

## PROGNOZOWANIE POZIOMU ZAGROŻENIA PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM NA TERENACH GÓRNICZYCH - STUDIUM PRZYPADKU

Zygmunt KORBAN  
Politechnika Śląska

**Streszczenie:** Analizując szeregi czasowe często dostrzegamy w nich wahania okresowe (cykliczne, sezonowe). Jedną z metod pozwalającą na badanie tego typu zjawisk jest należąca do grupy modeli składowej periodycznej analiza harmoniczna. Metoda ta opiera się na badaniu wahań wokół poziomu średniego  $a_0$  i na budowie modelu w postaci sumy tzw. harmonik. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania analizy harmonicznej w procesie prognozowania występowania zagrożenia radiacyjnego na terenach pogórnich (wody kopalniane o podwyższonej zawartości radu Ra-226 i Ra-228 odprowadzane na powierzchnię) wykorzystując w tym celu wyniki pomiarów stężenia radu w jednym z rejonów zlewni wód dołowych z lat 2004-2013.

**Słowa kluczowe:** szkodliwości promieniowania jonizującego, analiza harmoniczna

### WSTĘP

Promieniowanie jonizujące jest najbardziej charakterystycznym zjawiskiem związanym z przemianami zachodzącymi w atomach i w jądrze atomowym. Zjawisko to polega na odrywaniu elementarnych ładunków ujemnych (elektronów) od atomów, co powoduje powstawanie par jonów dodatnich i elektronów. Powodem występowania narażenia na promieniowanie jonizujące jest obecność naturalnych izotopów promieniotwórczych oraz promieniowania kosmicznego (promieniowanie dochodzące ze Słońca i promieniowanie galaktyczne) [4, 8]. W sposób ogólny można wyróżnić trzy podstawowe źródła narażenia:

- naturalne izotopy promieniotwórcze zawarte w skorupie ziemskiej;
- wtórne promieniowanie kosmiczne;
- radon i produkty jego rozpadu.

Szacuje się, że w skali roku dawka promieniowania jaką otrzymuje statystyczny człowiek wynosi około 2,0 mSv (w krajach członkowskich Unii Europejskiej średnia dawka pochodząca od źródeł naturalnych kształtuje się na poziomie ok. 3,0 mSv, a w Polsce – 2,2 mSv) [3].

Zagrożenie radiacyjne naturalnymi substancjami promieniotwórczymi zaliczane jest do grupy zagrożeń naturalnych, a jego źródłami są:

- krótkożyciowe produkty rozpadu radonu;
- promieniowanie gamma zawierające izotopy radu;
- wody kopalniane zawierające izotopy radu;
- osady zawierające izotopy radu wytrącane z wód dołowych zawierających rad.

Stężenie energii potencjalnej krótkożyciowych produktów rozpadu radonu uzależnione jest w głównej mierze od sposobu przewietrzania i sposobu wybierania złoża. Stężenie radu w wodach wzrasta wraz z głębokością (wzrasta wówczas zasolenie wód, co jest czynnikiem decydującym)<sup>1</sup>, natomiast występowanie promieniotwórczych osadów związane jest z

---

<sup>1</sup> - wyróżnia się wody typu A zawierające rad i bar oraz wody typu B, tj. wody zawierające rad i jony siarczanowe

obecnością baru (z takich wód mogą wytrącać się promieniotwórcze osady, w miejscach gdzie dochodzi do mieszania się wód radowych typu A z wodami zawierającymi siarczany) [10]. Z uwagi na specyfikę środowiska pracy (przestrzeń zamkniętą, ograniczone możliwości wentylacyjne itd.) stężenie izotopów radu na dole może wielokrotnie przewyższać stężenie radu w przestrzeni otwartej ( $150 \text{ kBq/m}^3$  w kopalniach Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (DZW),  $15 \text{ kBq/m}^3$  w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) i średnio  $8 \text{ Bq/m}^3$  w przestrzeniach otwartych [9]).

Zgodnie z przepisami wykonawczymi do Prawa geologicznego i górniczego we wszystkich podziemnych zakładach górniczych na terytorium Polski należy okresowo prowadzić pomiary zagrożenia radiacyjnego naturalnymi substancjami promieniotwórczymi. Tylko w 2007 r. w kopalniach węgla kamiennego wykonano ponad 2900 pomiarów stężenia energii potencjalnej krótkożyciowych produktów rozpadu radonu, 123 pomiary dawek indywidualnych promieniowania gamma, przeprowadzono 390 analiz promieniotwórczości wód kopalnianych oraz 141 analiz próbek osadów dołowych. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia ppoż. w podziemnych zakładach górniczych nie jest dopuszczalne, aby w danym roku narażenie spowodowane przez naturalne substancje promieniotwórcze w KWK mogło być większe niż 20 mSv: wyrobiska dołowe zaliczone do klasy B zagrożenia radiacyjnego (wyrobiska, w których środowisko pracy stwarza potencjalne narażenie otrzymania rocznej dawki skutecznej większej niż 1 mSv i nie większej aniżeli 6 mSv) traktowane są jako wyrobiska nadzorowane, a wyrobiska zaliczone do klasy A (wyrobiska, w których środowisko pracy stwarza potencjalne narażenie otrzymania rocznej dawki skutecznej większej aniżeli 6 mSv) – jako kontrolowane.

O ile w podziemnych wyrobiskach główne źródło zagrożenia promieniowaniem jonizującym stanowią krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, o tyle w odniesieniu do terenów powierzchniowych zlokalizowanych wokół kopalń zagrożenie to stanowią głównie wody dołowe o podwyższonej zawartości radu i w mniejszym zakresie – stałe odpady kopalniane [7, 11].

W kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego występują wody dołowe o zróżnicowanym stężeniu izotopów radu: w rejonie południowo-zachodnim zawartości izotopu radu 226 sięgają kilkunastu  $\text{kBq/m}^3$ , zaś w rejonie północno-wschodnim nie przekraczają wartości  $6,8 \text{ kBq/m}^3$ . Całkowity ładunek izotopu radu 226Ra dopływającego dziennie do wyrobisk wynosi ok. 725 MBq, a izotopu 228Ra – 700 MBq. Należy zwrócić uwagę, że jedynie ok. 40% radu obecnego w wodach kopalnianych pozostaje w wyrobiskach podziemnych w postaci osadów, pozostałe 60% radu trafia na powierzchnię, a następnie do rzek powodując skażenia środowiska naturalnego [6].

Usytuowanie kopalń węgla kamiennego w górnych odcinkach Wisły i Odry powoduje, że zasolenie głównych rzek Polski następuje już w ich początkowych odcinkach. Kopalnie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego codziennie odprowadzają do Wisły i Odry łącznie prawie 900 tys.  $\text{m}^3$  wody a dzienny zrzut soli wynosi 11 tys. t. Prowadzone badania [9] wykazują ponadto jak istotny wpływ na stężenie izotopów radu zawartych w wodach powierzchniowych mają także warunki klimatyczne (pora roku), co zwłaszcza w okresie nasilających się kontrastów pogodowych (okresy suszy, okresy wzmożonych opadów)

przyczynia się do występowania okresowych wahań wartości sumarycznego stężenia izotopów radu Ra-226 i Ra-228 w wodach kopalnianych ( $c_{Raw}$ ).

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości praktycznego wykorzystania jednej z metod badania zjawisk okresowości w szeregach czasowych (metody analizy harmonicznej) w procesie prognozowania zawartości izotopu radu 226 w wodach powierzchniowych występujących na obszarach górniczych. Przykład obliczeniowy (opracowanie modelu) poprzedza omówienie istoty samej analizy harmonicznej (metoda polega na budowie modelu składowej periodycznej w postaci sumy tzw. harmonik). Jako dane wyjściowe do wyznaczenia modelu posłużyły wyniki pomiarów zawartości stężenia Ra-226 odnotowane w latach 2004-2013 w jednym z cieków wodnych zlokalizowanych na obszarze GZW.

### ANALIZA HARMONICZNA JAKO PRZYKŁAD MODELU SKŁADOWEJ PERIODYCZNEJ

Metoda analizy harmonicznej [2], obok metody wskaźników [12], czy metody Kleina [1] jest jedną z wielu metod uwzględniających wahania okresowe w przebiegu badanego zjawiska. Metoda analizy harmonicznej polega na budowie modelu w postaci sumy tzw. harmonik – funkcji sinusoidalnych lub cosinusoidalnych w przyjętym okresie, przy czym pierwsza harmonika ( $i = 1$ ) ma okres równy długości okresu badanego, druga ( $i = 2$ ) połowie tego okresu, itd. W przypadku  $n$  obserwacji liczba wszystkich harmonik odpowiada wartości  $n/2$ . Model składowej periodycznej szeregu ma postać następującą:

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \left[ \alpha_i \sin\left(\frac{2\pi}{n} it\right) + \beta_i \cos\left(\frac{2\pi}{n} it\right) \right]$$

gdzie:

$i$  – numer harmoniki,

$\alpha_0, \alpha_i, \beta_i$  – parametry.

Wielkości parametrów  $\alpha_0, \alpha_i, \beta_i$  szacuje się za pomocą metody najmniejszych kwadratów (MNK) wg następujących zależności:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t,$$

$$a_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin\left(\frac{2\pi}{n} it\right), \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1,$$

$$b_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos\left(\frac{2\pi}{n} it\right)$$

gdzie:

$a_0, a_i, b_i$  – oceny parametrów  $\alpha_0, \alpha_i, \beta_i$ .

Dla harmoniki o numerze  $\frac{n}{2}$ :

$$a_{n/2} = 0, \quad b_{n/2} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos(\pi t).$$

Dla każdej z harmonik wyznacza się wielkość amplitudy  $c_i$

$$c_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} .$$

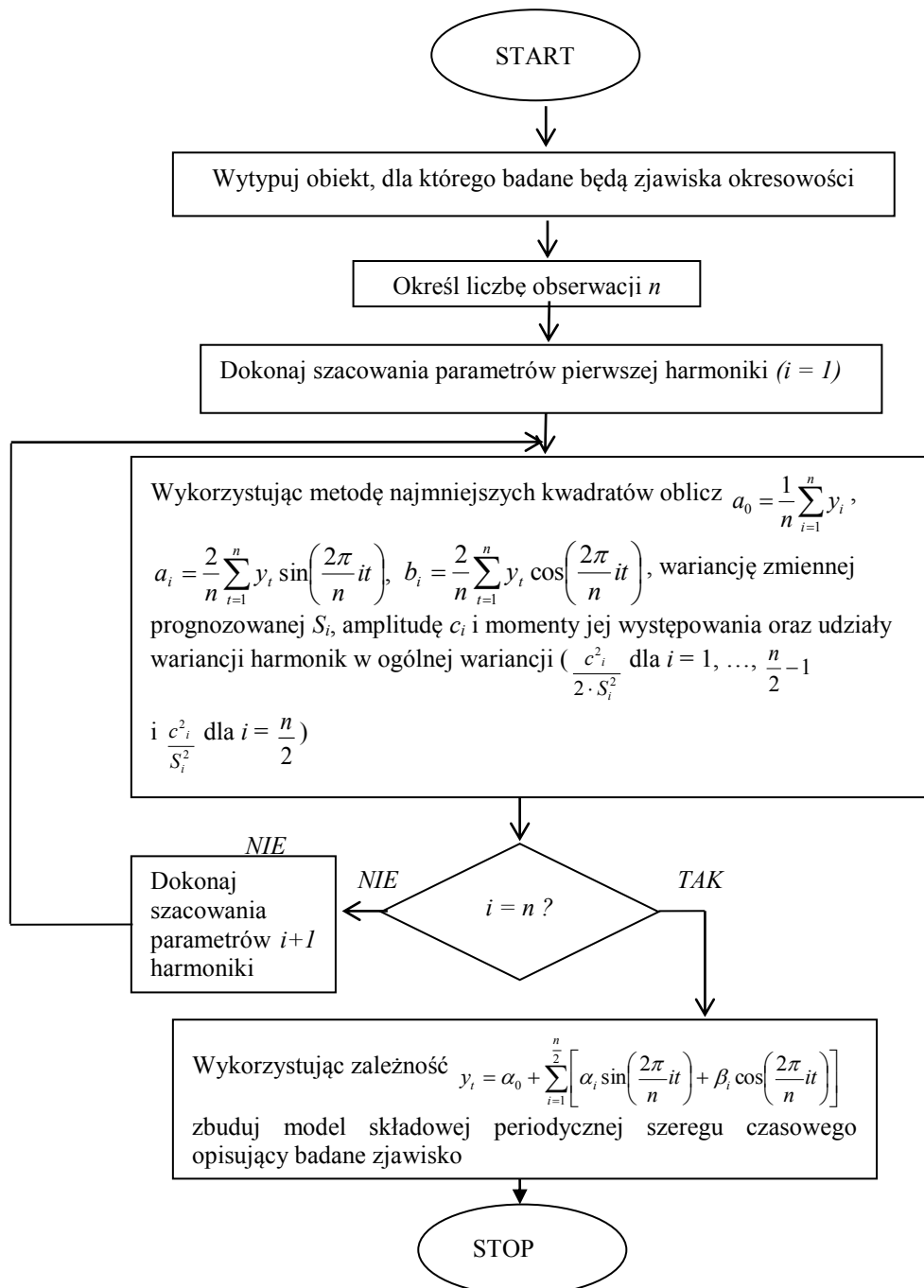
oraz wartości przesunięcia fazowego  $\frac{\varepsilon_i}{\theta_i}$

gdzie:

$$\varepsilon_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{a_i}{b_i}\right),$$

$$\theta_i = \frac{2\pi}{n}i$$

Procedury postępowania w ramach analizy harmonicznego przedstawia rys. 1.



Rys. 2. Analiza harmonicznego - algorytm postępowania [5]

**STUDIUM PRZYPADKU**

Dane wyjściowe do obliczeń przedstawia rys. 2.

Zestawienie wartości miar statystyki (wybranych przeciętnych miar pozycyjnych) dla analizowanego okresu oraz dla poszczególnych kwartałów przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.**

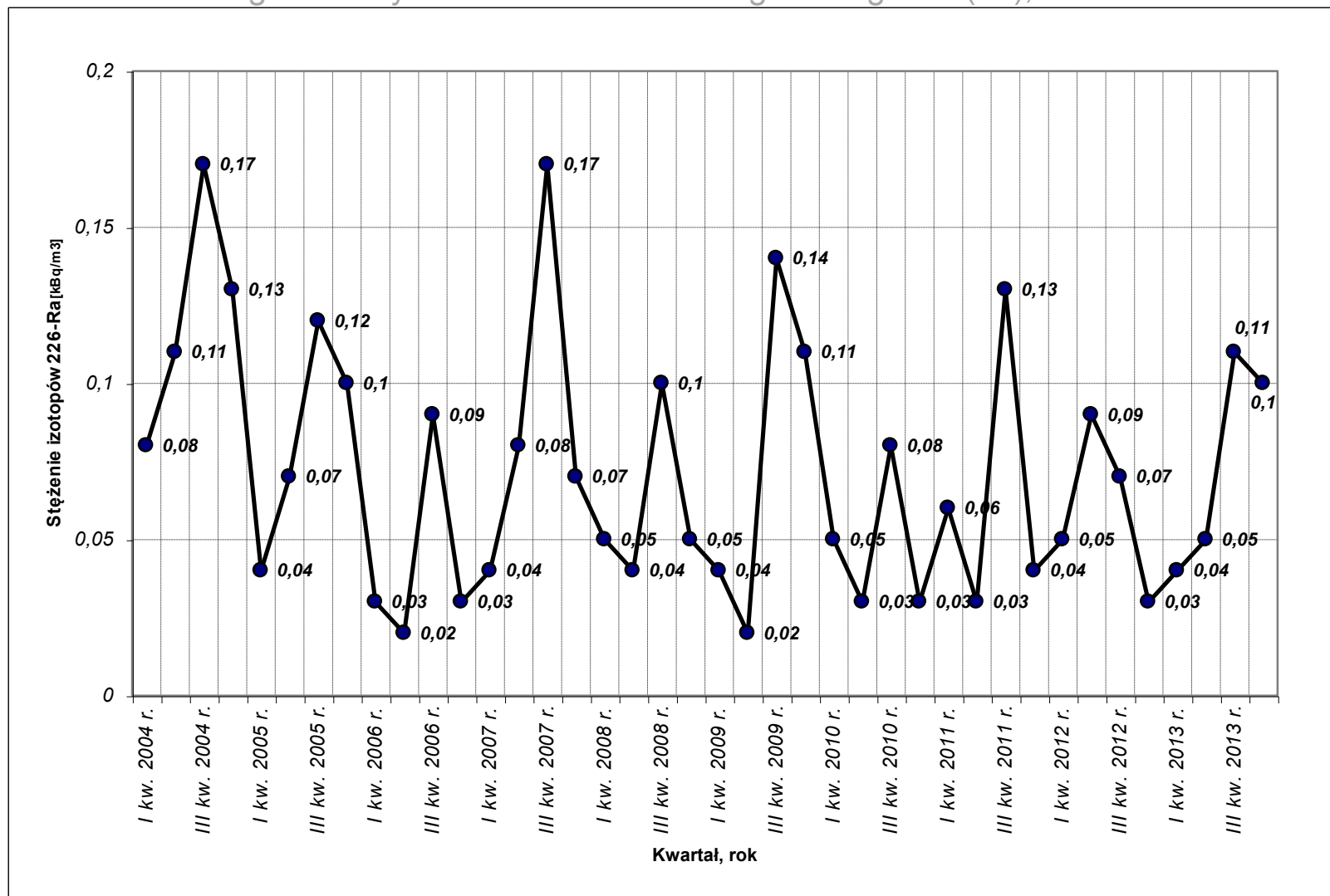
**Stężenie izotopów radu 226 w wodach [kBq/m<sup>3</sup>] w cieku wodnym - zestawienie wybranych przeciętnych miar pozycyjnych**

Miary statystyki	Okres czasu				
	Lata 2004-2013	I kwartały w latach 2004-2013	II kwartały w latach 2004-2013	III kwartały w latach 2004-2013	IV kwartały w latach 2004-2013
Wartość maksymalna $x_{max}$ [kBq/m <sup>3</sup> ]	0.11	0.08	0.11	0.17	0.13
Wartość minimalna $x_{min}$ [kBq/m <sup>3</sup> ]	0.08	0.03	0.02	0.07	0.03
Mediana $M_e$ [kBq/m <sup>3</sup> ]	0.095	0.05	0.04	0.12	0.05
Odchylenie standardowe $S_x$ [kBq/m <sup>3</sup> ]	0.015	0.014	0.032	0.035	0.037
Współczynnik zmienności $V_x$ [%]	15.8	28.0	58.2	29.3	55.8

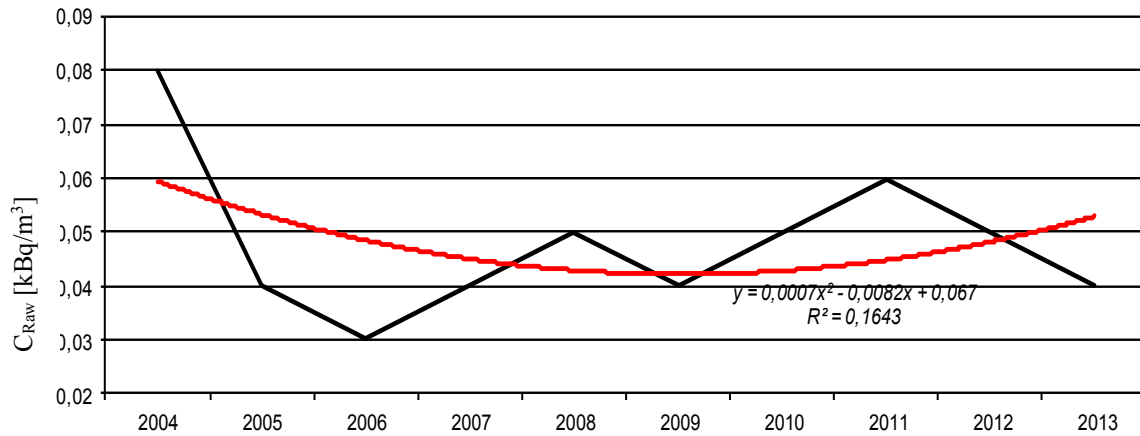
Największe wartości stężenia izotopów radu 226 w wodach odnotowane zostały w III kwartale 2004 r. i 2007 r. – 0.17 [kBq/m<sup>3</sup>]. Także kolejne najwyższe wartości (0.14 [kBq/m<sup>3</sup>] i 0.13 [kBq/m<sup>3</sup>]) odnotowano w III kwartałach odpowiednio: 2009 r. i 2010 r.

Zróznicowanie zbiorowości wyników (wartości współczynników zmienności) dla I-szych i III-cich kwartałów jest porównywalne i zdecydowanie niższe aniżeli dla II-gich i IV-tych kwartałów.

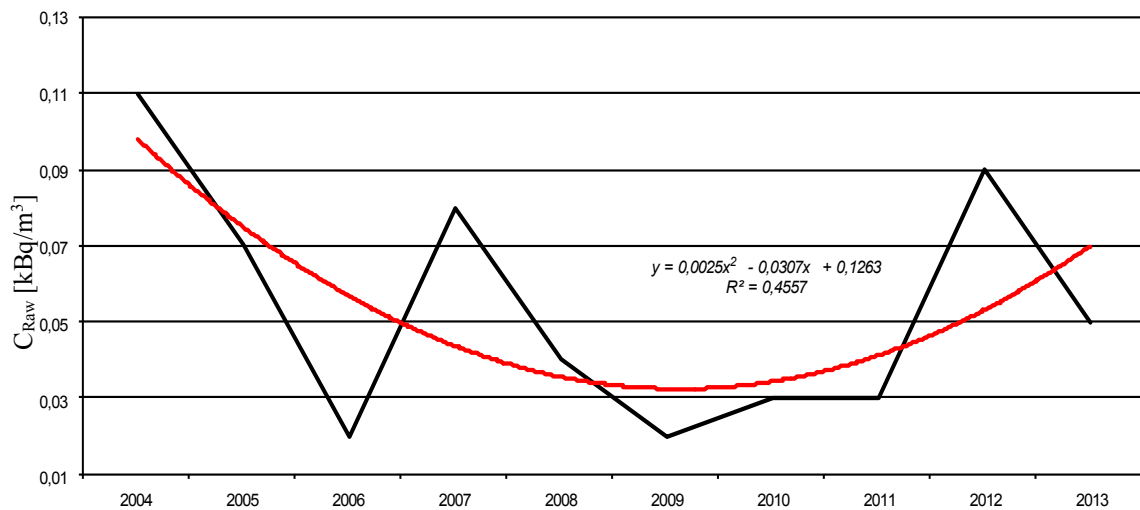
Tendencje zmian wartości stężenia izotopów radu w wodach odprowadzanych do środowiska w rozbiciu na poszczególne kwartały przedstawiają rys. 3-6.



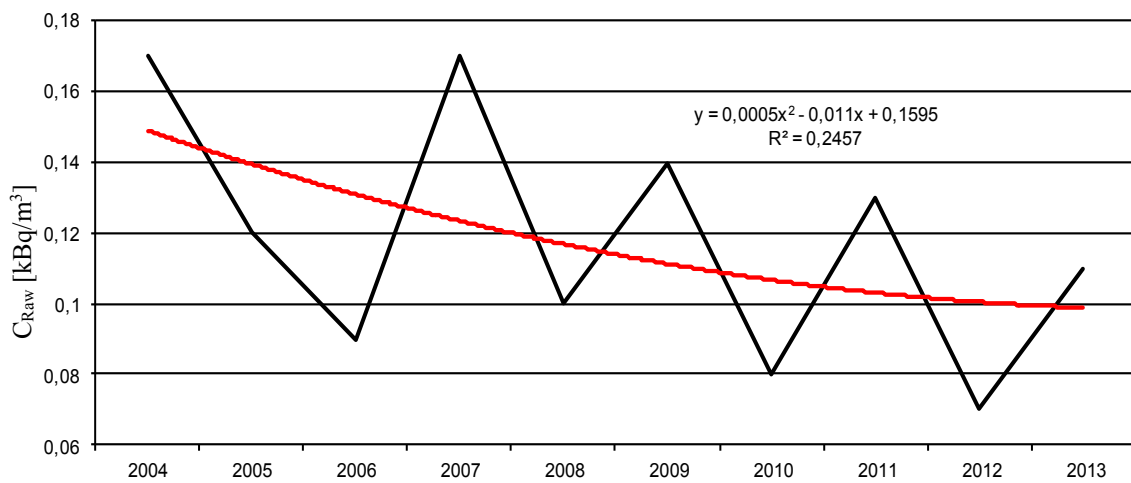
Rys. 2. Stężenie izotopów radu 226 w wodach [kBq/m³] w cieku wodnym-dane wyjściowe



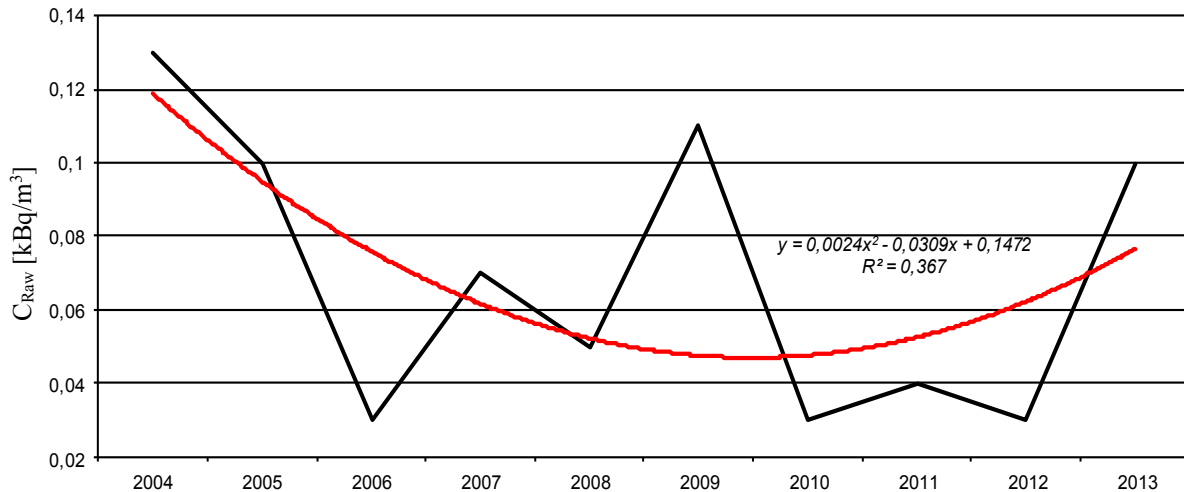
**Rys. 3. Zmiany wartości stężenia izotopów radu w wodach odprowadzanych do środowiska w pierwszych kwartałach w latach 2004-2013**



**Rys. 4. Zmiany wartości stężenia izotopów radu w wodach odprowadzanych do środowiska w drugich kwartałach w latach 2004-2013**



**Rys. 5. Zmiany wartości stężenia izotopów radu w wodach odprowadzanych do środowiska w trzecich kwartałach w latach 2004-2013**



Rys. 6. Zmiany wartości stężenia izotopów radu w wodach odprowadzanych do środowiska w czwartych kwartałach w latach 2004-2013

W oparciu o dane wyjściowe wyznaczony został parametr  $a_0 = 0,072$ .

Celem określenia modelu opisującego periodyczność zjawiska wyznaczone zostały parametry kolejnych harmonik (tabela 2).

Tabela 2.

Wartości parametrów dla kolejnych harmonik						
dla $i = 1$						
$t$	$y_t$	$x$	$\sin x$	$\cos x$	$y_t \sin x$	$y_t \cos x$
1	0,08	$\frac{\pi}{20}$	0,156	0,988	0,013	0,079
2	0,11	$\frac{\pi}{10}$	0,309	0,951	0,034	0,105
3	0,17	$\frac{3\pi}{20}$	0,454	0,891	0,077	0,151
4	0,13	$\frac{\pi}{5}$	0,588	0,809	0,076	0,105
5	0,04	$\frac{\pi}{4}$	0,707	0,707	0,028	0,028
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
37	0,04	$\frac{37\pi}{20}$	-0,454	0,891	-0,018	0,036
38	0,05	$\frac{19\pi}{10}$	-0,309	0,951	-0,015	0,048
39	0,11	$\frac{39\pi}{20}$	-0,156	0,988	-0,017	0,109
40	0,1	$2\pi$	0,000	1,000	0,000	0,100



<i>dla i = 2</i>						
1	0,08	$\frac{\pi}{10}$	0,309	0,951	0,025	0,076
2	0,11	$\frac{\pi}{5}$	0,588	0,809	0,065	0,089
3	0,17	$\frac{3\pi}{10}$	0,809	0,588	0,138	0,100
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
<i>dla i = 20</i>						
1	0,08	$\pi$	0,000	-1,000	0,000	-0,080
2	0,11	$2\pi$	0,000	1,000	0,000	0,011
3	0,17	$3\pi$	0,000	-1,000	0,000	-0,170
...	...	...	...	...	...	...
38	0,05	$38\pi$	0,000	1,000	0,000	0,050
39	0,11	$39\pi$	0,000	-1,000	0,000	-0,110
40	0,10	$40\pi$	0,000	1,000	0,000	0,100

Zbiornicze zestawienie wartości poszczególnych parametrów harmonik przedstawia tabela 3.

Tabela 3.

<b>Zbiornicze zestawienie parametrów harmonik</b>					
	<i>i=1</i>	<i>i=2</i>	<i>i=3</i>	<i>i=4</i>	<i>i=5</i>
$a_i$	0,009	0,009	0,014	0,012	-0,002
$b_i$	0,010	0,011	0,004	-0,009	0,015
$\frac{c_i^2}{2s^2}$	0,053	0,061	0,065	0,069	0,067
	<i>i=6</i>	<i>i=7</i>	<i>i=8</i>	<i>i=9</i>	<i>i=10</i>
$a_i$	0,006	0,004	-0,012	-0,001	-0,035
$b_i$	-0,003	-0,005	0,001	-0,009	0,007
$\frac{c_i^2}{2s^2}$	0,015	0,012	0,044	0,025	0,394
	<i>i=11</i>	<i>i=12</i>	<i>i=13</i>	<i>i=14</i>	<i>i=15</i>
$a_i$	0,004	0,009	-0,002	0,001	-0,006
$b_i$	0,002	0,004	0,003	0,007	0,000
$\frac{c_i^2}{2s^2}$	0,007	0,031	0,004	0,013	0,012
	<i>i=16</i>	<i>i=17</i>	<i>i=18</i>	<i>i=19</i>	<i>i=20</i>
$a_i$	0,001	0,003	-0,004	-0,004	0,000
$b_i$	-0,007	-0,003	0,003	0,008	-0,011
$\frac{c_i^2}{2s^2}$	0,015	0,007	0,007	0,028	0,071

Na podstawie obliczonych wartości można stwierdzić, iż największe części wahań okresowych są udziałem harmoniki dziesiątej (pokrywa ona 39,4 % wahań okresowych) – w tym przypadku model opisujący przyjmuje postać:

$$\hat{y}_t = 0,072 - 0,035 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) + 0,007 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$$

W przypadku uwzględnienia harmoniki I, II, III, IV, V, VIII, X i XX pokrywają one 82,4% wahań sezonowych, a model opisujący przebieg zjawiska przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \hat{y}_t = & 0,072 + 0,009 \sin\left(\frac{\pi}{20}t\right) + 0,010 \cos\left(\frac{\pi}{20}t\right) + 0,009 \sin\left(\frac{\pi}{10}t\right) + \\ & + 0,011 \cos\left(\frac{\pi}{10}t\right) + 0,014 \sin\left(\frac{3\pi}{20}t\right) + 0,004 \cos\left(\frac{3\pi}{20}t\right) + 0,012 \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right) - \\ & - 0,009 \cos\left(\frac{\pi}{5}t\right) - 0,002 \sin\left(\frac{\pi}{4}t\right) + 0,015 \cos\left(\frac{\pi}{4}t\right) - 0,012 \sin\left(\frac{2\pi}{5}t\right) + \\ & + 0,001 \cos\left(\frac{2\pi}{5}t\right) - 0,035 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) + 0,007 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0,011 \cos(\pi) \end{aligned}$$

Zestawienie amplitud wahań dla ww. harmonik i ich wartości przesunięcia fazowego przedstawia tabela 4.

Tabela 4.

Amplitudy wahań dla harmoniki I, II, III, IV, V, VIII, X i XX i ich wartości przesunięcia fazowego

Harmonika	Amplituda wahań	Wartość przesunięcia fazowego
I	0,013	4,665
II	0,014	2,183
III	0,015	2,743
IV	0,015	-1,476
V	0,015	-0,169
VIII	0,012	-1,184
X	0,036	-0,874
XX	0,011	0,000

Na podstawie wyznaczonego modelu można prognozować stężenie zawartości radu Ra-226 w wodach powierzchniowych przedmiotowego ciekłu wodnego, przyjmując odpowiednio: dla I-go kwartału 2014 r. –  $t = 41$ , dla II-go kwartału 2014 r. –  $t = 42$  itd. (przykładowa prognoza stężenia izotopów radu w wodach dla II kwartału 2014 r. wynosi  $0,106 \left[ \frac{kBq}{m^3} \right]$ ).

## ZAKOŃCZENIE

W związku z występowaniem zagrożenia radiacyjnego naturalnymi substancjami promieniotwórczymi zakłady górnicze zobligowane są do okresowej kontroli czterech parametrów opisujących to zagrożenie: stężenia energii potencjalnej alfa w powietrzu krótkożyciowych produktów rozpadu radonu, ekspozycji na zewnętrzne promieniowanie gamma, sumarycznego stężenia izotopów radu Ra-226 i Ra-228 w wodach kopalnianych oraz sumarycznej aktywności właściwej izotopów radu Ra-226 i Ra-228 zawartych w osadach dołowych. Wyniki tych pomiarów wskazują, że coraz częściej obecność naturalnych substancji promieniotwórczymi odnotowywana jest także na powierzchni (efekt uboczny prowadzenia eksploatacji górniczej). O ile w przypadku podziemnych wyrobisk górniczych głównym źródłem zagrożenia promieniowaniem jonizujących są krótkożyciowe produkty

rozpadu radonu, o tyle na terenach powierzchniowych największe zagrożenie jest związane z występowaniem wód kopalnianych o podwyższonej zawartości radu (Ra-226, Ra-228). W przypadku tych ostatnich charakterystyczna jest periodyczność zmian stężenia zawartości izotopów radu. Występujące okresowe wzrosty i spadki stężenia izotopów radu są wynikiem m. in. zjawisk klimatycznych związanych z porami roku: suszy (głównie w okresie letnim) i wzmożonych opadów atmosferycznych (głównie w okresie wiosny, jesieni i zimy) – współczynnik korelacji pomiędzy wartościami stężenia izotopów radu zawartymi w wodach badanego cieku wodnego, a średnimi wartościami opadów atmosferycznych dla miasta Żory, Murcki i Bieruń Stary w 2012 i 2013 roku jest wyraźny i wynosi – 0,35.

W artykule omówiono możliwości praktyczne wykorzystania analizy harmonicznej w obszarze prognozowania stężenia zawartości izotopów radu Ra-226 w wodach powierzchniowych. Metoda analizy harmonicznej należy do grupy metod umożliwiających analizę szeregów czasowych i opiera się na budowie modelu w postaci sumy tzw. harmonik – funkcji sinusoidalnych lub cosinusoidalnych w przyjętym okresie czasu. Jakkolwiek liczba harmonik powinna być możliwie największa (im dłuższy szereg czasowy, tym większa liczba harmonik), to jednak w budowie modeli wykorzystywane są z reguły jedynie te z nich, których udział w wyjaśnianiu wariancji rozpatrywanej zmiennej jest najwyższy. W przykładzie zamieszczonym w artykule zdefiniowano 20 harmonik (analizowano wyniki pomiarów od stycznia 2004 r. do grudnia 2013 r.), ale do prognozy wykorzystano jedynie osiem z nich, tj. harmonikę nr I, II, III, IV, V, VIII, X i XX. Harmoniki te wyjaśniają łącznie ponad 80% wariancji zmiennej prognozowanej, przy czym sama harmonika X pokrywa aż 39,4 % wahań okresowych.

## LITERATURA

- [1] Almon C.: The INFORUM approach to interindustry modeling. *Economic Systems Research*. Vol. 3, Nr 1, 1991, s. 1-7.
- [2] Cieślak M., Dittmann P., Krupowicz J., Kuropka I., Kwiatkowska-Ciotucha D., Radzikowska B., Szandula J., Załuska U.: *Prognozowanie gospodarcze. Metody i zastosowania*. Wydanie czwarte zmienione. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2005, s. 88-89.
- [3] Green B. M. R., Huges J.S., Lomas P. R.: *Radiation Atlas – Natural Sources of Ionising Radiation in Europe*, prepared for: Directorate-General for Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Commission of the European Communities. 1997.
- [4] Heinrich W., Roesler S., Schraube H.: *Physics of cosmic radiation fields. Radiation Protection Dosimetry*. Vol.86, Nr 4, 1999, s. 253-258.
- [5] Korban Z.: Wykorzystanie analizy harmonicznej w procesie prognozowania poziomu zagrożenia promieniowaniem jonizującym na terenach górniczych *Górnictwo i Geologia*. Zeszyt 1, Tom 6, 2011, s. 121-129.
- [6] Lebecka J. i in.: *Monitoring of Radiation Exposure from Different Natural Sources in Polish Coal Mines*. Int. Conf. on Occupational Safety in Mining. Toronto. Vol. 2, 1985. s. 408.
- [7] Lebecka J., Chałupnik S., Łukasik B., Wysocka M.: *Monitoring and control of radioactive contamination of natural environment caused by mining activity*. Proc. of Int. Conference Ecological Aspects of Underground Mining. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 1993, s. 198.
- [8] Lewis B. J. et al.: *Cosmic radiation exposure on Canadian-based commercial airline routes*. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 86, Nr 1, 1999, s. 7-24.

- [9] Skowronek J. (red.): Zagrożenia naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego w przemyśle wydobywczym. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 2007, s. 183-201.
- [10] Tomza I., Lebecka J.: Radium Bearing Waters in Coal Mines. Proc. of Int. Conf. on Radiation Hazard in Mining. Golden, Colorado, USA, American Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineers Inc.. 1981.
- [11] Zgadaj J., Skubacz K., Chałupnik S.: The influence of radon and it's progeny emitted from exhaust shafts of coal mines on the contamination of the outdoor air. Proc. of International Conference Technologically Enhanced Natural Radioactivity -TENR '96. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 1996.
- [12] Zając K.: Zarys metod statystycznych PWE. Warszawa 1988.