig. 1. Results long-term measurements of radon concentration of houses of the USCB area: a – average concentration on ground floor, b – average concentration in cellar; 1 – fold structure of Gliwice surroundings, 2 – Chwałowicka Syncline, 3 – Jejkowicka Syncline, 4 – Jastrzębie Saddle, 5 – Main Saddle, 6 – Main Syncline, 7 – Bytomska Syncline, 8 – Chrzanowsko-Wilkoszyńska Syncline, 9 – entire USCB, C_{Rn} – radon concentration



Rys. 2. Wyniki pomiarów stężenia radonu w domach na tle budowy geologicznej GZW: a – średnie stężenie na parterze budynku, b – średnie stężenie w piwnicy; 1 – czwartorzęd, 2 – miocen, 3 – karbon, 4 – trias, 5 – całe GZW, C_{Rn} – stężenie radonu

Fig. 2. Results of measurements of radon concentrations in houses with correlation of geological structure of the USCB: a – average concentration on ground floor, b – average concentration in cellar; 1 – Quaternary, 2 – Miocene, 3 – Carboniferous period, 4 – Triassic period, 5 – entire USCB, C_{Rn} – radon concentration

W związku z tym, że w rejonach triasowych Niecki Bytomskiej i Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej stwierdzono najwyższe stężenia radonu w budynkach, zdecydowano się na zagęszczenie pomiarów w obrębie tych struktur. Jako poligony badawcze wytypowano miasta Piekary Śląskie i Jaworzno. Badania dodatkowe, mające na celu lepsze rozpoznanie problemu, skoncentrowano również głównie w obrębie wybranych miast.

3.3. Wyniki pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym

Wyniki pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym stanowią podstawę do wyznaczenia tzw. potencjału lub ryzyka radonowego badanego obszaru. Wysokie stężenia radonu w powietrzu glebowym są przyczyną występowania podwyższonych stężeń radonu w budynkach, szczególnie w przypadku istnienia łatwych dróg migracji i wnikania gazów do budynków.

Na podstawie wyników pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym, wykonywanych w centralnej i północnej części GZW stwierdzono, że w większości przypadków zmierzone stężenia radonu nie przekraczają wartości $50\ 000\ \text{Bq/m}^3$, co zgodnie z klasyfikacją szwedzką [1], wskazuje na średni lub niski potencjał radonowy obszaru badań. Zgodnie z definicją Akerbloma, potencjał radonowy to średnia arytmetyczna stężenia radonu w powietrzu glebowym w wydzielonej jednostce, na przykład geologicznej. Tylko w około 6% przypadków stężenia radonu w powietrzu glebowym pozwalają na określenie potencjału obszaru jako wysoki, 67% wyników wskazuje na średni potencjał radonowy obszaru, 27% wyników – na niski potencjał radonowy. Według klasyfikacji specjalistów czeskich [3], stosujących pojęcie **ryzyka radonowego** i uwzględniających, oprócz stężenia radonu w powietrzu glebowym również przepuszczalność gleby, rozkład procentowy wyników przedstawia się następująco:

- obszar wysokiego ryzyka radonowego – 11% wyników pomiarów,
- obszar średniego ryzyka radonowego – 58% wyników pomiarów,
- obszar niskiego ryzyka radonowego – 41% wyników pomiarów.

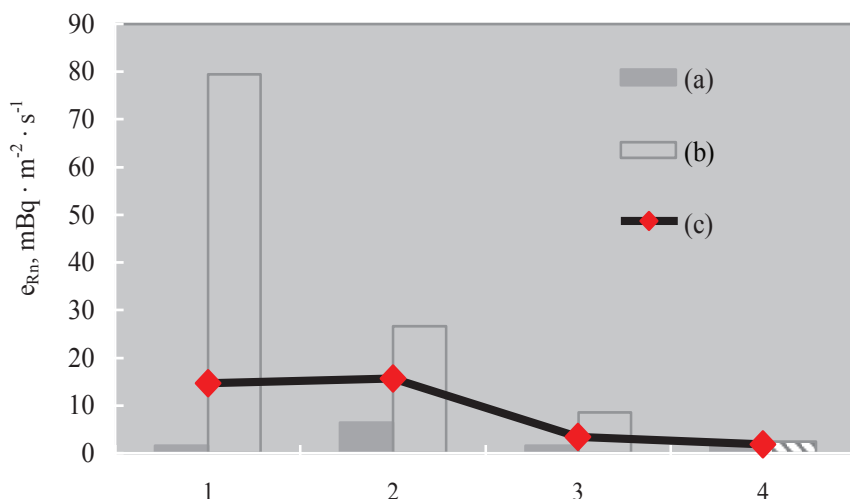
Należy podkreślić, że przepuszczalność określano jakościowo w sposób szacunkowy jako niską, średnią lub wysoką.

3.4. Wyniki pomiarów ekshalacji radonu z gleby

W celu lepszego zrozumienia mechanizmu migracji radonu wykonano pomiary ekshalacji tego gazu z gleby w obszarach charakteryzujących się odmienną budową geologiczną warstw, stanowiących nadkład utworów karbońskich. Ekshalacja, to zjawisko polegające na tym, że atomy gazu wydostają się z przestrzeni międzyziarnowych skały do atmosfery. Do pomiarów wytypowano następujące rejonu:

- rejon występowania wychodni osadów triasowych – Jaworzno i Piekary Śląskie,
- rejon występowania miększej pokrywy utworów miocenu,
- rejon występowania wychodni utworów karbońskich,
- rejon występowania osadów czwartorzędowych o miąższości powyżej 10 m.

Większość wyników pomiarów terenowych współczynnika ekshalacji zawiera się w zakresie od $2 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ do $50 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, podawanym w doniesieniach literaturowych jako wartości charakterystyczne dla różnych typów gleb w warunkach normalnych [4]. Największy rozrzut zmierzonych wartości współczynnika ekshalacji stwierdzono w Jaworznie i Piekarach Śląskich w obszarze występowania wychodni utworów triasowych: od 1,6 do $79,4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Średnie wielkości współczynnika ekshalacji w strefach występowania wychodni triasu i karbonu są porównywalne: $14,7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ i $15,7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Najniższe wartości współczynnika, średnio $3,4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ i $1,8 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ zmierzono w strefach występowania osadów trzecio- i czwartorzędowych (rys. 3).



Rys. 3. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji: a – minimalna, b – maksymalna, c – średnia; 1 – trias, 2 – karbon, 3 – czwartorzęd, 4 – miocen, e_{Rn} – współczynnik ekshalacji radonu

Fig. 3. Results of measurements of radon exhalation coefficient: a – minimum, b – maximum, c – average; 1 – Triassic period, 2 – Carboniferous period, 3 – Quaternary, 4 – Miocene, e_{Rn} – radon exhalation coefficient

3.5. Wyniki uzupełniających pomiarów geofizycznych

Wytypowano trzy poligony, w których uzyskano wysokie stężenia radonu w budynkach. W tych miejscach w Piekarach Śląskich i Jaworznie wykonano pomiary geofizyczne – elektrooporowe.

Wyniki pomiarów metodą profilowań elektrooporowych (PE) pozwoliły na stwierdzenie, że w niektórych miejscach badanych rejonów opór elektryczny podłoża wzrasta do wartości około $40 \text{ om} \cdot \text{m}$, które można uznać za wartości anomalne. Podwyższenie wartości oporu może wynikać z obecności w warstwach podłoża stref szczelinowatych lub pojedynczych szczelin o znacznym rozwarciu, które drenują zawadnione utwory triasu.

Wyniki interpretacji krzywych sondowań elektrooporowych (PSE) w poszczególnych rejonach badań wykazały, że we wszystkich strefach objętych badaniami występują znaczne zaburzenia ciągłości warstw przypowierzchniowych, które ułatwiają migrację gazów, w tym radonu.

4. NAJWAŻNIEJSZE CECHY BUDOWY GEOLOGICZNEJ REJONÓW, W KTÓRYCH STĘŻENIA RADONU W DOMACH PRZEKRACZAJĄ WARTOŚCI ŚREDNIE DLA CAŁEGO OBSZARU GZW

Na podstawie analizy wyników pomiarów zawartości radonu w budynkach oraz w powietrzu glebowym stwierdzono podwyższone stężenia radonu w północnej i wschodniej części GZW, w obrębie Niecki Bytomskiej i Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej. Najwyższym potencjałem radonowym charakteryzuje się obszar miast:

- Piekary Śląskie, a zwłaszcza południowe dzielnice miasta,
- Jaworzno, a w szczególności południowa i wschodnia część miasta.

Rejony, w których stężenia radonu w budynkach przekraczają wartość średnią dla Górnego Śląska, charakteryzują się specyficzną budową geologiczną. Wysokie stężenia radonu w piwnicach budynków usytuowanych w wyżej wymienionych rejonach jednoznacznie potwierdzają, że głównym źródłem emisji radonu jest podłoże, charakteryzujące się budową i właściwościami fizycznymi sprzyjającymi wzmoczonej emanacji, migracji i ekshalacji tego gazu. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że w wyżej wymienionych rejonach stężenia radonu w piwnicach są dużo wyższe niż na parterach. Stosunek stężeń radonu w piwnicy i na parterze wynosi 2:1 w przypadku Niecki Bytomskiej i 3,2:1 w przypadku Niecki Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej. Na pozostałych obszarach GZW stosunek ten w przybliżeniu równy jest 1:1.

Modelowymi przykładami obszarów potencjalnego ryzyka radonowego są dzielnice Piekar Śląskich i Jaworzna zlokalizowane na wychodniach utworów triasowych. Budowa geologiczna tych miejsc jest bardzo dobrze rozpoznana dzięki wieloletniej eksploatacji węgla kamiennego, a w przypadku Piekar Śląskich również rud cynku i ołowiu. Analiza rozkładu stężeń radonu w budynkach na tle budowy geologicznej rejonów ich usytuowania pozwala na stwierdzenie, że wysokie stężenia radonu w budynkach na terenie GZW należy wiązać ze strefami charakteryzującymi się występowaniem wychodni utworów triasowych, a w szczególności dolomitów diploporowych wapienia muszlowego środkowego oraz dolomitów kruszczośnych i wapieni gogolińskich dolnego wapienia muszlowego.

Dolomity kruszczośne, w obrębie których stwierdzono maksymalne stężenia radonu, są specyficznymi utworami geologicznymi, występującymi na miejscu warstw dolnego i częściowo środkowego wapienia muszlowego, rzadziej w miejscu utworów retu [6, 22]. Na podstawie danych literaturowych przeanalizowano cechy wyróżniające te utwory od otaczających je skał węglanowych. I tak:

- charakteryzują się one silnym spękaniami, w porównaniu ze skałami otaczającymi i są szczególnie podatne na kruche niszczenie [22],
- w skałach otaczających występują jedynie spękania ciosowe, natomiast w dolomitach kruszczośnych – wszystkie rodzaje spękań, co według Pawłowskiej powoduje dużą ich szczelinowatość [20],
- dolomity kruszczośne charakteryzują się małą gęstością przestrzenną i obecnością wolnych przestrzeni sięgającą 30% [6],
- charakteryzują się wyraźnie wyższą porowatością i przepuszczalnością w porównaniu z otaczającymi je utworami węglanowymi [22].

Powyższe cechy, jak można przypuszczać, wskazują, że w dolomitach kruszczośnych istnieją szczególnie dobre warunki gromadzenia, przemieszczania, a następnie wydostawania się do atmosfery izotopu radonu.

W celu rozszerzenia analizy wpływu budowy geologicznej na stężenia radonu w budynkach, wykorzystano wspomniane wcześniej geofizyczne badania elektrooporowe, na podstawie których określono budowę geologiczną warstwy przypowierzchniowej do głębokości około 50 metrów w wybranych strefach, charakteryzujących się występowaniem szczególnie wysokich koncentracji radonu w budynkach [13].

Przekroje geoelektryczne warstw podłoża przeprowadzone zostały w bezpośrednim sąsiedztwie budynków, w których zmierzono wysokie stężenie radonu nie tylko w piwnicach, ale również w pomieszczeniach na parterze. We wszystkich badanych rejonach zasadnicze znaczenie w budowie warstw przystropowych mają utwory triasowe o strukturze zaburzonej na skutek procesów tektonicznych lub górniczych. Obydwa czynniki powodują znaczne rozluźnienie skał, co prowadzi do powstawania zwiększonej powierzchni, z której ekshalacja radonu jest ułatwiona.

I tak na przykład na jednym z poligonów budynek położony jest w bliskim sąsiedztwie strefy silnie zaburzonej tektonicznie na wietrzelinie dolomitów kruszczośnych. Nieciągłość tworzy szczelina lub strefa szczelin genezy tektonicznej lub eksploatacyjnej. W innym miejscu stwierdzono, że budynki zbudowane są na warstwie dolomitów diploporowych środkowego wapienia muszlowego, charakteryzujących się obecnością licznych pustek, kawern i szczelin ułatwiających migrację gazów. Dodatkowo warstwy przystropowe są w znacznym stopniu zwietrzałe, co sprzyja przenikaniu gazów. Pomiar wykonany na kolejnym poligonie wykazały, że budynek, w którym zmierzono najwyższe stężenia radonu w piwnicy, wybudowany jest w miejscu występowania strefy szczelinowej o znacznym rozwarciu szczelin ułatwiających migrację gazów.

5. ROZKŁAD STĘŻEŃ RADONU W BUDYNKACH NA TLE SYTUACJI GÓRNICZEJ

Za główne źródło radonu w budynkach specjaliści zajmujący się tą problematyką zgodnie wskazują na skały i glebę budujące podłoże. Niektórzy badacze podkreślają jednak, że wpływ podłoża zdeterminowany budową geologiczną obszaru może być zmodyfikowany działalnością człowieka, na przykład eksploatacją górniczą [10].

Należy podkreślić, że przyczyną wzmożonej emisji radonu w niektórych obszarach GZW nie jest podwyższona promieniotwórczość naturalna kopalin będących przedmiotem eksploatacji, czy towarzyszących im skał płonnych. Badania prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa wykazały bowiem, że skały karbońskie nie zawierają podwyższonych stężeń izotopów radu [28]. Nie należy również wiązać podwyższonych stężeń radonu w powietrzu glebowym z wysokimi stężeniami tego gazu mierzonymi chodnikami głębokich kopalń węgla kamiennego. W związku z krótkim czasem połowicznego zaniku radonu, droga jaką zdąży przebyć ten gaz w środowisku skalnym nie przekracza kilkunastu metrów [16, 19]. Z tego powodu jest mało prawdopodobne, by radon przebył odległość od wyrobisk dołowych, znajdujących się na głębokości kilkuset metrów, do powierzchni. Przyczyny wzrostu zagrożenia ryzykiem radonowym należy upatrywać w rozwoju procesów powodujących deformacje w górotworze, a wywołanych eksploatacją górniczą i ich skutkami na powierzchni, przyczyniającymi się do dezintegracji skał w strefie przypowierzchniowej. Wyniki pracy, poparte obserwacjami naukowców niemieckich [10] wskazują, że obszary podwyższonego ryzyka radonowego w rejonach górniczych należy wiązać przede wszystkim z miejscami, gdzie prowadzono płytką eksploatację górniczą. Pustki poeksploatacyjne, będące przyczyną powstawania zniszczeń struktury górotworu oraz powodujące deformacje nieciągłe na powierzchni ułatwiają kumulację, a następnie migrację i wnikanie do budynków radonu i innych gazów.

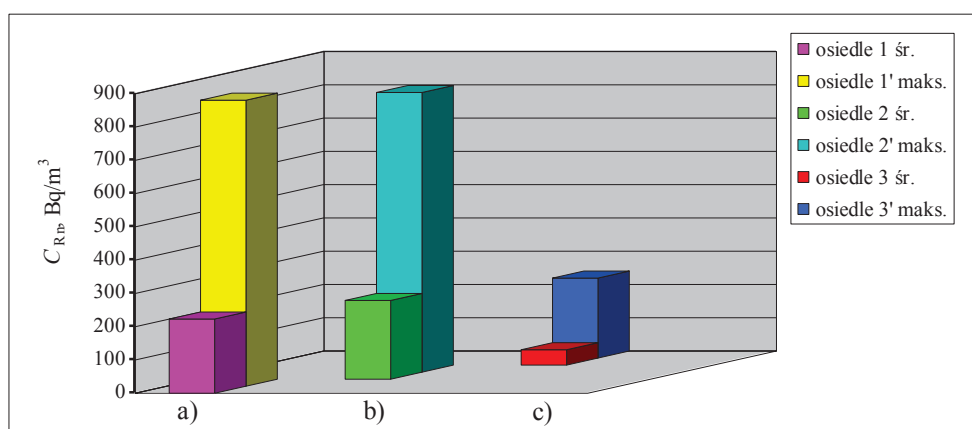
W rejonie Niecki Bytomskiej, gdzie stwierdzono wysokie stężenia radonu, historia eksploatacji rud cynkowo-ołowiowych sięga XII wieku. W ciągu kilku wieków kopalnictwa powstały tysiące płytkich wyrobisk górniczych, które spowodowały przekształcenia w górotworze, znacznie ułatwiające migrację fluidów, w tym radonu. W pewnych rejonach GZW, w tym również w Niecce Bytomskiej, lokalnie eksploatowano z powierzchni węgiel kamienny. Wokół wychodni drążono również płytkie – kilku- lub kilkunastometrowe – szyby. Taki typ eksploatacji miał bardzo ograniczony zasięg, ale powodował podobne zmiany w górotworze, jak płytką eksploatacją rudna. Rejony płytkiej eksploatacji złóż rud i węgla kamiennego [7, 12] wskazują miejsca potencjalnego występowania rozluźnienia i dezintegracji skał budujących górotwór, a co z tym związane – ułatwionej ekshalacji i migracji gazów, w tym radonu.

W pewnych przypadkach również głęboka eksploatacja węgla może wpływać na wzrost ryzyka radonowego jeśli:

- wśród warstw stropowych nie występują osady ograniczające migrację gazów, na przykład ily miocenijskie,
- powoduje ona powstawanie deformacji nieciągłych na powierzchni na skutek dużej (ponad 5 m/dobę) prędkości prowadzenia frontów ścianowych lub eksploatacji w wielu pokładach lub warstwach doprowadzonych do wspólnej płaszczyzny [14],
- powoduje powstawanie znacznych osiadań na powierzchni,
- prowadzona jest w pobliżu stref uskokowych i powoduje naruszenie struktury skał z warstwy przypowierzchniowej, czego efektem na powierzchni jest powstawanie progów, rozluźnień itp. deformacji nieciągłych,

- deformacje powierzchni będące efektem głębokiej eksploatacji węgla nakładają się na szkody górnicze spowodowane płytką eksploatacją rudną, uruchamiając procesy krasowienia skał,
- opisane powyżej efekty oddziaływania górnictwa na powierzchnię przyczyniają się do powstawania uszkodzeń budynków mieszkalnych, co ułatwia wnikanie gazów z rozluźnionych skał podłoża.

Dobrym przykładem ilustrującym rozkład stężeń radonu na tle sytuacji górniczej jest obszar Piekary Śląskich, gdzie wykonano 342 długoterminowe, trwające do 6 miesięcy, pomiary stężenia radonu w domach. Analizując wyniki pomiarów stężeń radonu w domach zlokalizowanych w granicach miasta zaobserwowano znaczne wahania mierzonych wartości w domach zbudowanych w obrębie tej samej struktury tektonicznej, czy wydzielenia litostratygraficznego. Ponadto stwierdzono, że stężenia radonu w budynkach w osiedlach, gdzie odczuwane są wpływy działalności górniczej są znacznie wyższe, niż w osiedlu, na obszarze którego nie wybierano złóż rud czy węgla kamiennego. Najwyższe stężenia radonu stwierdzono tam, gdzie miała miejsce zarówno płytką eksploatacją rudną, jak i głęboką – węglową (rys. 4).



Rys. 4. Średnie (1, 2, 3) i maksymalne (1', 2', 3') stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych budynków w Piekarach Śląskich na tle wpływów działalności górniczej: a – wpływ eksploatacji rud i węgla, b – wpływ eksploatacji węgla, c – brak wpływu eksploatacji, C_{Rn} – stężenie radonu

Fig. 4. Average (1, 2, 3) and maximum (1', 2', 3') radon concentrations in habitable rooms of buildings in Piekary Śląskie against the background of mining activity impact: a – impact of ores and coal mining, b – impact of coal mining, c – lack of mining impact, C_{Rn} – radon concentration

Wyniki badań geofizycznych (elektrooporowych) były również pomocne do ustalenia genezy podwyższonych stężeń radonu w wybranych rejonach Piekary Śląskich i Jaworznie. Stwierdzono, że anomaliami elektrooporowym na poligonach badawczych można przypisać genezę górniczą, gdyż były one generowane w pobliżu miejsc, w których ciągłość warstw została przerwana wyrobiskami górniczymi w złożu rudnym lub w miejscach, w których koncentrowały się osiadania spowodowane wpływem eksploatacji węgla. Tak więc wyniki badań geofizycznych

potwierdziły tezę, że skutki działalności górniczej mają wpływ na wzmożoną ekshalację i ułatwioną migrację radonu, który w sprzyjających warunkach wnika do budynków.

6. MECHANIZMY UŁATWIAJĄCE MIGRACJĘ RADONU

Radon, podobnie jak inne gazy, między innymi metan, przemieszcza się dzięki konwekcji i dyfuzji. Dlatego na podstawie badań zachowania się metanu można do pewnego stopnia przewidywać sposób przepływu radonu przez górotwór.

Obserwacje i badania nad zjawiskami związanymi z metanonośnością utworów karbońskich wykazały, że w części Górnośląskiego Zagłębia, gdzie ilaste osady miocenu przykrywają utwory starsze, zgromadzone są znaczne zasoby tego gazu. Nieprzepuszczalna pokrywa mioceńska uniemożliwia bowiem ucieczkę gazów do atmosfery. Z tego samego względu ograniczona jest migracja i wnikanie gazów do budynków. Wyniki pomiarów stężeń radonu w domach w GZW potwierdziły, że również i ten gaz nie pokonuje bariery, jaką stanowią ilaste osady miocenu.

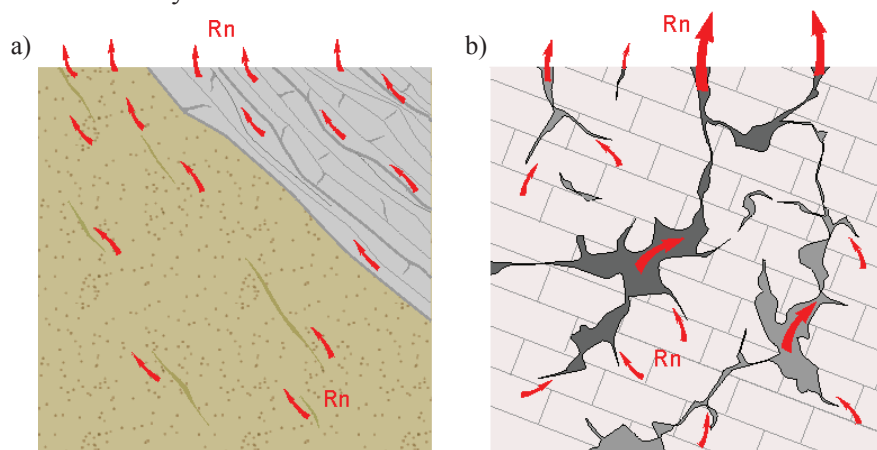
Podejmując badania koncentracji radonu w budynkach na terenie Górnego Śląska założono, że można spodziewać się podwyższonych koncentracji tego gazu w obszarach występowania wychodni skał karbońskich na powierzchni. Twierdzenie to poparte było stanem wiedzy na temat zagrożeń radiologicznych powodowanych przez radon i jego krótkożyciowe produkty rozpadu w wyrobiskach dołowych kopalń węgla kamiennego [23] oraz wynikami badań zmian stężeń radonu w górotworze następujących przed zjawiskami sejsmicznymi powodowanymi eksploatacją górniczą [8]. Pomiary stężenia radonu w budynkach nie potwierdziły jednak słuszności takich założeń, gdyż w obszarach wychodni karbońskich stężenia radonu są na ogół niskie i rzadko przekraczają wartości średnie dla całego GZW. Piaskowce serii górnośląskiej, charakteryzujące się znaczną porowatością, mają zasadnicze znaczenie dla przepływu gazów, w tym radonu, przez skały karbońskie. Cecha ta sprawia, że powierzchnia, z której może następować emanacja radonu jest znaczna. Nie ma natomiast uprzywilejowanych dróg migracji gazu – w całej objętości istnieją porównywalne warunki przemieszczania się cząsteczek gazu uwolnionego z sieci krystalicznej. Nie ma również powierzchni, z których ekshalacja byłaby szczególnie ułatwiona – z całej powierzchni odsłonięcia gaz może z porównywalną łatwością przenikać do atmosfery lub wnętrza budynku, o ile znajduje się na drodze jego wędrówki. Nie zachodzi zjawisko kumulowania radonu wydzielonego z większej objętości skały. Ekshalacja radonu jest rozłożona na dużej powierzchni, stąd jej wartości mierzone w warunkach terenowych są niskie, a tym samym stężenia radonu w budynkach zlokalizowanych na wychodniach karbońskich są również nieznaczne. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi [9], w strefach rozległych wychodni skał karbońskich nastąpiło odgazowanie pokładów węgla z zasobów innego gazu – metanu.

W przypadku węglanowych osadów triasowych istotną rolę dla migracji wody i gazów mają spękania i szczeliny stanowiące uprzywilejowane drogi wędrówki. W utworach węglanowych wapienia muszlowego rozproszone są nierównomiernie pustki i kawerny, będące kolektorami gazów uwalniających się z przestrzeni między-

ziarnowych i drobnych szczelin. Stwierdzono ponadto, że erozja przypowierzchniowa, polegająca na dezintegracji materiału skalnego na skutek oddziaływania wody i temperatury ma w utworach triasowych znacznie większy zasięg niż w osadach karbonu. Pustki i leje krasowe obserwowane są nawet na głębokości kilkudziesięciu metrów. Oznacza to, że radon uwolniony z sieci krystalicznej skał o określonej objętości może wędrować ku powierzchni uprzywilejowanymi drogami. Ekshalacja w miejscach występowania spękań i szczelin o znacznym rozwarciu jest wysoka, a tym samym większe prawdopodobieństwo podwyższonych koncentracji radonu w budynkach zbudowanych na wychodniach triasowych.

Wyniki badań wykonywanych w terenie (pomiarów współczynnika ekshalacji i stężenia radonu w powietrzu glebowym) na wychodniach utworów różniących się litostratygraficznie, potwierdzają tezę, że budowa geologiczna podłoża, a szczególnie właściwości fizyczne decydujące o ich przepuszczalności (porowatość, stopień zwietrzenia, stopień spękania, charakter szczelin itp.) mają zasadniczy wpływ na tempo migracji i przenikania radonu do atmosfery. Ze względu na krótki okres połowicznego zaniku radonu, najistotniejsza jest warstwa skał zalegających na głębokościach nieprzekraczających kilka-kilkadziesiąt metrów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy prawdopodobnych mechanizmów migracji radonu w różnych typach ośrodków skalnych, opracowano dwa typowe schematy przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Migracja i przenikanie radonu do atmosfery z wychodni utworów karbońskich (a) i triasowych (b)

Fig. 5. Migration and penetration of radon to the atmosphere from outcrops of Carboniferous (a) and Triassic (b) formations

Praktyka potwierdza, że eksploatacja górnicza uaktywnia strefy tektoniczne, będące źródłem wstrząsów. Szczeliny uskoków powstałych w odległych epokach geologicznych są uszczelnione i zakolmatowane materiałem ilastym, gruzem i brekcją i na ogół nie pełnią roli uprzywilejowanych dróg migracji gazów. Jednak naprężenia w górotworze powstające w wyniku eksploatacji powodują naruszenie i rozluźnienie skał i powstanie zespołu spękań i szczelin oraz dezintegrację górotworu, co powoduje uwalnianie i migrację nie tylko metanu, ale prawdopodobnie również radonu. Według

Kidybińskiego [11], lokalna strefa osłabienia skał wokół uskoku o zrzućcie kilkudziesięciu metrów, w niektórych przypadkach może mieć zasięg do 20 metrów po obu jego stronach. Dezintegracja skał sprawia, że powierzchnia, z której może następować ekshalacja radonu jest znaczna, a uwolniony z przestrzeni międzyziarnowych radon wędruje ku powierzchni nowo powstałymi drogami. Dowodzą tego wyniki własne [26] pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym, a także badania prowadzone przez Wołkowicza [informacja prywatna]. Fakt, że obszar Zagłębia Górnośląskiego jest zdrenowany i osuszony, a wypełnianie pustek i nowo powstających rozwarć przebiega powoli, sprawia, że współcześnie powstające szczeliny i rozluźnienia stają się drożne dla wody i gazów, w tym radonu.

Występowanie deformacji powierzchni powodowanych działalnością górnictwem, sprzyja wzrostowi ryzyka radonowego w budynkach. Jak wiadomo, przez ponad 200 lat na Górnym Śląsku eksploatowano rudy metali i węgla, stosując głównie system zabierkowy z zawałem stropu. Efektem działalności górniczej są liczne niepodsadzone pustki. Skały nadległe, pod wpływem czynników naturalnych i w wyniku działalności gospodarczej na powierzchni (budownictwo, komunikacja) oraz pod ziemią (wybieranie niżej leżących pokładów), ulegają systematycznemu osłabieniu [7]. Prowadzi to do ich załamywania i w konsekwencji do powstawania deformacji nieciągłych na powierzchni, takich jak leje i rowy zapadliskowe czy szczeliny oraz progi. Inny rodzaj deformacji powierzchni to niecki osiadania. Naukowcy niemieccy zaobserwowali [10], że wyraźnie wyższe stężenia radonu w glebie mierzone są w stosunkowo wąskim pasie pokrywającym się z granicami zapadliska powstałego nad pustką eksploatacyjną. Bywa, że deformacja taka ma znaczny promień oddziaływania i granice zapadliska są oddalone od pustki eksploatacyjnej, która je spowodowała. Oznacza to, że domy narażone na występowanie podwyższonych stężeń radonu mogą również znajdować się w znacznych odległościach od pustek poeksploatacyjnych i nie leżeć bezpośrednio nad obszarem, w obrębie którego prowadzona jest działalność górnicza. Taki przypadek stanowi jedno z osiedli w Piekarach Śląskich.

Skały osłabione w wyniku osiadania podłoża są podatniejsze na działanie czynników powodujących erozję przypowierzchniową, co sprawia, że oddziałuje ona na znacznych głębokościach. Wzajemne nakładanie się różnych procesów fizycznych i chemicznych powoduje dalsze niszczenie struktury skał i powstawanie pustek, spękań i szczelin umożliwiających migrację gazów radonu. Ponadto osiadania powierzchni przyczyniają się do obniżenia poziomu wód gruntowych, co dodatkowo ułatwia migrację radonu.

Kolejnym zjawiskiem sprzyjającym migracji gazów jest współczesny rozwój procesów krasowych, wywołanych przez wpływy eksploatacji górniczej zarówno dawnej, jak i współczesnej [29]. Procesy fizyczne i chemiczne powodujące odnowienie krasu szczególnie intensywnie zachodzą w środowisku skał węglanowych. Bezpośrednie przyczyny tego zjawiska to: osiadanie terenu na skutek działalności górniczej, zmiany w sytuacji hydrogeologicznej, wzrost liczby nowych wyrobisk pogórnich. Stare, zapadnięte i zaciśnięte szyby, sztolnie i inne wyrobiska górnicze są obszarami szczególnie podatnymi na procesy krasowienia, gdyż wokół nich powstają liczne spękania i szczeliny, będące potencjalnymi drogami infiltracji wód.

Zapadliska i niecki osiadań będące efektem współczesnej działalności górniczej wzmagają krążenie wód i ich działanie sufozyjne. W wielu miejscach Europy obszary krasowe są obszarami wysokiego ryzyka radonowego. Klasycznymi przykładami są Węgry i Szwajcaria. Na terenie GZW w obszarach, w których procesy krasowe rzeźbiły i modelowały węglanowe osady triasu w przeszłych epokach geologicznych i gdzie współcześnie następuje ich odnowienie, można się również spodziewać zwiększonego ryzyka radonowego.

Biorąc pod uwagę opisane powyżej czynniki kształtujące mechanizm powstawania, migracji i przenikania do atmosfery radonu stwierdzono, że podwyższonego potencjału radonowego, w rejonie Górnego Śląska, można spodziewać się w:

- strefach uskokowych naruszonych działalnością górniczą,
- obszarach deformacji powierzchni w miejscach płytko zalegających pustek,
- miejscach, w których rozwijają się współczesne zjawiska krasowe,
- szybach likwidowanych kopalń.

7. WNIOSKI

Na podstawie wyników długoterminowych pomiarów stężeń radonu w budynkach mieszkalnych na obszarze GZW ustalono, że średnie stężenie tego gazu w pomieszczeniach na parterach wynosi 46 Bq/m^3 i nie odbiega od wartości średniej dla obszaru całej Polski, jak również od średniej światowej.

Stwierdzono jednoznacznie, że rozkład stężeń radonu w domach na obszarze GZW nie jest równomierny i wykazuje wyraźny związek z regionalną budową geologiczną. Niższe koncentracje radonu występują w rejonie, w którym nad osadami starszymi zalega warstwa miocenijskich osadów trzeciorzędowych o znacznej miąższości, wyższe koncentracje radonu mierzono w tej części Górnego Śląska, w której nie występuje pokrywa izolujących utworów ilastych miocenu.

Ustalono, że występuje wyraźna zależność poziomu stężenia radonu od lokalnych warunków geologicznych. Najwyższe stężenia radonu stwierdzono w budynkach posadowionych w obszarach wychodni utworów triasowych, a w szczególności dolomitów diploporowych wapienia muszlowego środkowego oraz dolomitów kruszczośnych i wapieni gogolińskich dolnego wapienia muszlowego. Najniższe stężenia radonu mierzono w budynkach posadowionych na grubych warstwach osadów czwartorzędowych. Utwory triasowe, w obrębie których następowały najwyższe stężenia radonu w budynkach, charakteryzują się znacznym zaburzeniem struktury, zwłaszcza w warstwie przystropowej, czego konsekwencją jest rozluźnienie skał i zwiększona ich powierzchnia czynna, ułatwiająca ekshalację radonu. Podwyższone stężenia radonu stwierdzono ponadto w strefach uskokowych, zaburzających strukturę warstw przystropowych.

Analiza wyników pomiaru stężenia radonu w budynkach na tle sytuacji górniczej wskazuje na istnienie kilku wyraźnych i istotnych relacji między podwyższonym potencjałem radonowym a działalnością górniczą. Podwyższone stężenia radonu w domach stwierdzono w obszarach płytkiej eksploatacji złóż rudy, czy też pokładów węgla. W rejonach o intensywnej eksploatacji górniczej i występowaniu znaczących

deformacji górotworu również obserwuje się wyższy poziom stężeń radonu w budynkach, spowodowany ułatwioną emisją i migracją radonu wskutek naruszenia spoiwości gruntów, a także możliwych naruszeń budynków. Może zachodzić wzmocnienie efektów ekshalacji, a tym samym występowanie wyższych stężeń radonu, wskutek pokrywania się rejonów płytkiej eksploatacji rudnej i głębokiej eksploatacji pokładów węgla (efekt reaktywacji starych, płytkich zrobów eksploatacji rudnej).

Rejonami o potencjalnie podwyższonym ryzyku radonowym są obszary Niecki Bytomskiej i Niecki Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej, w obrębie których lokalne warunki geologiczne i skutki działalności górniczej szczególnie ułatwiają emisję i migrację radonu.

Literatura

1. Akerblom G.: *Investigation on mapping of risk areas*. Luella Sweden, Swedish Geol. Copm. Raport IRAP 1986, 86036.
2. *Atlas Geologiczny Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, cz. III: *Mapy Geologiczno-Strukturalne*, skala 1:100 000. Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny 1994.
3. Barnet I.: *Radon Risk Mapping and Geological Aspects*. Proc. of Training Course on Radon Indoor Risk and Remedial Actions. Stockholm, SSI 1995.
4. 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 (National Technical Information Service, Springfield, Virginia) 1981.
5. Evans R.D.: *An engineer's guide to the elementary behaviour of rado daughters*. Health Physics 1969 Vol. 17.
6. Galkiewicz T.: *Prawidłowości wykształcenia śląsko-krakowskich złóż cynkowo-olowiowych*. Prace Geologiczne nr 125. Warszawa, Wydaw. Geologiczne 1983.
7. Goszcz A., Surowiec Z., Kotyrba A., Forys T.: *Analiza metod i możliwości oceny oraz sposoby zwalczania zagrożenia powierzchni ze strony płytko zalegających pustek*. Prace Głównego Instytutu Górnicztwa Nr 763. Katowice, GIG 1991.
8. Josien J.P., Pineau J.F., Syrek B., Wysocka M., Zettwoog P.: *Study on radon-in-soil signals obtained in Polish coalmine; correlations with tremors and rockbursts*. Proc. of Int. Conf. Technologically Enhanced Natural Radiation Caused by Non-uranium Mining. Katowice, GIG 1996.
9. Kaziuk H.: *Wpływ czynników geologicznych i prowadzonej eksploatacji górniczej węgla kamiennego na metanowość pokładów*. Materiały konferencyjne nt. Zagrożenia metanowe w górnictwie. Katowice, GIG 1994.
10. Kemski J., Klingel R.: *Influence of underground mining on the geogenic radon potential*. Proc. of Workshop Radon in the Living Environment. Ateny, NTUA 1999.
11. Kidybiński A.: *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice, Wydaw. „Śląsk” 1982.
12. Kotyrba A. i inni: *Projekt prac badawczych dla określenia zagrożeń zapadliskowych w rejonach płytkiej eksploatacji węgla kamiennego i rud cynkowo-olowiowych na terenie województwa katowickiego wraz z Atlasem zagrożeń zapadliskowych w rejonach płytkiego kopalnictwa rud cynkowo-olowianych i węgla kamiennego w obszarze województwa katowickiego*. Warszawa, Min. Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa 1998.
13. Kotyrba A., Michalak J., Kortas Ł., Braszczak A.: *Wyniki badań geofizycznych podłoża w wytypowanych rejonach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Piekary Śląskie, Jaworzno)*. Sosnowiec, PTNoZ 2001.

14. Kwiatek J. i inni: *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 1997.
15. Lebecka J., Skowronek J., Skubacz K., Tomza I., Michalik B., Chałupnik S.: *Raport o stanie narażenia górników kopalń węgla kamiennego na działanie pochodnych radonu*. Dokumentacja GIG nr 12.6.16.01/N15/83/B2/2. Katowice 1985 (niepublikowana).
16. Lebecka J., Goszcz A., Lebecki K., Kobiela Z., Mnich K.: *Metody radiometryczne w badaniach wyrzutów i tapani*. Zeszyty Naukowe AGH nr 1218, Geofizyka Stosowana z. 1. Kraków 1988.
17. *NAS/NRC, Comperative Dosimetry of Radon in Mines and Homes*. Washington, D.C. National Academy of Science/National Research Council 1991.
18. *National Council on Radiation Protection and Measurements. Measurements of Radon and Radon Daughters in Air*. NCRP Report No. 97. Bethesda, MD 1988.
19. Nazaroff W.W., Nero A.V. (eds): *Radon and its decay products in indoor air*. New York, John Wiley&Sons, Inc. 1988.
20. Pawłowska J., Szuwarzyński M.: *Procesy sedymentacyjne i diagenetyczne w skałach zawierających złoża cynku i ołowiu w trzebionce*. Prace Instytutu Geologicznego XCV, Badania Genezy Złóż Cynku i Ołowiu na Górnym Śląsku. Warszawa 1979.
21. *Radiologiczny Atlas Polski*. Warszawa, Biblioteka Monitoringu Środowiska 1998.
22. Sass-Gustkiewicz M.: *Górnośląskie złoża rud Zn-Pb w świetle migracji roztworów mineralizujących*. Zeszyty Naukowe AGH, Geologia nr 31. Kraków 1985.
23. Skowronek J., Wysocka M., Mielnikow A.: *Radon hazard in Upper Silesian Region*. Proc. of Workshop Radon in the Living Environment. Ateny, NTUA 1999.
24. *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, arkusze: Katowice, Zabrze, Wojkowice, Rybnik, Gliwice, Bytom, Rydułtowy, Jaworzno*, skala 1:50 000, Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny 1954–1957, 1991.
25. Tsivoglou E.C., Ayer H.E., Holady D.A.: *Occurence of non-equilibrium atmospheric mixtures of radon and its daughters*. Nucleonics 1953 Vol. 11(9).
26. Wysocka M. i inni: *Changes of Radon Concentration in Soli Gas over Some Main Faults in Upper Silesia Coal Basin*. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 1999 M-22 (310).
27. Wysocka M., Mielnikow A., Chałupnik S.: *Radon in houses of the Upper Silesian Coal Basin*. Proc. of the 7th Tohwa University International Symposium Radon and Thoron in the Human Environment. Singapore, World Scientific 1998.
28. Wysocka M., Skowronek J.: *Analysis of the natural radioactivity of coal from the Upper Silesian Coal Basin. Aspects of geological structure*. Proc. of an International Symposium on Nuclear Techniques in the Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources. Wiedeń, International Atomic Energy Agency 1991.
29. Życzyński H.: *Rozwój krasu pod wpływem górnictwa na Górnym Śląsku*, W: *Przeobrażenia środowiska geograficznego w obszarach uprzemysłowionych i zurbanizowanych*. Materiały Sympozjum Polsko-Czechosłowackiego (red. J. Trembaczowski). Katowice, Uniwersytet Śląski 1980.

Recenzent: dr inż. Jan Skowronek