

## IZOTOPY URANU I RADU WÓD PITNYCH AGLOMERACJI KRAKOWSKIEJ

### URANIUM AND RADIUM ISOTOPES IN DRINKING WATER OF KRAKÓW AGGLOMERATION

NGUYEN DINH CHAU<sup>1</sup>, PAWEŁ KASPRZYKOWSKI<sup>1</sup>, RAFAŁ SENIUTA<sup>1</sup>, JAKUB NOWAK<sup>1</sup>, PAWEŁ OCHMAŃSKI<sup>2</sup>

**Abstrakt.** Niniejsza praca prezentuje wyniki analizy izotopów radu i uranu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) w próbkach wody pobranych z zakładów uzdatniania wody i publicznych studni znajdujących się na obszarze aglomeracji krakowskiej. Na podstawie wyników pomiarowych oszacowano roczne obciążające dawki wywołane pochłonięciem izotopów radu i uranu zawartych w badanych wodach dla ludzi we wszystkich grupach wiekowych. Stwierdzono że oszacowane dawki są mniejsze niż dopuszczalny poziom (0,1 mSv/rok) z wyjątkiem grupy niemowląt z założeniem że każde dziecko w tej grupie konsumuje dziennie 1 litr wody.

**Słowa kluczowe:** woda pitna, izotopy radu, izotopy uranu, dawka obciążająca, aglomeracja krakowska.

**Abstract.** This work presents the results of measurements of radium and uranium isotopes ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) in water samples collected from drinking water plants and public artesian wells in Kraków agglomeration. Annual effective doses for people of different age groups, caused by intake of natural radioactive isotopes contained in the waters, were estimated based on the obtained radioactive data. It turned out that the estimated annual doses are lower than the permissible level (0.1 mSv), excluding those for babies aged below 1 year, assuming the consumption of 1 liter per day for every baby in the age group.

**Key words:** drinking water, radium isotopes, uranium isotopes, effective dose, Kraków agglomeration.

## WSTĘP

Kraków wraz z przyległymi gminami zamieszkuje ponad milion osób, dlatego zaopatrzenie miasta w wodę zdatną do spożycia jest niezwykle ważnym elementem dla funkcjonowania całej aglomeracji krakowskiej. Jednostką zaopatrzoną mieszkańców Krakowa w wodę pitną jest Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Krakowie. Woda jest eksploatowana głównie (około 98%) ze źródeł powierzchniowych: z ujęcia na Sance, z ujęcia na Dłubni, z ujęcia na Rudawie oraz ze zbiornika na Rabie w Dobczycach, reszta jest pokrywana z ujęcia wód podziemnych w Mistrzejowicach (Chowaniec i in., 2007). Po przejściu przez zakład uzdatniania, gdzie koryguje się mętność i barwę, a także usuwa zanieczyszczenia organiczne i bakteriolo-

giczne, woda trafia do sieci wodociągowej. Dodatkowym źródłem wody pitnej są studnie kopane w utworach czwartorzędowych i głębokie otwory ujmujące wody z wapieni malmu. Większość głębokich otworów została wykonana ponad dwadzieścia lat temu, podczas badań geologicznych związanych z planami budowy metra (Kleczkowski, 2003). Im głębiej zalega woda tym jej mineralizacja jest na ogół większa (Oszczypko, 1981), a to może powodować podwyższenie naturalnej promieniotwórczości zwłaszcza zawartości izotopów radu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) (Chau i in., 2008). Dlatego istotne jest przebadanie tych wód pod względem radiologicznym.

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: chau@novell.ftj.agh.edu.pl

<sup>2</sup> Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji SA, ul. Lindego 9, 30-140 Kraków; e-mail: pracownia.fiz-chem@mpwik.krakow.pl

## DOPUSZCZALNE POZIOMY NATURALNEJ PROMIENIOTWÓRCZOŚCI W WODACH PITNYCH

Zgodnie z Dyrektywą Unii Europejskiej 98/83/EC (EC, 1998) w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi respektowaną przez Polskę, maksymalna dopuszczalna dawka obciążająca wywołana drogą pochłonięcia izotopów promieniotwórczych zawartych w wodzie, przy założeniu dwulitrowej konsumpcji na dzień jest równa 0,1 mSv/rok (to jest około 5% średniej dawki rocznej otrzymanej ze wszystkich naturalnych źródeł promieniowania jonizującego łącznie z okresowym prześwietleniem). W praktyce obowiązuje kryterium, że jeśli całkowita aktywność promieniowania alfa nie przekracza 0,1 Bq/l oraz całkowita

aktywność promieniowania beta jest nie wyższa niż 1 Bq/l, to woda nie wymaga dodatkowej analizy. W przeciwnym przypadku należy przeprowadzić analizę na poszczególne naturalne izotopy promieniotwórcze w celu ustalenia przyczyn powodujących to podwyższenie.

Istotnym problemem jest odpowiednia jakość wody, a Kraków jest miastem silnie zurbanizowanym, tak więc parametry wody często odbiegają od normatywnych wartości (Chowaniec i in., 2007), wymagają więc monitoringu i oznaczania zmian różnych parametrów wody, w tym także naturalnej promieniotwórczości.

## CHARAKTERYSTYKA WARSTW WODONOŚNYCH W OBSZARZE AGLOMERACJI KRAKOWSKIEJ

W regionie Krakowa znajdują się następujące poziomy wodonośne: jurajski, kredowy, mioceński, plejstoceni i holoceni. Z uwagi na występowanie wód w różnych kompleksach skalnych, piętra wodonośne mogą być zróżnicowane m.in. pod względem wydajności wypływu i chemizmu (Kleczkowski, Mysza 1989; Chowaniec i in., 2007).

W jurajskim piętrze wodonośnym najistotniejsze znaczenia mają struktury górnourajskie, złożone z wapieni skalistych i płytowych. Poziom ten wykazuje często bezpośrednie połączenie z Wisłą i jej dopływami. Jakość wód z tego piętra jest zróżnicowana, od dobrej aż do złej (Chowaniec i in., 2007). Na obszarze miasta skały jurajskie są w większości pokryte łami miocenu, a więc wody podziemne w ich obrębie są dobrze izolowane od zanieczyszczeń antropogenicznych, mając często charakter artezyjski lub subartezyjski. Są to wody typu  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$  oraz  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , bakteriologicznie czyste, ich mineralizacja waha się w dość szerokim zakresie od 410 do 4290 mg/l, zawartość magnezu od 0,1 do 23,0 mg/l, a zawartość żelaza od 0,3 do 2,4 mg/l (Rajchel, 1998; Chowaniec i in., 2007). Na podstawie badań izotopowych i gazów szlachetnych można zaliczyć większość wód zalegających w wapieniach jurajskich do wód wieku glacialnego z wyjątkiem wody ze studni na ulicy Cechowej, która została określona jako woda współczesna (Zuber i in., 2004).

Poziom kredowy tworzą margle, opoki, wapienie, wapienie margliste i piaszczyste oraz miejscami zlepieńce górnej kredy. Poziom ten jest warstwowym zbiornikiem, w którym woda dostarczona poprzez infiltrację opadów atmosferycznych, gromadzi się w szczelinach. Mineralizacja wody z tego poziomu jest niska i często nie przekracza 1000 mg/l. Woda ta należy do typu  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ .

W poziomie mioceńskim użytkowe piętro wodonośne stanowią szczeliny łupków i iłowców oraz utwory piaszczyste. Źródłem zasilania w wodę jest infiltracja opadów atmosferycznych oraz rzadziej przesiąkanie z piętra czwartorzędowego. W części wschodniej miasta, w miarę głębszego zalegania warstw wodonośnych, obserwuje się wzrost mineralizacji. Są to wody dobrej jakości izolowane przed zanieczyszczeniami antropogenicznymi warstwami iłów i iłolupków (Chowaniec i in., 2007). Wody w tym piętrze należą do typu  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ .

Duże rozprzestrzenienie na obszarze aglomeracji krakowskiej wykazuje poziom plejstoceni, gdzie wody występują w kompleksach żwirowo-piaszczystych. Źródłem zasilania w wodę jest bezpośrednia infiltracja opadów atmosferycznych oraz przesiąkanie wód z rzek

Ze względu na niewielką miąższość warstw wodonośnych poziom holoceni ma małe znaczenie (Chowaniec i in., 2007).

## METODY OZNACZANIA IZOTOPÓW RADU I URANU

W celu oznaczenia zawartości radu ( $^{226}\text{Ra}$  oraz  $^{228}\text{Ra}$ ), próbkę wody o objętości 3 l odparowywano do objętości ok. 0,7 l. Następnie rad współstrącono razem z barem w postaci siarczynu (Tomza, 1977). Po oczyszczeniu osadu od innych przeszkadzających izotopów takich jak  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{210}\text{Po}$ , osad ten przenoszono do naczynia pomiarowego i mieszano z 12  $\text{cm}^3$  żelowego scyntylatora. Pomiar preparowanych próbek i wyliczanie zawartości izotopów radu przeprowa-

dzano zgodnie z procedurą opisaną w pracy Chau'a i innych (1997). Próg oznaczalności zastosowanej metody wynosi odpowiednio 2 i 10 mBq/l dla  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ .

Do oznaczenia aktywności izotopów uranu ( $^{234}\text{U}$  oraz  $^{238}\text{U}$ ), próbkę wody o objętości 5 l odparowano do około 1 l, następnie uran współstrącono razem z dwutlenkiem manganu w postaci uranylowego amonu zgodnie z procedurą opisaną w pracy Skwarca (1997). Aby oddzielić uran od innych izoto-

pów, osad rozpuszczono w kwasie solnym o stężeniu 9M i przepuszczono przez kolumnę jonitową. Uran przemywano z kolumny słabym kwasem solnym o stężeniu 0,1M i wytrącono powtórnie poprzez dodawanie soli Mohra i chloru neodymu. Osad z uranem osadzono na filtrze membranowym o średnicy 30 mm i porowatości 100 m produkcji firmy Eichrome, próbkę zmierzono na spektrometrze alfa. Dla oznaczenia wydajności odzysku uranu i określenia zawartości izo-

topów uranu dodawano do próbki wody przed odparowaniem znaną ilość roztworu izotopu uranowego  $^{232}\text{U}$  o aktywności około 100 mBq. Czas pomiaru każdej próbki trwał tak długo, aby niepewność liczby zliczeń pod pikiem  $^{232}\text{U}$  była mniejsza niż 1%. Przy tej objętości wody i procedurze pomiarowej próg oznaczania izotopów uranu ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) wynosi 0,5 mBq/l.

## WYNIKI POMIARÓW

Wyniki pomiarów izotopów radu i uranu dla 26 próbek wody pobranych ze wszystkich publicznych źródeł wody aglomeracji krakowskiej przedstawiono w tabeli 1. W tej ta-

beli podawane również skalne formacje zbiornikowe, w których zalegają badane wody. Identyfikacja geologicznych

Tabela 1

### Stężenia izotopów $^{238}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{226}\text{Ra}$ i $^{228}\text{Ra}$ w próbkach wody pobranych w aglomeracji krakowskiej

Concentrations of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  isotopes in water samples, Kraków agglomeration

Miejsce poboru próbki	Izotopy uranu [mBq/l]		Izotopy radu [mBq/l]		Formacja kolektora <sup>1</sup>
	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ra}$	
<b>Zdroje</b>					
Osiedle 1000-lecia	9 ±1	12 ±1	98 ±4	86 ±5	wapień, jura
Bohaterów Września	17 ±2	19 ±2	≤2	11 ±2	wapień, jura
Piastów	21 ±1	24 ±1	5 ±1	≤10	wapień, jura
Kościuszki	19 ±1	19 ±1	13 ±1	≤10	wapień, jura
Łepkowskiego	5 ±1	9 ±1	5 ±1	17 ±1	wapień, jura
Plac Sikorskiego	≤0,5	≤0,5	10 ±4	11 ±2	wapień, jura
Plac Inwalidów	2 ±1	3 ±1	5 ±1	≤10	wapień, jura
Podchorążych	1,1 ±0,1	0,7 ±0,1	6 ±1	29 ±1	wapień, jura
<b>Źródła</b>					
Tetmajera	≤0,5	≤0,5	6 ±1	≤10	wapień, jura
Olszanica	28 ±2	17 ±1	≤2	≤10	piaskowiec, miocen
Cechowa	6 ±1	7 ±1	16 ±1	12 ±1	wapień, jura
Wądół źródło	13 ±1	12 ±1	10 ±1	≤10	wapień, kreda
<b>Studnie kopane „kiwajki”</b>					
Białoprądnicka	59 ±3	41 ±2	≤2	16 ±1	nieznana
Bieżanowska	3 ±1	5 ±1	20 ±1	≤10	żwiry piaszczyste, czwartorzęd
Bieżanów Rynek	≤0,5	≤0,5	11 ±1	19 ±2	żwiry piaszczyste, czwartorzęd
Cegielniana	11 ±1	11 ±1	14 ±1	20 ±2	nieznana
Lilli Wenedy	3 ±1	5 ±1	14 ±1	17 ±1	żwiry piaszczyste, czwartorzęd
Mazowiecka	1,1 ±0,1	1,1 ±0,1	≤2	≤10	żwiry piaszczyste, czwartorzęd
Rydla	14 ±1	14 ±1	5 ±1	14 ±2	nieznana
Turonia	8 ±1	6 ±1	≤2	≤10	żwiry piaszczyste, czwartorzęd
Wądół kiwajka	12 ±1	14 ±1	12 ±1	≤10	wapień, kreda
Włoska	1,1 ±0,1	1,1 ±0,1	≤2	≤10	żwiry piaszczyste, czwartorzęd
<b>Wodociągowe</b>					
Bielany surowa	41 ±2	39 ±2	≤2	≤10	powierzchniowa
Bielany pitna	5 ±1	6 ±1	≤2	≤10	powierzchniowa
Rudawa surowa	12 ±1	15 ±1	≤2	≤10	powierzchniowa
Rudawa pitna	8 ±1	11 ±1	≤2	≤10	powierzchniowa

<sup>1</sup> Większość formacji zbiornikowych została zidentyfikowana na podstawie prac Rajchel (1998) oraz Zubera i innych (2004)  
Most of reservoir formations were identified based on reports by Rajchel (1998) and Zuber et al. (2004)

skął zbiornikowych wód częściowo była oparta na pracach Rajchel (1998) oraz Zuber a i innych (2004).

Z tabeli 1 wynika, że stężenia obydwu izotopów radu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) badanych wód są małe i wahają od progno oznaczalności do 20 mBq/l z wyjątkiem wody na osiedlu Tysiąclecia, która zawiera stężenia  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  równe odpowiednio 98 i 86 mBq/l. Zawartości izotopów uranu są dość niskie i wahają się od zera do około 60 mBq/l. Ogólnie można zauważyć, że wody po uzdatnieniu mają widocznie niższe zawartości izotopów uranu niż przed uzdatnieniem.

Wartości  $e_i(g)$  można znaleźć w Rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (RRM, 2005). Na podstawie zmierzonych stężeń izotopów radu i uranu w próbkach wody, oszacowano obciążającą dawkę skuteczną w wyniku wchłonięcia tych izotopów dla wszystkich grup wiekowych zakładając, że każdego dnia przeciętnie osoba poniżej 2 lat konsumuje 1 l, od 2 do 7 lat – 2 l, a powyżej 7 lat – 3 l wody. Jeśli zawartość jakiego izotopu w mierzonej wodzie nie była wyższa niż próg oznaczalności zastosowanej metody, to ten próg był wzięty do oszacowania dawek. Oszacowane roczne dawki obciążające wraz z poziomem dopuszczalny (linia przerywana) są przedstawione na figurze 1.

## OSZACOWANIE ROCZNYCH DAWEK OBCIĄŻAJĄCYCH

Dawkę otrzymywaną w wyniku wchłonięcia izotopów promieniotwórczych do organizmu w wyniku spożycia wody oblicza się według następującego wzoru:

$$D(g) = \left( \sum_{i=1}^N (A_i \cdot e_i(g)) \right) \cdot V$$

gdzie:

- $D(g)$  – obciążająca dawka skuteczna dla danej grupy wiekowej  $g$  [mSv];
- $A_i$  – aktywność  $i$ -tego izotopu w wodzie [mBq/l];
- $e_i(g)$  – obciążająca dawka skuteczna od wniknięcia  $i$ -tego izotopu o aktywności 1 mBq drogą pokarmową dla osób w grupie wiekowej  $g$  [mSv/mBq];
- $V$  – zakładane roczne spożycie wody [l/rok].

Indeks „ $i$ ” numeruje poszczególne izotopy. Znak  $\Sigma$  oznacza sumowanie po wszystkich  $N$  izotopach zawartych w wodzie, dla których znana jest ich aktywność.

Wartości  $e_i(g)$  można znaleźć w Rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (RRM, 2005). Na podstawie zmierzonych stężeń izotopów radu i uranu w próbkach wody, oszacowano obciążającą dawkę skuteczną w wyniku wchłonięcia tych izotopów dla wszystkich grup wiekowych zakładając, że każdego dnia przeciętnie osoba poniżej 2 lat konsumuje 1 l, od 2 do 7 lat – 2 l, a powyżej 7 lat – 3 l wody. Jeśli zawartość jakiego izotopu w mierzonej wodzie nie była wyższa niż próg oznaczalności zastosowanej metody, to ten próg był wzięty do oszacowania dawek. Oszacowane roczne dawki obciążające wraz z poziomem dopuszczalny (linia przerywana) są przedstawione na figurze 1.

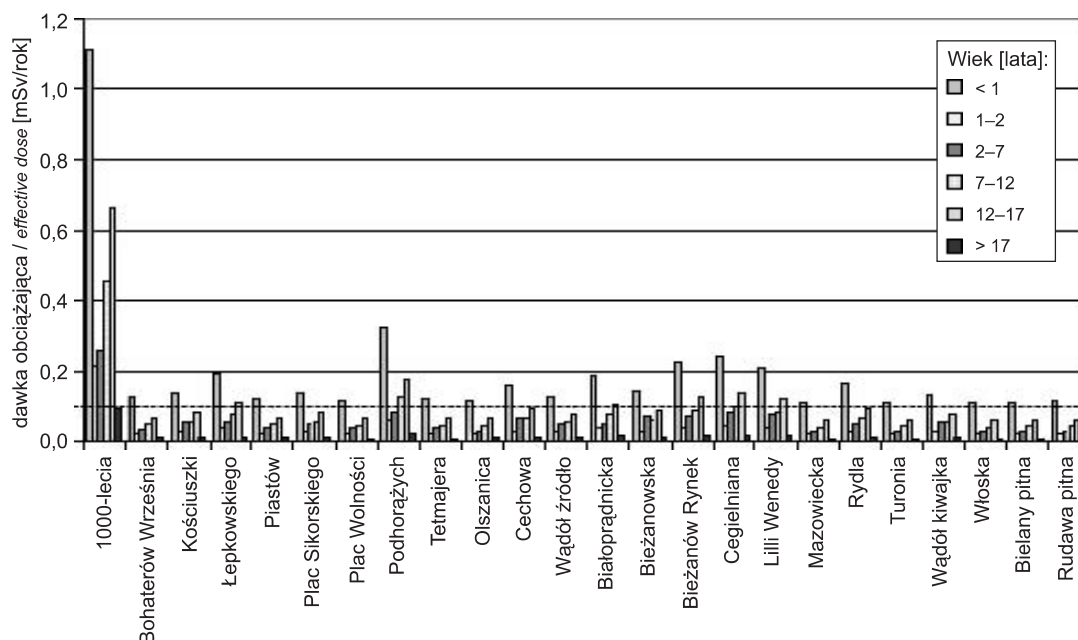


Fig. 1. Oszacowane dawki obciążające spowodowane wchłonięciem izotopów radu i uranu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) zawartych w wodach aglomeracji krakowskiej

Estimated effective doses caused by intake of radium and uranium isotopes ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) contained in drinking waters of Kraków agglomeration

Z figury 1 wynika że obciążające dawki dla wszystkich badanych wód i dla wszystkich grup wiekowych są niższe niż dopuszczalny poziom, z wyjątkiem wody ze studni arte-

zyjskiej na osiedlu Tysiąclecia w Nowej Hucie i grupy wiekowej poniżej 1 roku.

## WNIOSKI

Na ogół poziom naturalnej promieniotwórczości wód pitnych aglomeracji krakowskiej jest zadawalająco niski. Zawartości izotopów  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  w wodzie z wodociągu były poniżej granicy oznaczalności. W pozostałych wodach aktywności właściwe tych izotopów nie przekroczyły 100 mBq/l. Aktywności izotopów uranu wód aglomeracji krakowskiej były poniżej 40 mBq/l dla  $^{234}\text{U}$  uranu i 60 mBq/l dla  $^{238}\text{U}$  uranu. Obciążające dawki od większości badanych wód są niższe niż dopuszczalny poziom radiologiczny dla

wszystkich grup wiekowych (0,1 mSv/rok) z wyjątkiem grupy dzieci poniżej 1 roku życia. Wyjątek stanowią wody na osiedlu Tysiąclecia i przy ulicy Podchorążych.

**Podziękowanie.** Autorzy pracy pragną wyrazić serdeczne podziękowania prof. Andrzejowi Zuberowi za cenne uwagi w redagowaniu pracy.

Praca ta została sfinansowana z funduszy statutowych AGH nr 11.11.220.01 i 11.11.140.890.

## LITERATURA

- CHAU N.D., NIEWODNICZAŃSKI J., DORDA J., OCHOŃSKI A., CHRUSCIEL E., TOMZA I., 1997 – Determination of radium isotopes in mine waters through alpha- and beta activities measured by liquid scintillation spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **222**: 69–74.
- CHAU N.D., RAJCHEL L., CHRUSCIEL E., 2008 – Natural radioactivity and chemical properties of carbonate mineral waters in Polish Carpathians. LSC-2008, Book of abstracts. Paul Scherrer Institut PSI, Davos, Switzerland.
- CHOWANIEC J., FREIWALD P., PATORSKI R., WITEK K., 2007 – Kraków. *W: Wody podziemne miast wojewódzkich Polski* (red. Z. Nowickiego): 71–88. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- EC, 1998 – Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the Quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*. L 330/32.
- KLECZKOWSKI A.S., MYSZKA J., 1989 – Hydrogeologia regionu Krakowa. *W: Przewodnik LX Zjazdu Pol. Tow. Geol.*: 162–180. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KLECZKOWSKI A.S., 2003 – Kształtowanie chemizmu czwartorzędowych wód podziemnych Krakowa 1870–2002; tendencje dalszych zmian. Wyd. AGH, Kraków.
- OSZCZYPKO N., 1981 – Wpływ neogenskiej przebudowy Przedgórze Karpat na warunki hydrodynamiczne i hydrochemiczne zapadliska przedkarpackiego. *Biul. Inst. Geol.*, **325**: 5–87.
- RAJCHEL L., 1998 – Wody mineralne i akrotapegi Krakowa. *Prz. Geol.*, **46**, 11: 1139–1145.
- RRM, 2005 – Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego. *Dz.U.* Nr 20, poz. 168.
- SKWARZEC B., 1997 Radiochemical methods for the determination of polonium, radiolead, uranium and plutonium in environmental samples. *Chem. Anal.*, **42**: 107–113.
- TOMZA I., 1977 Determination of low concentrations of radium isotopes in mineral waters. *W: Low Radioactivity Measurements and Application*: 387–390. Conference. Slovenské Pedagogické Nakladateľstvo, Bratislava.
- ZUBER A., WEISE S., MOTYKA J., OSENBRÜCK K., RÓŻAŃSKI K., 2004 – Age and flow pattern of groundwater in a Jurassic limestone aquifer and related Tertiary sands derived from combined isotope, noble gas and chemical data. *J. Hydrology*, **286**: 87–112.

## SUMMARY

Kraków city is one of the largest cities of Poland with the population of c.a. 1 million, so the supply of drinking water to this agglomeration is a very important issue. Almost the whole of tap water (98 percent) in Kraków is originated from surface sources: Raba, Rudawa and Sand rivers, the rest from groundwater (Chowaniec *et al.*, 2007). Additionally, there are a few tens of artesian dig wells in the region, which exploit groundwater from Jurassic, Cretaceous, Miocene and

Quaternary limestone, sandstone or conglomerate formations (Kleczkowski, Myszk, 1989; Rajchel, 1998; Kleczkowski, 2003). Most of the waters occurring in the Jurassic limestone formations can be classified to the glacial ones and they are sufficiently well isolated from anthropogenic pollution (Zuber *et al.*, 2004). On the other hand, the mineralization and natural radioactivity of water generally

increases with the depth to the water reservoir formation (Oszczypko, 1981; Chau *et al.*, 2008).

The quality of groundwater in the Kraków region is varied and depends on both the geological structure and conditions prevailing at the well site (Chowaniec *et al.*, 2007). One of the water quality parameters is the radioactivity. According to the European Commission directive respected by the Polish Government, regarding the radiological criteria, a given water can be classified as drinking water if the annual effective dose caused by intake of radioactive elements contained in the water is lower than the permissible level (0.1 mSv), assuming that every person drinks 2 liters per day (EC, 1998).

Radioactivity of water is principally due to the present of natural radioactive isotopes such as  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$ . The concentrations of these isotopes were measured in 26 water samples (8 samples collected from spa, 4 from artesian wells, 10 from dip wells and 4 from water plants in Kraków). Preparation and measurements of the water samples were performed after the procedures described in papers

by Tomza, 1977, Chau *et al.*, 1997 and Skwarzec, 1997. The results of analyses are presented in [Table 1](#).

The concentrations of uranium and radium isotopes in the investigated water samples are low enough (from a few tenth mBq/l to 60 mBq/l for uranium isotopes and from a few mBq/l to 100 mBq/l for radium isotopes).

The radioactivity data and the values of the committed effective doses caused by intake of one unit of activity of different radioactive isotopes for people of different age groups in the legislation concerning the dose limit of the ionization radiation issued by the Polish Government (RRM, 2005), the annual effective doses caused by intake of the uranium and radium isotopes contained in the waters for people of all age groups were estimated, assuming that a person aged below 2 years consumes 1 liter per day, from 2 to 7 years – 2 liters and older than 7 years – 3 liters per day. The estimated annual effective doses are presented in [Figure.1](#). It shows that the estimated doses for all groups of ages are lower than 0.1 mSv, excluding babies younger than 1 year old.