

Wielokryterialna analiza czynników kształtujących ryzyko radonowe na terenach górniczych

Data wpłynięcia do Redakcji: 04/2024
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 05/2024

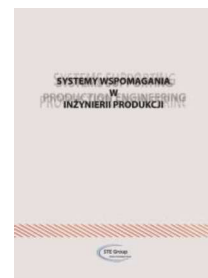
2024, volume 13, issue 2, pp. 135-144

Sandra Nowak
Główny Instytut Górnictwa, Poland

Małgorzata Wysocka
Główny Instytut Górnictwa, Poland

Stefan Czerwiński
Poland

Andrzej Chmiela
Spółka Restrukturyzacji Kopalń S.A. Poland



Streszczenie: W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zakończyła działalność wydobywczą znaczna część podziemnych kopalń węgla kamiennego. Zamykanie kopalń spowodowane było z jednej strony wyczerpywaniem się złóż, z drugiej strony przemianami społeczno gospodarczymi. W obszarach pogórnicznych obserwowane są skutki wieloletniej eksploatacji węgla kamiennego, powodujące między innymi dezintegrację środowiska geologicznego oraz zaburzenia hydrologiczne. Jednym z zagrożeń jest związane z migracją promieniotwórczego gazu, radonu, który może wnikać do budynków mieszkalnych oraz pomieszczeń będących miejscami pracy. Radon jest promieniotwórczym gazem szlachetnym, mogącym przyczyniać się do zwiększonego ryzyka zachorowania na raka płuc i górnych dróg oddechowych. W pracy przedstawiono idę szacowania ryzyka wystąpienia podwyższonych stężeń radonu w oparciu o analizę wieloczynnikową, uwzględniającą zagrożenia powodowane działalnością górnictwem oraz naturalne i techniczne.

Słowa kluczowe: zamknięte kopalnie węgla, stężenie radonu w budynkach, migracja radonu, ryzyko radonowe, ocena zagrożenia radonowego

WSTĘP

Radon jest gazem szlachetnym, powszechnie występującym w środowisku naturalnym. Powstaje w wyniku rozpadu jego izotopu macierzystego – radu. Radon, przenikając do budynków, może stwarzać zagrożenie, dla mieszkańców lub pracowników. Wieloletnia ekspozycja na podwyższone stężenia radonu może powodować zwiększone ryzyko zachorowania na nowotwory płuc i górnych dróg oddechowych [1, 2, 3, 4,]. Głównym źródłem radonu są skały budujące podłoże. Fizyczne właściwości podłoża, a przede wszystkim te, które determinują przepuszczalność, powodują że migracja gazów jest ułatwiona lub przeciwnie, ograniczona. W przypadku łatwej migracji radonu, może on, niekiedy wspólnie z innymi gazami (metan, CO₂) wnikać do budynków. Miejsca transportu gazów do wnętrza, to nieszczelności w fundamentach, spękania ścian i kanałów technicznych, połączenia elementów technicznych, przestrzenie wokół różnego typu instalacji (rys. 1a i 1b).



Rys. 1a Przykład uszkodzeń budynku, 1b Przykład zapadliska na terenie pogórnym

Środowisko geologiczne zagłębia węglowego, silnie zmienione w wyniku wieloletniej eksploatacji, sprzyja migracji gazów, w tym radonu. Czynnikiem powodującym zmiany w górotworze są efekty działalności historycznej, to jest płytkiej eksploatacji surowców mineralnych, takich, jak rudy srebra, cynku i ołowiu. Współczesna eksploatacja węgla kamiennego powodowała narastanie dezintegracji górotworu, w wyniku wydobywania kolejnych pokładów węgla, budowania szybów i innych połączeń z powierzchnią. Techniki wydobywania węgla i sposoby likwidowania kopalń również mogą mieć istotny wpływ na kształtowanie ryzyka radonowego. Poza naruszeniem górotworu, górnictwo powoduje występowanie szeregu innych zagrożeń, takich jak powstawanie niecek, zapadlisk, zalewisk, zjawisk sejsmicznych, a nawet reaktywacji starych struktur tektonicznych. Wymienione wyżej zjawiska mogą mieć wpływ na tempo migracji radonu, a co za tym idzie na skalę ryzyka radonowego. W Europie, w krajach, w których kopalnie węgla kamiennego zlikwidowano kilkadziesiąt lat temu, wciąż obserwowane są skutki eksploatacji prowadzonej w XIX i XX wieku. Zauważono, że zagrożenia, zarówno naturalne, jak i wynikające z historycznej działalności wydobywczej, mogą się wzajemnie wzmacniać i potęgować obciążenia dla środowiska i mieszkańców terenów pogórnym. Podejmowane są prace, których celem jest analiza poszczególnych zagrożeń w oparciu o analizę wzajemnych zależności [5, 6]. Również w Polsce podejmowane są tematy i projekty skupione na wieloletnich obserwacjach zagrożeń generowanych przez wciąż aktywne i zamykane kopalnie węgla kamiennego [7, 8]. Od wielu lat prowadzone są również badania stężenia i migracji radonu w powiązaniu z budową geologiczną i innymi czynnikami, powodowanymi działalnością górniczą [9, 10]. Podejmowanie badań prowadzących do określenia potencjału radonowego wybranych obszarów wynikało ze świadomości zdrowotnych skutków ekspozycji na radon i produkty jego rozpadu. Zgodnie z przekazem Światowej Organizacji Zdrowia na temat radonu w pomieszczeniach, przyjmuje się, że cyt. „Nawet pojedyncza cząsteczka alfa może spowodować poważne

uszkodzenie genetyczne komórki, dlatego możliwe jest, że uszkodzenie DNA związane z radonem może wystąpić na każdym poziomie narażenia” [1]. W roku 2013 zaczęła obowiązywać Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 r. [11] ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w zakresie ochrony przed zagrożeniami związanymi z promieniowaniem jonizującym, która koncentruje się w szczególności na kwestiach związanych z narażeniem na radon. W Polsce, od roku 2020 obowiązuje Rozporządzenie Ministra Zdrowia, obligujące pracodawców ze wskazanych w niniejszym Rozporządzeniu obszarów do wykonania pomiarów średniorocznego stężenia radonu w pomieszczeniach w piwnicach i na parterach budynków [12]. Obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) nie został wskazany, jako obszar podwyższonego ryzyka radonowego. Mimo to, od lat prowadzone są pomiary i szacowane są dawki dla mieszkańców i innych użytkowników budynków zlokalizowanych na terenach pogórnicych [13]. Wyniki dotychczasowych badań pokazują, że mieszkańcy GZW mogą być narażeni na dawki porównywalne z tymi, jaki otrzymują górnicy funkcjonujących kopalń.

Badania prowadzone w obszarze GZW oraz doniesienia literaturowe z różnych obszarów świata pokazują istotną zmienność przestrzenną stężeń radonu zarówno w powietrzu glebowym, jak i w budynkach [13, 14, 15]. Zjawisko to wynika przede wszystkim ze specyficznych właściwości tego izotopu, to jest krótki czas połowicznego zaniku wynoszący 3,8 dnia i związaną z tym ograniczoną możliwością migracji na dłuższych dystansach [16]. Ponadto, głównym czynnikiem determinującym obecność radonu w powietrzu glebowym, a następnie w budynkach, są właściwości skał budujących podłoże. Ze względu na znaczną zmienność przestrzenną stężeń radonu w budynkach, pomiary powinny być prowadzone w jak najgęstszej siatce. W terenach bardzo silnie zmienionych antropogenicznie, migrację radonu determinują zmiany środowiska geologicznego (pustki, szyby) oraz współwystępowanie różnych zagrożeń naturalnych i technicznych.

MATERIAŁY I METODA

GZW charakteryzuje się dużą komplikacją środowiska geologicznego i wielowiekową eksploatacją surowców mineralnych. Część kopalń wciąż eksploatuje dostępne, na coraz większych głębokościach, pokłady węgla kamiennego. Znaczna liczba zakładów górniczych została zlikwidowana. Sposoby i tempo likwidacji wynikały ze specyficznych warunków i potrzeb. W obszarze GZW występują liczne zagrożenia i ryzyka, będące skutkami wydobywania węgla kamiennego i innych surowców mineralnych. Najistotniejsze to osiadania, obniżenia, indukowana sejsmiczność, deformacje nieciągłe – zapadliska (rys. 1b) i szczeliny, zanieczyszczenia środowiska, zaburzenia hydrologiczne, zalewiska, emisja gazów, w tym radonu, zagrzewanie i zapożarowanie hałd i inne. Budynki w miejscach szczególnie narażonych na deformacje terenu ulegają licznym zniszczeniom (rys. 1a).

W wielu przypadkach, między zagrożeniami występują interakcje – jedno ze zjawisk, powoduje nasilenie innego. W ramach projektu POMHAZ, opracowano macierz interakcji najważniejszych zagrożeń na terenach pogórnich – tab. 1. Zaproponowane poziomy interakcji bazują na doświadczeniach i wiedzy eksperckiej i odnoszą się do analizowanego obszaru, to jest GZW.

Tabela 1 Tabela interakcji najważniejszych zagrożeń występujących na terenach górniczych i pogórnich

ZAGROŻENIA PIERWOTNE		ZAGROŻENIA WTÓRNE														
		Zagrożenia naturalne			Zagrożenia górnicze											Zagr. techniczne
		NF	DR	RF	SU	SE	IS	SI	CR	EP	FL	RE	GE	LA	SC	RG
Zagr. naturalne	NF				W	N	N	W		W	W	N	N	W	W	
	DR							S	W	W	W	N	N	W	W	
	RF			S	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	
Zagrożenia górnicze	SU								W	W	W	W	W	W	W	
	SE														W	
	IS				W										W	
	SI							S							W	
	CR								W						W	
	EP									W					W	
	FL				W				W						W	
	RE														W	
	GE														W	
	LA				W					W					W	
SC				W					W					W		
Zagr. Techniczne	RG									W				W	W	

Legenda: Poziomy interakcji: Wysoki; Średni; Niski; Brak (biały)

NF – powódzie; DR-susze; RF-gwałtowne deszcze; SU-osiadania; SE-obniżenia; IS-sejsmiczność indukowana; SI-zapadliska; CR szczeliny; EP-zanieczyszczenia środowiska; FL- zalewiska; RE-emisja radonu; GE-emisja gazów; LA-osuwiska; SC-samozgrzewanie hałd; RG-emisja gazów z hałd

Prezentowana praca odnosi się do jednego z zagrożeń, występujących na terenach górniczych GZW – wzmożonej emisji radonu. Dokonano poszerzonej analizy czynników mających wpływ na migrację tego gazu. Uwzględniono kryteria i szczegółowy podział różnych czynników determinujących emisję radonu. Przeanalizowano dostępne dane i dokumenty, na podstawie których można jak najdokładniej opisać środowisko geologiczne i skutki działalności górniczej obszaru zainteresowania. Najistotniejsze źródła informacji i danych to zasoby archiwum Wyższego Urzędu Górniczego, mapy geologiczne udostępniane przez Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, plany likwidacji zakładów górniczych plany rozwoju przestrzennego miast i inne. Ponadto ogólnie dostępne klasyfikacje np. dotyczące przepuszczalności gruntów i skał [17], przydatności terenów do zagospodarowania [18].

Zdecydowano, że do szacowania zagrożenia radonowego należy przyjąć czynniki determinujące ryzyko radonowe pogrupowane według następujących kryteriów:

- Kryterium dotyczące obecności radonu w powietrzu glebowym;
- Kryterium górnicze;
- Kryterium geologiczne;
- Kryterium środowiskowe.

Oceniano istotność każdego z kryteriów, przyjmując ustalone przepisami lub określone arbitralnie zakresy wartości i limity. Sposób określania istotności kryteriów polegał na wiedzy i doświadczeniu ekspertów.

Kryterium dotyczące obecności radonu w powietrzu glebowym

Stężenie radonu w powietrzu glebowym jest czynnikiem istotnie wpływającym na jego koncentracje w budynkach mieszkalnych. Oczywiście parametry fizyczne podłoża, decydują o możliwości jego migracji, gdyż ułatwiają lub utrudniają wędrówkę gazów. Jednak dla szacowania ryzyka radonowego zakładamy, że im wyższe stężenie radonu w powietrzu glebowym, tym wyższe prawdopodobieństwo podwyższonego ryzyka radonowego w analizowanym obszarze. Oczywiście najdokładniejszą informację daje pomiar terenowy. Jeśli nie możemy wykonać pomiaru w terenie, wykorzystujemy bazy danych np. GIG-PIB lub PIG-PIB. Wartości stężenia radonu w powietrzu glebowym otrzymały oceny istotności w przedziałach przedstawionych w tabeli 2.

Tabela 2 Stężenie radonu w powietrzu glebowym, istotność dla poszczególnych zakresów

Stężenie radonu [kBq/m ³]	Istotność
> 30 kBq/m ³	bardzo duża
30-20 kBq/m ³	duża
20-10 kBq/m ³	średnia
< 10kBq/m ³	mała

Przepuszczalność gruntów i skał podłoża, to kolejny czynnik kształtujący migracje radonu. W podłożu spękanym, kawernistym, luźnym gazy łatwiej migrują ku powierzchni. Możliwe jest zjawisko współtransportu metanu, dwutlenku węgla i radonu.

Przyjęto 2 możliwości oceny przepuszczalności. Pierwsza propozycja to bezpośredni pomiar, np. urządzeniem JOK, czeskiej firmy RADON. Istotności przypisano poszczególnym przedziałom wartości współczynnika przepuszczalności k , co przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3 Przepuszczalność podłoża, istotność dla poszczególnych zakresów wartości współczynnika k

Współczynnik k [m ²]	Istotność
$k > 4.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$	duża
$4.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 > k > \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$	średnia
$k < 4.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$	mała

W przypadku braku danych pomiarowych zaproponowano podział utworów skalnych według własności filtracyjnych według Z. Pazdry [17] – tabela 4.

Tabela 4 Współczynniki przepuszczalności K dla poszczególnych rodzajów utworów geologicznych

Rodzaj utworów	Współczynnik K [darcy]	Istotność
Skąły bardzo dobrze przepuszczalne: rumosze, żwiry, pospółki, piaski gruboziarniste i inne	> 100	bardzo duża
Skąły dobrze przepuszczalne: piaski gruboziarniste, nieco gliniaste, piaski różnoziarniste i średnioziarniste, słabo spojone gruboziarniste piaskowce, skały masywne z gęstą siecią szczelin	10-100	duża
Skąły średnio przepuszczalne: piaski drobnoziarniste, równomiernie uziarnione, less	1-10	średnia
Skąły słabo przepuszczalne: piaski pylaste, gliniaste, muły, piaskowce, skały masywne z rzadką siecią drobnych spękań	0,1-1	mała
Skąły półprzepuszczalne: gliny, namuły, mułowce, ily piaszczyste	0,001-0 0,1	nieistotne
Skąły nieprzepuszczalne: ily, iłołupki, gliny zwięzłe, margle ilaste, skały masywne niespękanne	< 0,001	nieistotne

Kryterium górnicze

W obszarach historycznej i współczesnej eksploatacji surowców mineralnych, środowisko geologiczne podlegało wielu presjom, dezintegracji i przekształceniom. W kryterium górniczym starano się zawrzeć te czynniki, które wynikają z działalności górniczej i mogą mieć wpływ na kształtowanie się ryzyka radonowego.

Najistotniejszy czynnik tego kryterium to obecność płytkiej eksploatacji w analizowanych obszarach [19]. W obszarze GZW istnieją pozostałości płytkiej eksploatacji rud srebra, cynku i ołowiu. Na tę działalność, sięgającą swoimi początkami XVI w nakładała się eksploatacja węgla kamiennego: systemem upadowych i płytkich szybików kopano węgiel z pokładów, tworzących wychodnie na powierzchni. W kolejnych latach eksploatacja schodziła w głąb do pokładów kolejnych serii karbońskich. Zaproponowane istotności tego czynnika, to jest obecności płytkiej eksploatacji, głębokiej eksploatacji lub ich nakładaniem się przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5 Głębokość eksploatacji: płytka/głęboka

Głębokość eksploatacji	Istotność
Zarówno płytka, jak i głęboka	duża
Tylko płytka historyczna (do 100 m)	średnia
tylko głęboka współczesna (>100m)	mała

Kolejnym rozważanym czynnikiem jest obecność szybów i otworów wiertniczych, szczególnie mających połączenie z powierzchnią. Jeśli możliwe, należy rozważyć warunki likwidacji szybów i otworów, sposób kolmatowania i inne elementy, mające wpływ na migracje gazów w rurze szybowej, lub wokół zakolmatowanego szybu. Propozycję podziałów i przypisaną istotność przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6 Obecność szybów i otworów wiertniczych

Liczba szybów/otworów wiertniczych	Istotność
Liczne, niekolmatowane	duża
Pomiędzy 30-15	średnia
< 15	mała
0	nieistotne

W kategorii kryterium górniczego ponadto uznano za ważne czynniki takie jak sposób eksploatacji pokładów, miąższość i krotność wybranych pokładów (tab. 7).

Tabela 7 Sposób eksploatacji, Miąższość pokładów, Krotność wybranych pokładów

Sposób eksploatacji	Istotność	Miąższość [m]	Istotność	Krotność	Istotność
Bez podsadzki	duża	> 30	duża	> 3	duża
Z podsadzką	średnia	30-15	średnia	2	średnia
		< 15	mała	1	mała

Kryterium geologiczne

Analizując wpływ budowy geologicznej GZW na migracje radonu uznano, że najważniejsze czynniki to miąższość osadów czwartorzędowych (tab.8), wykształcenie litologiczne osadów triasowych i karbońskich (tab.9).

Tabela 8 Miąższość osadów czwartorzędowych

Miąższość [m]	Istotność
0	bardzo duża
0-2 m	duża
2-5 m	średnia
> 5 m	mała

Tabela 9 Litologia triasu i karbonu

Warstwa geologiczna	Istotność
T śr. Dolomity kruszconośne	bardzo duża
T śr. Dolomity diploporowe	bardzo duża
T śr. Wapienie gogolińskie	duża
Plejstocen, piaski i żwiry lodowcowe	duża
T górny wapienie gruboławicowe	średnia
Piaskowce i łupki – wkładki węgla karbonu górnego	mała

Kryterium środowiskowe

Pod tym kryterium rozumiano określenie przydatności terenów pod zabudowę, ze względu na występowanie szkód górniczych. Waga tego kryterium wynika z faktu, że wszelkie uszkodzenia i nieszczelności w strukturze budynku otwierają drogi migracji i wnikania gazów, w tym radonu. Oceniając istotność przydatności terenów pod zabudowę postąpiono zgodnie z [18] – tabela 10.

Tabela 10 Przydatność terenów pod zabudowę

Kategoria	Istotność
Kategoria C nienadające się do zabudowy (prawdopodobieństwo wystąpienia nieciągłych przemieszczeń (szczelin, zapadlisk)	bardzo duża
Kategoria B3 przydatne (wymagane poważne zabezpieczenia obiektów)	bardzo duża
Kategoria B2 przydatne (wymagane zabezpieczenia obiektów)	duża
Kategoria B1 przydatne (uszkodzenia łatwe do usunięcia)	średnia
Kategoria A przydatne (małe, nieszkodliwe uszkodzenia)	mała
Kategoria przydatne	nieistotne

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono propozycję macierzy interakcji pomiędzy zagrożeniami, występującymi na terenach pogórnich, która została opracowana w ramach realizacji jednego z zadań projektu POMHAZ. Stwierdzono, że zagrożenie wzmożoną emisją radonu nie wpływa na inne zagrożenia. Natomiast szereg zidentyfikowanych w macierzy zagrożeń, może intensyfikować zagrożenie radonowe. Najbardziej istotna jest obecność deformacji nieciągłych, takich jak zapadliska i szczeliny.

Szczególną uwagę poświęcono analizie czynników górniczych, geologicznych, środowiskowych, determinujących migrację gazów, w tym radonu. Zaproponowano zestaw kryteriów i ocenę istotności każdego z nich, przyjmując ustalone przepisami lub określone arbitralnie zakresy wartości i limity. Sposób określania istotności kryteriów polegał na wiedzy i doświadczeniu ekspertów. Kolejnym etapem pracy będzie stworzenie prostego narzędzia, pozwalającego na klasyfikację terenów pod względem ryzyka radonowego. Teoretyczne założenia przedstawione w pracy będą zweryfikowane na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, to jest stężenia radonu w budynkach, przepuszczalności gruntu, zawartości radonu w powietrzu glebowym oraz pełnym opisie sytuacji geologicznej i górniczej w wybranej lokalizacji. Celem wszystkich dotychczasowych i przyszłych działań jest stworzenie siatki z wyszacowanymi poziomami stężenia radonu i wyznaczenie izolinii, będących podstawą mapy prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka radonowego.

Niniejsza praca została opublikowana w ramach realizacji międzynarodowego projektu „Kompleksowa ocena zagrożeń na terenach pogórnich dla potrzeb planowania przestrzennego”, współfinansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali, na podstawie umowy nr 101057326 – POMHAZ oraz Ministerstwo Edukacji i Nauki, na podstawie umowy nr 5270/FBWiS/2022/2023/2 z dnia 25/04/2023.

LITERATURA

- [1] Zeeb H., Shannoun F.: WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective; World Health Organization: Geneva, Switzerland, (2009). Dostęp: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44149> (23.03.2022).
- [2] Copes R., Scott J.: Radon exposure: Can we make a difference?. Can. Med. Assoc. J. (2007), 177, 1229–1231.

- [3] US Environmental Protection Agency. News Releases—Air. EPA Joins Global Call-to-Action on Radon Cancer Dangers 09/21/2009. (2009). <http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/6424ac1caa800aab85257359003f5337/8575b629701ce77b85257638005ef218!OpenDocumentexternalicon> [23.04.2010].
- [4] US Environmental Protection Agency. News Releases by State. Radon Action Could Save Many Lives 01/07/2009. <http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/8b770facf5edf> [23.04.2010].
- [5] Djizanne H., Alheib M., Gouzy A., Franck C.: Development of post-mining multi-hazard assessment methodology. 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium. Schubert & Kluckner (eds.) © ÖGG. 2023.
- [6] Al Heib M.M., Franck C., Djizanne H., Degas M.: Post-Mining Multi-Hazard Assessment for Sustainable Development. *Sustainability* (2023), 15, 8139. <https://doi.org/10.3390/su15108139>.
- [7] Krzemień A., Sánchez A.S., Fernández P.R., Zimmermann K., Coto F.G.: Towards sustainability in underground coal mine closure contexts: A methodology proposal for environmental risk management. *Journal of Cleaner Production* 139, (2016), pp. 1044-1056.
- [8] Duda A, Krzemień A.: Forecast of methane emission from closed underground coal mines exploited by longwall mining—a case study of Anna coal mine. *Journal of Sustainable Mining* 17 (4), (2018), pp. 184-194.
- [9] Wysocka M.: Radon problems in mining and post-mining areas in Upper Silesia region, Poland. *Nukleonika* (2016), 61, 307–313.
- [10] Wysocka M., Chałupnik S.: Correlation of radon concentration level with mining and geological conditions in Upper Silesia region. *J. Min. Sci.* (2003), 39.
- [11] Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom.
- [12] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia [Dz.U. 2020 poz. 1139].
- [13] Wysocka M., Nowak S., Chałupnik S., Bonczyk M.: Radon Concentrations in Dwellings in the Mining Area-Are There Observed Effects of the Coal Mine Closure?. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, (2022), 19, 5214. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095214>
- [14] Ivanova K., Stojanovska Z., Djunakova D., Djounova J.: Analysis of the spatial distribution of the indoor radon concentration in school's buildings in Plovdiv province, Bulgaria. *Building and Environment* 204 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108122>.
- [15] Madureira J., Paciencia I., Rufo J., Moreira A., de Oliveira Fernandes E., Pereira A.: Radon in indoor air of primary schools: determinant factors, their variability and effective dose. *Environ Geochem Health* (2016) 38:523–533, DOI 10.1007/s10653-015-9737-5
- [16] Nazaroff W.W., Nero A.V.: Radon and its decay products in indoor air. New York, John Wiley&Sons, Inc. (1988).
- [17] Kowalski J.: Hydrogeologia z podstawami geologii. Wyd. AR we Wrocławiu, 1998.
- [18] Zasady dokumentowania warunków geologiczno--inżynierskich dla celów likwidacji kopalń (poradnik metodyczny). Warszawa, Ministerstwo Środowiska. 2009.

- [19] Wysocka M., Kozłowska B., Dorda J., Kłos B., Chmielewska I., Rubin J., Karpińska M.: Annual observations of radon activity concentrations in dwellings of Silesian Voivodeship. *Nukleonika*, (2010), 55, 369–375.

Multi-criteria analysis of factors forming radon risk in mining areas

Abstract: Over the last few decades, a significant number of underground hard coal mines in the Upper Silesian Coal Basin were closed. Mine closures were caused on the one hand by the exploitation of coal deposits and on the other hand by social and economic changes. In post-mining areas, the effects of many years of coal mining are observed, causing, among other, disintegration of the geological environment and hydrological disturbances. One of the risks is related to the migration of a radioactive gas, radon, which can enter residential buildings and workplaces. This paper presents a risk assessment of elevated radon concentrations based on a multifactorial analysis, taking into account the hazards caused by mining, natural and technical activities.

Keywords: abandoned coal mines, indoor radon concentration, radon migration; radon risk, radon hazard assessment

Sandra Nowak

ORCID ID: 0000-0003-4606-4467

Główny Instytut Górnictwa

Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice, Polska

tel. 48 32 259 27 83

e-mail: snowak@gig.eu

Małgorzata Wysocka

ORCID ID: 0000-0002-1538-1294

Główny Instytut Górnictwa

Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice, Polska

tel. 48 32 259 28 14

e-mail: mwysocka@gig.eu

Stefan Czerwiński

Polska

e-mail: wychcki@o2.pl

Andrzej Chmiela

ORCID: 0000-0002-0833-0923

Spółka Restrukturyzacji Kopalń S.A.

ul. Strzelców Bytomskich 207, 41-914 Bytom, Polska

e-mail: achmiela@srk.com.pl