

Stanisław Chalupnik, Małgorzata Wysocka

WPLYW ODPROWADZANIA WÓD RADOWYCH Z KOPALŃ NA SKAŻENIE ŚRODOWISKA NATURALNEGO

Streszczenie

Wody radowe odprowadzane z kopalń węgla kamiennego do osadników powierzchniowych a stamtąd do rzek powodują czasem skażenia promieniotwórcze. Od 1986 roku obowiązują wytyczne [12], zgodnie z którymi kopalnie są zobowiązane do monitoringu naturalnych izotopów promieniotwórczych w wodach zrzutowych i w ciekach powierzchniowych poniżej punktu zrzutu. Pomimo to kontrola stężeń izotopów radu w wodach rzecznych jest prowadzona jedynie okazjonalnie. W latach 1993–1994 kontrole były prowadzone przez Laboratorium Radiometrii Głównego Instytutu Górniczego [20]. Od tego czasu sytuacja uległa znaczącej zmianie – w niektórych kopalniach wprowadzono metody ograniczania dopływów wód słonych do wyrobisk podziemnych, w innych zastosowano technologie usuwania radu z wód kopalnianych, które są prowadzone w wyrobiskach podziemnych, a część kopalń została zlikwidowana. Stąd potrzeba powtórzenia badań środowiskowych rzek na terenie Śląska. Określenie zależności między wynikami pomiarów stężeń radu w wodach rzecznych i wynikami systematycznego monitoringu wód zrzutowych kopalń, pozwoli na powtórzenie bilansu ładunku radu odprowadzanego do środowiska naturalnego. Umożliwi to ocenę efektywności działań podjętych przez kopalnie w celu obniżenia czy wręcz zaprzestania dalszego zanieczyszczania środowiska naturalnymi izotopami promieniotwórczymi.

Influence of the discharge of radium-bearing waters from coal mines on the contamination of the natural environment

Summary

Saline waters from underground coal mines in Poland often contain natural radioactive isotopes, mainly ^{226}Ra from the uranium decay series and ^{228}Ra from the thorium series. Approximately 60% of the total amount of radium remains underground as radioactive deposits, but 120 MBq of ^{226}Ra and 200 MBq of ^{228}Ra are released daily into the rivers along with the other mine effluents from all Polish coal mines. Technical measures such as inducing the precipitation of radium in gobs, decreasing the amount of meteoric inflow water into underground workings etc., have been undertaken in several coal mines, and as a result of these measures the total amount of radium released to the surface waters has diminished by about 60% during the last 5–6 years.

Mine water can have a severe impact on the natural environment, mainly due to its salinity. However associated high levels of radium concentration in river waters, bottom sediments and vegetation have also been observed. Sometimes radium concentrations in rivers exceed 0.7 kBq/m^3 , which is the permissible level for waste waters under Polish law. The extensive investigations described here were carried out for all coal mines and on this basis the total radium balance in effluents has been calculated. Measurements in the vicinity of mine settling ponds and in rivers have given us an opportunity to study radium behaviour in river waters and to assess the level of contamination.

1. WSTĘP

W wyrobiskach podziemnych kopalń głównym źródłem narażenia radiacyjnego są krótkożyciowe produkty rozpadu radonu. Dużo mniejsze zagrożenie stwarzają

radonośne wody kopalniane i wytrącające się z nich osady o podwyższonej promieniotwórczości [17]. Odmiennie przedstawia się sytuacja w przypadku promieniotwórczego skażenia środowiska wokół kopalń. Radon i produkty jego rozpadu, emitowane z szybów wentylacyjnych kopalń, mogą być w zasadzie nie brane pod uwagę [21]. Podstawowe źródło skażeń stanowią bowiem wody słone o podwyższonej zawartości radu, zrzucane do cieków powierzchniowych oraz w znacznie mniejszym stopniu stałe odpady kopalniane [7].

Słone wody występujące w kopalniach węgla kamiennego na Górnym Śląsku często zawierają izotopy radu – ^{226}Ra i ^{228}Ra . O ile występowanie skażeń środowiska powodowane wydobywaniem rudy uranowej jest powszechnie znane i stosowane są metody ograniczania skażeń, o tyle w przypadku górnictwa nieuranowego, problem ten nie od razu został zauważony. A przecież stężenie ^{226}Ra w wodach dopływających do wyrobisk podziemnych może wynosić nawet 390 kBq/m^3 [18], podczas gdy stężenie tego izotopu w wodach powierzchniowych zazwyczaj nie przekracza $0,1 \text{ kBq/m}^3$ [6]. Wody o podobnym charakterze występują również w kopalniach miedzi w Zagłębiu Lubińskim. Tak duże stężenia radu, jakie występują w polskich kopalniach, są rzadko spotykane w przyrodzie, jedynie w Iranie znaleziono naturalne wody o zbliżonych stężeniach [5]. Wody o podwyższonych stężeniach radu dość często towarzyszą wydobywaniu surowców mineralnych takich, jak: ropa naftowa, węgiel, fosforyty czy gaz. Takie wody znajdowano w USA [15], w Rumunii [14], na Ukrainie [4], w Australii [2], w Niemczech [3], w Brazylii [13] i w wielu innych krajach. W ostatnich latach badania tzw. NORM, czyli *Naturally Occurring Radioactive Materials* (naturalnie występujących materiałów promieniotwórczych) stają się coraz powszechniejsze i dotyczą różnych gałęzi przemysłu, w tym przemysłu wydobywczego.

W kopalniach węgla występują zazwyczaj solanki typu Na-Cl lub Na-Ca-Cl, o zasoleniu przekraczającym niekiedy 200 g/l [16]. Tak duże zasolenie i środowisko redukcyjne w warstwach wodonośnych powoduje, że jedynymi izotopami promieniotwórczymi występującymi w tych wodach są ^{226}Ra z szeregu uranowego i ^{228}Ra z szeregu torowego. Stężenia innych izotopów z obu szeregów (niekiedy poza radonem) są bardzo małe. Dopiero po wytrąceniu się radu w postaci osadów lub jego adsorpcji w osadach, zaczynają wzrastać aktywności innych izotopów promieniotwórczych.

Jak wspomniano, czasem radonośne wody kopalniane zawierają również jony baru, których stężenie może sięgać do 2 g/l . Wody zawierające zarówno rad, jak i bar zostały nazwane wodami radowymi typu A. Drugi typ wód radowych, dla odróżnienia nazwany typem B, nie zawiera jonów baru, ale zawiera jony siarczanowe SO_4^{2-} . Obecność baru w wodach odgrywa podstawową rolę w zachowaniu się radu [8]. Z wód typu A rad prędzej czy później ulegnie współstrąceniu wraz z barem po zmieszaniu się tych wód z wodami siarczanowymi, które są bardzo pospolite w przyrodzie. Stężenie ^{226}Ra w tworzących się w taki sposób osadach może sięgać 400000 Bq/kg , a ^{228}Ra prawie 200000 Bq/kg , podczas gdy średnie stężenia tych izotopów w glebie wynosi tylko około 25 Bq/kg . Wytrącanie się promieniotwórczych osadów może zachodzić nie tylko pod ziemią, ale także na powierzchni w osadnikach,

rurociągach, małych ciekach powierzchniowych [9, 10]. Takie osady mogą powodować skażenia promieniotwórcze środowiska naturalnego, a także trudności techniczne w eksploatacji rurociągów i kolektorów wód słonych [11].

W przypadku wód radowych niezawierających baru, z którym rad mógłby się współstrącać, cały rad transportowany jest z wodami kopalnianymi na powierzchnię do osadników kopalnianych, a stamtąd do rzek [9, 10]. Usuwanie radu polega na jego sorpcji na ilastych osadach dennych w ciekach powierzchniowych. Proces ten jest powolny, dlatego podwyższone stężenia radu w wodach obserwuje się w odległości wielu kilometrów od źródeł skażenia, podobnie jak podwyższoną promieniotwórczość osadów dennych. Stężenie izotopów radu w tego typu osadach jest znacznie mniejsze niż w osadach powstających z wód typu A i rzadko przekraczana jest wartość 1000 Bq/kg (1 kBq/kg).

Niekiedy osady o podwyższonych stężeniach radu są usuwane podczas czyszczenia chodników wodnych czy ścieków w wyrobiskach dołowych i lokowane na powierzchni. Powodować to może wtórne skażenie składowisk odpadów stałych. Jednak dzięki świadomości, że tego typu skażenia mogą się zdarzyć oraz stworzeniu zaleceń co do monitoringu odpadów lokowanych na powierzchni, rola tego źródła skażeń powierzchni jest coraz mniej znacząca.

3. SYSTEM MONITORINGU SKAŻEŃ WOKÓŁ KOPALŃ

Badania występowania wód radowych w kopalniach oraz badania skażeń środowiska naturalnego na Górnym Śląsku rozpoczęto już w latach siedemdziesiątych XX wieku [19]. Dość szybko zrozumiano znaczenie monitoringu skażeń promieniotwórczych powodowanych przez przemysł węglowy na Śląsku. Ponadto, awaria w Czarnobyli doprowadziła do zwiększenia zainteresowania tymi problemami.

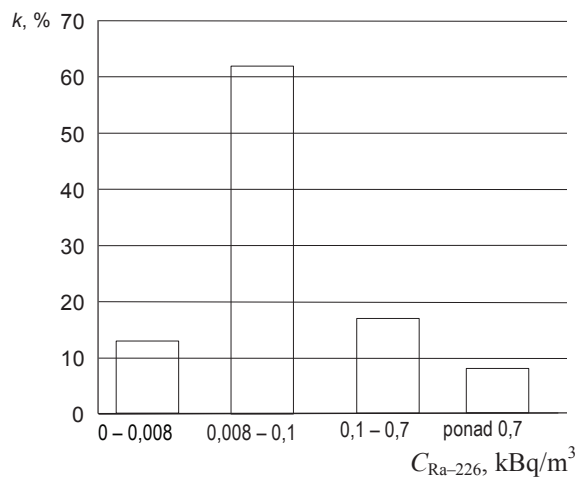
Jak już wspomniano, na Górnym Śląsku występują dwa źródła promieniotwórczych skażeń środowiska naturalnego:

- radonośne wody odprowadzane z kopalń węgla kamiennego,
- odpady stałe o podwyższonej promieniotwórczości, lokowane na składowiskach powierzchniowych.

System kontroli skażeń środowiska wokół kopalń, powodowanych przez wody radowe, został opracowany i wdrożony w 1986 we wszystkich kopalniach węgla kamiennego w Polsce [20]. Dzięki temu można nadzorować wielkość zrzutu radu do środowiska i stężenie radu w odprowadzanych przez kopalnie wodach (rys. 1).

Podstawą systemu jest kontrola stężeń izotopów radu w wodach zrzutowych z kopalń jako głównego źródła skażeń. Pomiar taki wykonuje się, z obowiązkową częstością nie mniejszą niż raz w roku, w następujących miejscach:

- w wodach zbiorczych odprowadzanych na powierzchnię,
- w osadnikach powierzchniowych,
- w rzekach powyżej i poniżej miejsc zrzutów wód kopalnianych,
- w studniach będących w zasięgu oddziaływania wód słonych z osadników i skażonych rzek.



Rys. 1. Procentowy rozkład radu w wodach zrzutowych ze śląskich kopalń węgla kamiennego (dane z roku 1998): C_{Ra-226} – stężenie, k – kopalnie

Fig. 1. Distribution of radium concentrations in discharge waters of Upper Silesian coal mines (data from 1998), C_{Ra-226} – concentration of ^{226}Ra , k – percent of coal mines

W przypadku stwierdzenia podwyższonych stężeń radu w wodach zrzutowych (powyżej 0,7 kBq/m³) częstość monitoringu jest zwiększana i badania takie powinny być wykonywane raz na kwartał.

Nieobligatoryjnie wykonuje się badania stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych w próbkach osadów z osadników wód dołowych, w osadach dennych z cieków powierzchniowych, w odpadach lokowanych na hałdach, a także w glebach na terenach przylegających do skażonych cieków i rzek.

W celu oszacowania dawek dla okolicznej ludności wykonywane są ponadto pomiary mocy dawki promieniowania gamma, stężeń radonu (jego produktów rozpadu) na otwartym powietrzu i w mieszkaniach w sąsiedztwie terenów o podwyższonej promieniotwórczości naturalnej. Niekiedy wykonuje się również badania skażeń roślin i zwierząt.

4. BILANS RADU ODPROWADZANEGO Z WODAMI KOPALNIANYMI NA POWIERZCHNIĘ

W Laboratorium Radiometrii Głównego Instytutu Górniczego od wielu lat są prowadzone systematyczne badania wód dołowych w kopalniach oraz wód odprowadzanych na powierzchnię. Na podstawie wyników kilkunastu tysięcy analiz radiochemicznych wód opracowano bilans całkowitej aktywności radu odprowadzanego do środowiska naturalnego z wodami słonymi z kopalń węgla na Śląsku [20]. Podstawę bilansu stanowiły:

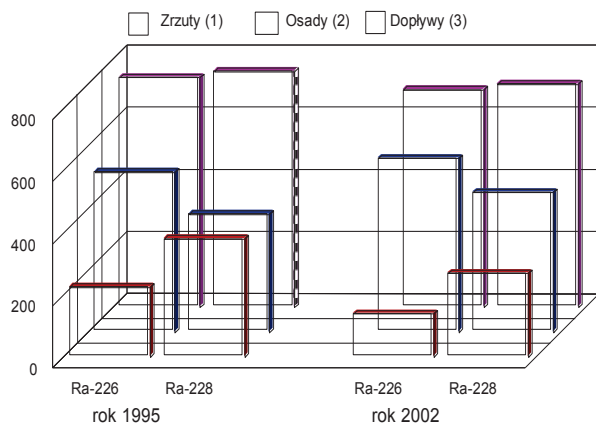
- wyniki oznaczeń stężeń izotopów radu w wodach odprowadzanych przez wszystkie kopalnie węgla kamiennego do środowiska,

- dane o ilości wód zrzucanych z poszczególnych kopalń.

Została oszacowana również całkowita aktywność izotopów radu w wyrobiskach podziemnych spowodowana wytrącaniem się osadów o podwyższonej promieniotwórczości. Osady takie powstają na skutek przypadkowego mieszania się wód radowych z innymi wodami dołowymi o różnym składzie chemicznym lub też na skutek oczyszczania wód z radu w wyrobiskach podziemnych. Całkowita aktywność pozostającego w wyrobiskach podziemnych radu została oszacowana na podstawie:

- wyników pomiarów stężeń izotopów radu w wodach dopływających do wyrobisk kopalnianych z otaczających skał,
- ilości wody w poszczególnych dopływach do poszczególnych partii różnych kopalń,
- obliczonej całkowitej aktywności izotopów radu odprowadzanych z wyrobisk podziemnych do osadników na powierzchni w poszczególnych kopalniach.

Oszacowanie takie, mimo że obarczone dużym błędem (szczególnie w przypadku wód dopływających do wyrobisk dołowych), daje pogląd na temat skali skażeń. Na przykład dane za rok 1995 wskazywały, że aktywność izotopu radu ^{226}Ra , zrzucanego ze słonymi wodami do rzek, wynosiła w przybliżeniu około 225 MBq dziennie (80 GBq/rok) natomiast dla ^{228}Ra wartość ta wynosiła około 380 MBq/dzień – czyli 140 GBq na rok [1]. W tym okresie prawie 70% ilości ^{226}Ra pozostawało w wyrobiskach podziemnych w postaci osadów siarczanu radowo-barowego, natomiast w przypadku ^{228}Ra ilość ta była znacznie mniejsza i wynosiła jedynie około 50% (rys. 2). Dane za 2000 rok są porównywalne, jednak rozpoczęcie oczyszczania wód z radu w kopalni „Piaś” doprowadziło do zmniejszenia ładunku radu odprowadzanego z kopalń węgla do środowiska o około 150 MBq/dobę (w tym o prawie 60 MBq/dobę dla ^{226}Ra i około 90 MBq/dobę dla ^{228}Ra).



Rys. 2. Bilans radu w wodach dopływających i zrzutowych z kopalń węgla (porównanie danych z 1995 i 2002 roku): 1 – zrzuty, 2 – osady, 3 – dopływy

Fig. 2. Radium balance in inflows and outflows from coal mines (a comparison of data from 1995 and 2002): 1 – radium in outflows, 2 – radium in deposits, 3 – radium in inflows

Przyczyna różnic w procentowych ładunkach obu izotopów radu, występująca przy wytrącaniu osadów pod ziemią i zrzutach wód do środowiska naturalnego jest łatwa do wytłumaczenia. Osady wytrącają się głównie z wód typu A, w których stężenia ^{226}Ra są zazwyczaj wyższe od stężeń ^{228}Ra . Z kolei ^{228}Ra występuje w wodach radowych typu B w stężeniach wyższych niż ^{226}Ra . Wody typu B nie zawierają baru i nie wytrącają się z nich osady o podwyższonej promieniotwórczości, tym samym więcej ^{228}Ra trafia do osadników na powierzchni i do rzek. Dopiero zastosowanie technologii oczyszczania wód kopalnianych z radu zmieniło ten stan rzeczy.

Efektom odprowadzania wód radowych do cieków powierzchniowych jest na przykład znaczne podwyższenie stężeń izotopów radu w Wiśle, w której nawet w Krakowie, 80 km poniżej ostatniego punktu zrzutu wód kopalnianych, zaobserwowano podwyższone stężenie ^{226}Ra , wynoszące niekiedy $0,04 \text{ kBq/m}^3$. Średnie stężenie tego izotopu w polskich rzekach wynosi, według Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, w przybliżeniu $0,004 \text{ kBq/m}^3$, a więc 10 razy mniej.

5. METODYKA BADAWCZA

Zebrano wyniki oznaczeń radu w wodach dołowych kopalń GZW za lata 2001–2002, jak również w wodach rzecznych za rok 2002. Wody rzeczne były pobierane w punktach regionalnej sieci monitoringu wód przez pracowników Ośrodka Badań i Kontroli Środowiska w Katowicach.

5.1. Pomiar stężeń izotopów radu w próbach wody

Oznaczenia izotopów radu ^{226}Ra i ^{228}Ra w wodach prowadzi się za pomocą opracowanej w GIG metody ciekłych scyntylicatorów [9]. Metoda ta polega na współstrącaniu z badanej próbki radu wraz z barem w postaci siarczanów, oczyszczeniu powstałego osadu z innych izotopów promieniotwórczych i pomiarze aktywności preparatu w ciekłym scyntylicatorze żelującym. Metoda umożliwia równoczesny pomiar izotopu ^{210}Pb , który oddzielany jest od radu w końcowym etapie i mierzony [9]. Pomiar izotopów radu za pomocą spektrometru na ciekłe scyntylicatory wykonuje się po upływie co najmniej 28 dni od daty spreparowania próbki, co pozwala obliczyć stężenia ^{226}Ra i ^{228}Ra . Pomiar izotopu ołowiu wykonuje się po około 24 godzinach od spreparowania próbek. Do pomiaru wód wykorzystuje się spektrometr Quantulus z osłoną antykoincydencyjną i możliwością rozróżniania cząstek alfa i beta. Dolny próg detekcji (LLD) dla opisanej metody (przy założeniu objętości próbki 1 litr i czasu pomiaru 1 godzina), przy wykorzystaniu spektrometru Quantulus wynosi odpowiednio:

$$\begin{aligned} &\text{dla } ^{226}\text{Ra} - 3 \text{ Bq/m}^3; \\ &\text{dla } ^{228}\text{Ra} - 20 \text{ Bq/m}^3. \end{aligned}$$

Jako wzorce stosowane są roztwory produkowane w firmie Amersham, oznaczone z dokładnością $\pm 8\%$.

6. WYNIKI MONITORINGU SKAŻENIA WÓD ODPROWADZANYCH NA POWIERZCHNIĘ I DO RZEK

Wyniki monitoringu wód powierzchniowych prowadzonego w latach 2001–2002 obejmują ponad 280 analiz zawartości radu w wodach odprowadzanych na powierzchnię z kopalń, zrzutów z osadników wód dołowych oraz pomiarów w ciekach powierzchniowych, powyżej oraz poniżej miejsc zrzutów wód kopalnianych. Dodatkowo wykonano analizy 40 próbek wód rzecznych w sieci monitoringu regionalnego wód powierzchniowych. Wyniki pomiarów wraz z opisem punktów poboru znajdują się w bazie danych promieniotwórczości wód, prowadzonej w Laboratorium Radiometrii w ramach wdrożonego systemu jakości.

Wyniki badań prowadzonych w ostatnich latach wykazały wyraźnie, że obecnie promieniotwórcze skażenia środowiska są przede wszystkim wynikiem odprowadzania wód typu B z kopalń „Ziemowit” oraz „Piast” (Ruch I i II). Wody te trafiają do Wisły przez Potok Goławiecki z kopalni „Ziemowit” i przez rzekę Gostynkę z obu ruchów kopalni „Piast”. Nieco mniejsze znaczenie ma odprowadzanie wód radowych z kopalni „Silesia”. Te wody są wodami typu A, czyli zawierającymi bar, i dlatego po zmieszaniu z wodami Wisły zawierającymi siarczany, następuje szybkie wytrącanie radu z barem i obniżenie stężenia radu w rzece. W przypadku pozostałych kopalń stężenia radu w wodach odprowadzanych do środowiska nie przekraczają $0,7 \text{ kBq/m}^3$.

Można stwierdzić, że ładunek radu odprowadzanego do rzek z kopalń GZW, uległ znaczącej redukcji w porównaniu z okresem 1993–1995, kiedy wykonywano poprzedni bilans. Było to spowodowane wieloma czynnikami: zamknięciem niektórych kopalń, podjęciem działań zmierzających do ograniczania dopływów do kopalń, czy wreszcie oczyszczaniem wód z radu, prowadzonym w kilku kopalniach.

Dane za 1995 rok wykazywały, że aktywność izotopu radu ^{226}Ra , zrzucanego ze słonymi wodami do rzek wynosiła w przybliżeniu około 225 MBq/dzień (80 GBq/rok) natomiast dla ^{228}Ra wartość ta wynosiła około 380 MBq/dzień – czyli 140 GBq/rok [1]. Aktualny bilans jest następujący: ładunek radu ^{226}Ra , zrzucanego ze słonymi wodami do rzek wynosi około 120 MBq/dzień (40 GBq/rok), ładunek ^{228}Ra wynosi około 200 MBq/dzień (80 GBq/rok). W porównaniu z danymi z połowy lat dziewięćdziesiątych jest to prawie dwukrotnie mniej. Jednym z głównych powodów tego spadku jest rozpoczęcie oczyszczania z radu wód w kopalni „Piast” na poziomie 650 metrów. Doprowadziło to do zmniejszenia ładunku radu odprowadzanego na powierzchnię o prawie 150 MBq/dobę ($60 \text{ MBq } ^{226}\text{Ra}$ i $90 \text{ MBq } ^{228}\text{Ra}$). Wynik bilansu wyraźnie wskazuje na efektywność metod oczyszczania wód kopalnianych z radu. Obecnie trwają prace nad projektem instalacji oczyszczania dla kopalni „Ziemowit”. Spowodowałoby to ograniczenie całkowitego ładunku radu odprowadzanego na powierzchnię o dalsze 50 GBq na rok.

Kolejnym etapem ograniczania skażeń wód powierzchniowych powinno być podjęcie prac nad oczyszczaniem wód radowych z poziomu 500 m kopalni „Piast”, co pozwoliłoby na ograniczenie ładunku radu odprowadzanego na powierzchnię o dalsze 40 GBq rocznie.

Należy pamiętać, że w miarę zwiększania głębokości, z jakich wydobywany jest węgiel na Śląsku, problem dopływów i odprowadzania wód radowych może pojawiać się w kopalniach, w których dotychczas nie występował lub występował na niewielką skalę. W związku z tym konieczny jest dalszy systematyczny monitoring wód odprowadzanych z kopalń do rzek. Rozwiązania wymaga też problem odpowiedzialności za monitoring zrzutów ze zlikwidowanych lub likwidowanych kopalń – brak jest obecnie odpowiednich uregulowań prawnych, wymuszających kontrolę skażeń na terenach pokopalnianych.

8. PODSUMOWANIE

- Eksploatacja węgla kamiennego powoduje czasami znaczne podwyższenie tła promieniowania jonizującego w środowisku naturalnym. Przyczyną skażeń jest przede wszystkim odprowadzanie do cieków powierzchniowych promieniotwórczych wód kopalnianych oraz składowanie na powierzchni stałych odpadów, zawierających podwyższone zawartości naturalnych substancji promieniotwórczych. Zjawisko takie występuje nie tylko na terenie GZW, ale także w Zagłębiu Ruhry w Niemczech i w innych krajach. Należy jednak pamiętać, że najpoważniejszym problemem, z uwagi na ochronę środowiska, było dla kopalń duże zasolenie wód zrzutowych, a nie ich promieniotwórczość.
- Na terenie GZW rocznie około 50 GBq ^{226}Ra i około 90 GBq ^{228}Ra jest odprowadzanych wraz z wodami kopalnianymi do środowiska naturalnego. Natomiast bilans radu lokowanego na powierzchni z odpadami stałymi jest trudny do oszacowania.
- Dzięki działaniom prewencyjnym, prowadzonym przez niektóre śląskie kopalnie, sytuacja uległa znacznej poprawie. Na większości terenów przyległych do kopalń poziom stężeń naturalnych substancji promieniotwórczych nie odbiega od wartości przeciętnie spotykanych w środowisku naturalnym. Dalsze działania, podjęte szczególnie w kopalniach „Ziemowit” i „Piaś”, pozwolą w najbliższej przyszłości na prawie całkowite rozwiązanie tego problemu.
- Na podstawie danych uzyskiwanych z monitoringu skażeń promieniotwórczych środowiska można wskazać optymalne sposoby prowadzenia metod rekultywacji terenów skażonych. Ma to szczególne znaczenie w obliczu ograniczania wydobycia i prognoz likwidacji niektórych kopalń. Dotyczy to w szczególności małych cieków powierzchniowych, osadników kopalnianych i ich bezpośredniego sąsiedztwa:
 - przed przystąpieniem do rekultywacji terenów muszą być przeprowadzone szczegółowe badania zakresu i poziomu skażeń promieniotwórczych terenu,
 - wybrana metoda rekultywacji musi być dostosowana do wielkości i zasięgu skażeń, a ponadto musi prowadzić do minimalizacji zagrożenia dla mieszkańców skażonych terenów,
 - w czasie rekultywacji i po jej zakończeniu musi być prowadzony monitoring stanu środowiska w celu zapewnienia założonych parametrów rekultywacji i uniknięcia rozproszenia skażeń w środowisku np. podczas transportu osadów.

Dopracowania wymagają wszakże uregulowania prawne dotyczące problemów związanych z promieniotwórczymi skażeniami środowiska naturalnego, które nie zawsze są spójne i jednoznaczne.

Literatura

1. Chałupnik S., Wysocka M.: *Wstępne wyniki oczyszczania wód dołowych z radu w KWK Piast, efekty I etapu wdrożenia*. Dokumentacja Głównego Instytutu Górnictwa. Katowice 1999 (niepublikowana).
2. Dickson B.L.: *Evaluation of the radioactive anomalies using radium isotopes in groundwaters*. Journal of Geochemical Exploration 1966 Vol. 19.
3. Gans I. i inni: *Radium in waste water from coal mines and other sources in FRG*. Second Symposium on Natural Radiation Environment. Bombay, India. Bethesda, DOE Symposium Series 1981.
4. Gucało L.K.: *Characteristics of radium distribution in underground waters of Dnieprwsko-Donieckoj Basin*. Gieochimja 1964 Vol. 12.
5. Khademi A., Alemi A.A., Nasser A.: *Transfer of radium of soil to plants in an area of high natural radioactivity in Ramsar, Iran*. Conference on Natural Radiation Environment III, US DOE Report CONF-780422. Bethesda, Maryland, 1980.
6. Koster H.W., Marwitz P.A., Berger G.W., van Weers A.W., Hagel P.: *^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra in aquatic ecosystems and polders, anthropogenic sources, distribution and enhanced radiation doses in the Netherlands*. The Natural Radiation Environment. Nuclear Technology Publishing, 1992 Vol. 45 No. 1-4.
7. Lebecka J. i inni: *Monitoring of radiation exposure from different natural sources in Polish coal mines*. International Conference on Occupational Safety in Mining. Toronto, Canadian Nuclear Association 1985 Vol.2.
8. Lebecka J. i inni: *Influence of mining activity on distribution of radium in the natural environment*. 4th Working Meeting Isotopes in Nature. Leipzig, Academy of Sciences of the GDR 1987.
9. Lebecka J., Chałupnik S., Śliwka M.: *Wyniki badań zachowania się radu podczas transportu słonych wód rurowymi (na przykładzie kolektora wód słonych OLZA)*. Wiadomości Górnicze 1992 nr 5.
10. Lebecka J., Chałupnik S., Wysocka M.: *Radioactivity of mine waters in Upper Silesian Coal Basin, and its influence on natural environment*. 5th International Mine Water Congress. Nottingham, International Mine Water Association 1994.
11. Lebecka J., Skubacz K., Chałupnik S., Wysocka M.: *Skażenia promieniotwórcze środowiska naturalnego na Górnym Śląsku powodowane przez wody kopalniane i promieniotwórcze osady*. Wiadomości Górnicze 1991 nr 6.
12. Ministerstwo Górnictwa i Energetyki: *Wytyczne kontroli skażeń promieniotwórczych środowiska naturalnego powodowanych przez kopalnie węgla kamiennego*. Katowice MGİE 1986.
13. Paschoa A.S., Nobrega A.W.: *Non-nuclear mining with radiological implications in Araxa*. International Conference On Radiation Hazards in Mining, Golden, Colorado, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Inc. 1981.
14. Peic T. i inni: *Formation waters from oil and natural gas production: potential polluting source by Radium-226*. International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VI). W: Environment International. Vol. 22, suppl. 1. London, Pergamon Press 1996.

15. Rajaretnam G., Spitz, H.B.: *Effect of leachability on environmental risk assessment for naturally occurring radioactivity materials in petroleum oil fields*. Health Physics 2000 Vol. 78 (2).
16. Rogoż M., Posyłek E.: *Górnictwo i geologiczne metody ograniczania zrzutów słonych wód z kopalń węgla kamiennego*. Materiały konferencji nt. Kierunki zagospodarowania zasolonych wód z kopalń węgla kamiennego. Katowice, GIG 1991.
17. Skowronek J. i inni: *Źródła narażenia radiacyjnego w kopalniach węgla*. W: Naturalna promieniotwórczość w środowisku, rozdział 3. Katowice, GIG (w druku).
18. Skubacz K., Lebecka J., Chałupnik S., Wysocka M.: *Possible changes in radiation background of the natural environment caused by coal mines activity*. International Symposium on Nuclear Techniques in Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources. IAEA-SM-308. Vienna, IAEA 1990.
19. Tomza I., Lebecka J.: *Radium-bearing waters in coal mines: occurrence, methods of measurements and radiation hazard*. International Conference on Radiation Hazards in Mining, Golden, Colorado. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Inc. 1981.
20. Wysocka M. i inni: *Bilans ładunków substancji promieniotwórczych w dopływach wody do kopalń węgla kamiennego i kopalń zagłębia miedziowego*. Dokumentacja GIG w ramach projektu celowego KBN *Strategia i działania ograniczające zasolenie wód*. Katowice, GIG 1995 (niepublikowana).
21. Zgadzaj J., Skubacz K., Chałupnik S.: *The influence of radon and its progeny emitted from the exhaust shafts of coal mines on the contamination of the outdoor air*. International Conference on Technologically enhanced natural radiation caused by non-uranium mining. Katowice, GIG 1996.

Recenzent: dr hab. inż. Marek Rogoż, prof. GIG