



Stężenie radonu (Rn-222) w powietrzu w środkowej Polsce na tle warunków meteorologicznych*

*Radon (Rn-222) level in the air over central Poland
with reference to meteorological conditions*

AGNIESZKA PODSTAWCZYŃSKA

Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Łódzki,
90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88; apodstaw@geo.uni.lodz.pl

Zarys treści. W pracy przedstawiono zmienność stężenia radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza na stacji miejskiej (centrum Łodzi) i zamiejskiej (Ciosny, 25 km na północ od Łodzi) na tle temperatury powietrza, różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m, prędkości wiatru i strumienia ciepła głębowego w latach 2008–2010. Przeanalizowano warunki pogodowe w okresie największych różnic stężenia Rn-222 między stacjami.

Słowa kluczowe: radon, warunki meteorologiczne, Łódź, stacja zamiejska.

Wstęp

Spośród naturalnych radionuklidów powszechnie występujących w środowisku, radon (Rn-222) jest największym źródłem promieniowania jonizującego dla mieszkańców Ziemi. Według szacunku Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego – UNSCEAR (2000) ten naturalny gaz promieniotwórczy ma około 50% udziału w efektywnej dawce rocznej promieniowania jonizującego. Według Raportu Państwowej Agencji Atomistyki statystyczny mieszkaniec Polski otrzymał w 2010 r. sumaryczną dawkę promieniowania jonizującego ze źródeł naturalnych i sztucznych o wartości 3,3 mSv, z tego na radon przypadło 36,4% (1,2 mSv). Radon migruje do atmosfery z gruntu, gdzie powstaje w wyniku rozpadu radu (Ra-226), pochodnej uranu. Drugorzędne źródła Rn-222 w atmosferze to: gaz ziemny, spalanie węgla, wody powierzchniowe, materiały budowlane i odpady antropogeniczne z przeróbki surowców mineralnych (Bem, 2005; Plewa i Plewa, 1999). Rn-222 jest gazem bezbarwnym, bez-

* Artykuł powstał częściowo w ramach realizacji projektu badawczego MNiSW nr N306 015 32/1011. Autorka składa podziękowania zespołowi Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN w Krakowie za uwagi metodyczne dotyczące pomiarów Rn-222 i kontroli jakości danych.

wonnym, 7,6 razy cięższym od powietrza, o długim czasie połowicznego rozpadu, tj. 3,8 dnia, co sprzyja swobodnej migracji między lito-, hydro- i atmosferą. Warunki meteorologiczne mają wpływ na szybkość transportu Rn-222 w glebie, ekshalację do atmosfery (uwalnianie się radionuklidu z gleby do atmosfery) i jego stężenie w dolnych warstwach troposfery (UNSCEAR, 2000; Baciū, 2005; Janik, 2005; Fujiyoshi i inni, 2006). Duży ciężar właściwy Rn-222 powoduje, że jest gromadzony m.in. w obniżeniach terenu, jaskiniach, tunelach oraz piwnicach budynków, do których przedostaje się przez nieszczelności w fundamentach. Rn-222 emituje w procesie rozpadu cząstki α , a pochodne radonu są ciałami stałymi (α -promieniotwórcze izotopy polonu Po-218, bizmutu Bi-214, ołowiu Pb-214). Pochodne radonu tworzą w powietrzu radioaktywny aerozol, który wdychany i osadzony w układzie oddechowym może stanowić źródło zagrożenia radiologicznego. Rn-222 i jego pochodne mogą być czynnikiem ryzyka chorób nowotworowych płuc w przypadku długoletniego oddziaływania wysokiego stężenia oraz interakcji z innymi czynnikami kancerogennymi, tj. azbestem, dymem tytoniowym (efekt synergetyczny) (Szot, 1993). Aktywność promieniotwórczą Rn-222 w powietrzu opisuje stężenie promieniotwórcze wyrażone w $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Bq – bekerel). 1 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ oznacza 1 przemianę jądrową w ciągu 1 sekundy w 1 m^3 powietrza. Dla całej kuli ziemskiej średnie stężenie Rn-222 w dolnej troposferze nad lądami wynosi 10 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i zmienia się od 1 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w obszarach nadmorskich do powyżej 100 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ na obszarach oddalonych od akwenów, gdzie występuje koncentracja radu, prekursora radonu, w skałach litosfery (UNSCEAR, 2000). W Polsce przeciętne stężenie Rn-222 w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem wynosi od 1,0 do 11,9 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (za Przylibskim, 2005). W powietrzu glebowym stężenie Rn-222 jest 1000-krotnie wyższe niż w atmosferze i w Polsce – z wyłączeniem Dolnego Śląska – wynosi od 40 000 do 80 000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (*Radiologiczny Atlas Polski*, 2005). Przeciętne stężenie Rn-222 w budynkach dla całej kuli ziemskiej wynosi 40 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, a rekordowo wysokie wartości, tj. 85 000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ zarejestrowano w Szwecji (UNSCEAR, 2000). W Polsce średnia krajowa jego stężenia w budynkach wynosi 49 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i zmienia się od 21 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w woj. zachodniopomorskim do 70 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w woj. małopolskim. Średni poziom stężenia Rn-222 w woj. łódzkim wynosi 43 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Rekordowo wysokie stężenie Rn-222 w budynkach w Polsce, zarejestrowano m.in. w okolicy Jeleniej Góry (15 000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), w Świeradowie-Zdroju (5723 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), okolicy Krakowa (2500 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) i na Suwalszczyźnie (2178 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) (Janik, 2005; Karpińska, 2007).

Głównym celem opracowania jest prezentacja dynamiki stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza w warunkach zewnętrznych w centrum Łodzi i na terenie zamiejskim, w odniesieniu do zmienności wybranych elementów meteorologicznych, tj. temperatury powietrza, prędkości wiatru, strumienia ciepła glebowego i różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m.

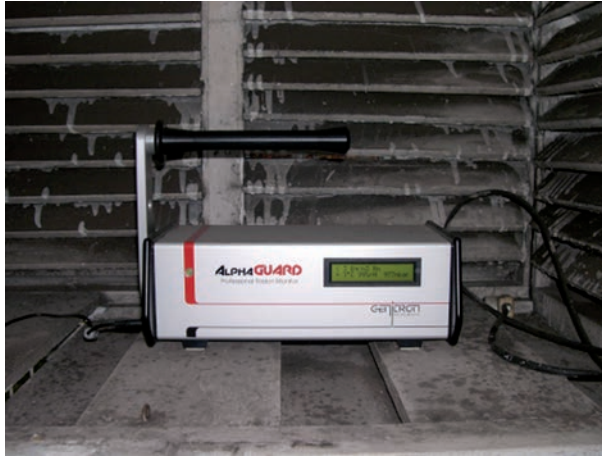
Materiał źródłowy i metoda opracowania

Materiał źródłowy wykorzystany w pracy – to wyniki pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu oraz elementów meteorologicznych (temperatury powietrza na wysokości 2,0 i 0,2 m npg., prędkości wiatru, ciśnienia atmosferycznego, strumienia ciepła glebowego rejestrowanych synchronicznie w latach 2008–2010 na 2 stanowiskach. Pierwsze – Miejska Stacja Meteorologiczna Katedry Meteorologii Klimatologii UŁ (MSM) znajdowało się w centrum Łodzi (51°46'10"N, 19°27'55"E), drugie – stacja hydrologiczno-meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ, na terenie rolniczym w miejscowości Ciosny (51°55'24"N 19°24'38"E), gmina Zgierz, 25 km na północ od Łodzi. Do pomiarów stężenia Rn-222 zastosowano metodę aktywną z wykorzystaniem automatycznej komory jonizacyjnej Alpha GUARD® PQ2000 Pro firmy Genitron Instruments GmbH (ryc. 1). Mierniki Rn-222 umieszczono w klatkach meteorologicznych na wysokości 2,0 m npg. i pracowały one w trybie dyfuzyjnym, pobierając około 0,6 l powietrza. Głównym elementem komory jonizacyjnej jest umieszczona w jej środkowej części elektroda, która rejestruje w sposób ciągły impulsy elektryczne generowane przez promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu (rejestracja prądu jonizacji) – rycina 1B. Za interwał czasowy uśredniania stężenia Rn-222 przyjęto 60 min. Miernik Alpha GUARD® PQ2000 Pro, oprócz stężenia Rn-222 w zakresie 2–2 000 000 Bq·m⁻³, rejestruje także wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego. W opracowaniu dokonano analizy częstości godzinnych wartości stężenia Rn-222 rejestrowanego w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 oraz rocznej zmienności średniego i najwyższego dobowego stężenia Rn-222, a także zmian rytmu dobowego koncentracji Rn-222 na wysokości 2,0 m. Porównano średni dobowy przebieg stężenia promieniotwórczego radonu ze zmiennością dobową temperatury powietrza na wysokości 2,0 m, różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m, prędkości wiatru oraz strumienia ciepła glebowego. W opracowaniu strumień przepływu ciepła w głąb gruntu opisują wartości ujemne (pora dzienna), a dopływ ciepła z gruntu do powierzchni czynnej – wartości dodatnie (pora nocna). Szczegółowo przeanalizowano zmienność stężenia Rn-222 na tle zmienności elementów meteorologicznych i sytuacji synoptycznej w dniach 1.06–3.06.2008, kiedy to między Łodzią i Ciosnami zanotowano bardzo duże różnice jego aktywności promieniotwórczej (30 Bq·m⁻³).

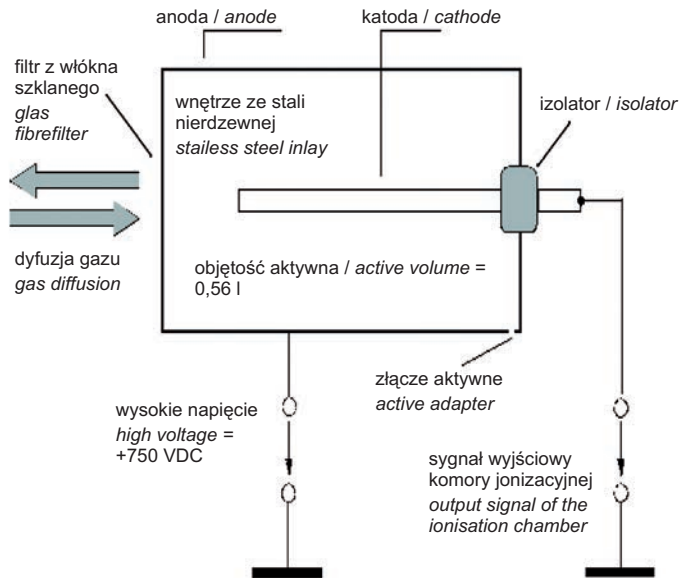
Rezultaty badań i dyskusja wyników

Rozkład częstości klas stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza w centrum Łodzi i na stacji zamiejskiej w Ciosnach wskazuje na największy udział wartości najniższych, tj. z przedziału 0–5 Bq·m⁻³ – odpowiednio 66%

A



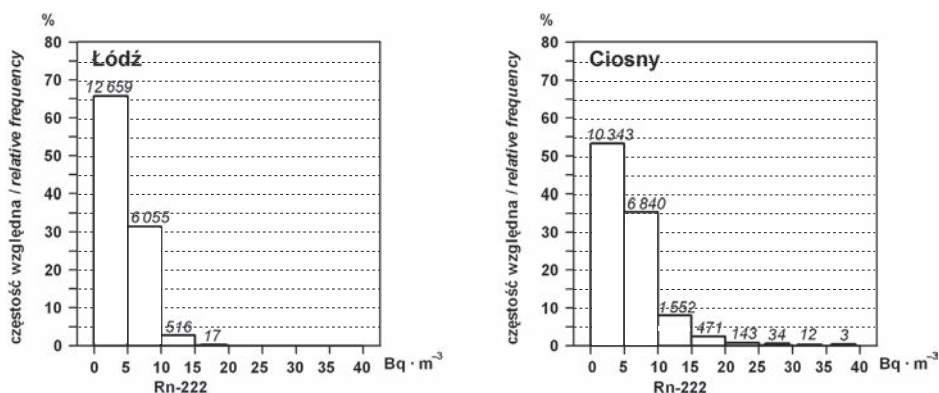
B



Ryc. 1. A – Automatyka komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO firmy Genitron Instruments GmbH w klatce meteorologicznej (fot. A. Podstawczyńska); B – Schemat komory jonizacyjnej (opracowanie własne na podstawie: Genitron..., 1998)

A – Automatic ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO by Genitron Instruments GmbH in meteorological box (Photo: A. Podstawczyńska); B – Scheme of ionisation chamber (author's own work on the base on: Genitron..., 1998)

i 53% (ryc. 2). Wyniki pomiarów z zakresu $0-10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ stanowią w Łodzi aż 97%, a w Ciosnach 88%. Najwyższe zarejestrowane stężenie $Rn-222$ na badanych stacjach nie przewyższało $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w Łodzi (9.11.2008, godz. 10.00) i $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w Ciosnach (31.05.2009, godz. 8.00) – rycina 3. Przeciętne stężenie tego radionuklidu na badanych stacjach za okres 2008–2010 jest typowe dla obszarów kontynentalnych – w Łodzi wynosi $4,6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, a poza miastem $5,8 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. W przebiegu rocznym średnia dobowa wartość stężenia $Rn-222$ zmieniała się od 3 do $7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w centrum Łodzi i od 3 do $11 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w Ciosnach. Na obu stacjach najniższe stężenie dobowe $Rn-222$ co roku rejestrowano w marcu, a wzrost stężenia promieniotwórczego $Rn-222$ obserwowano w Łodzi jesienią, a na stacji zamiejskiej latem i jesienią (ryc. 3). Podobny rytm zmian rocznych stężenia $Rn-222$ z minimum wiosną (kwiecień i maj) oraz maksimum jesienią (październik i listopad) zaobserwowano w Pekinie (Zhang i inni, 2009).

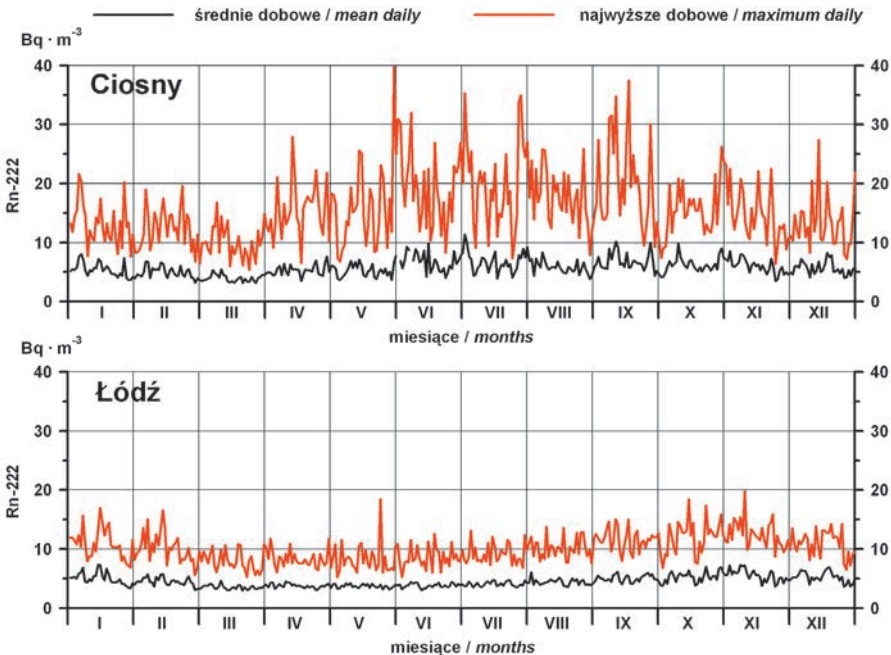


Ryc. 2. Histogram częstości godzinnej stężenia $Rn-222$ w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Nad słupkami liczba przypadków. Opracowanie własne

Histogram of frequency of hourly $Rn-222$ concentration in Łódź and Ciosny in the period 2008–2010. Number of cases above the bars. Authors' own elaboration

Stężenie $Rn-222$ na stacjach w Łodzi i Ciosnach cechuje się dobowym cyklem zmienności potwierdzonym przez wielu autorów (m.in. Kopcewicz, 1974; Porstendörfer i inni, 1991; Winkler i inni, 2001; Baciú, 2005; Zhang, 2009). Największe stężenie promieniotwórcze $Rn-222$ przypada na godziny poranne (3.00 do 8.00), a najmniejsze – na popołudniowe i przedwieczorne (14.00 do 19.00) – rycina 4. Rytm dobowy występuje we wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy, co znajduje uzasadnienie we wzroście prędkości wiatru makroskalowego w Polsce, związanej z aktywnością cyklonalną w miesiącach zimowych. Generalnie na stacji zamiejskiej zakres zmienności dobowej stężenia $Rn-222$ jest większy niż na stacji w centrum Łodzi, zwłaszcza latem (ryc. 4).

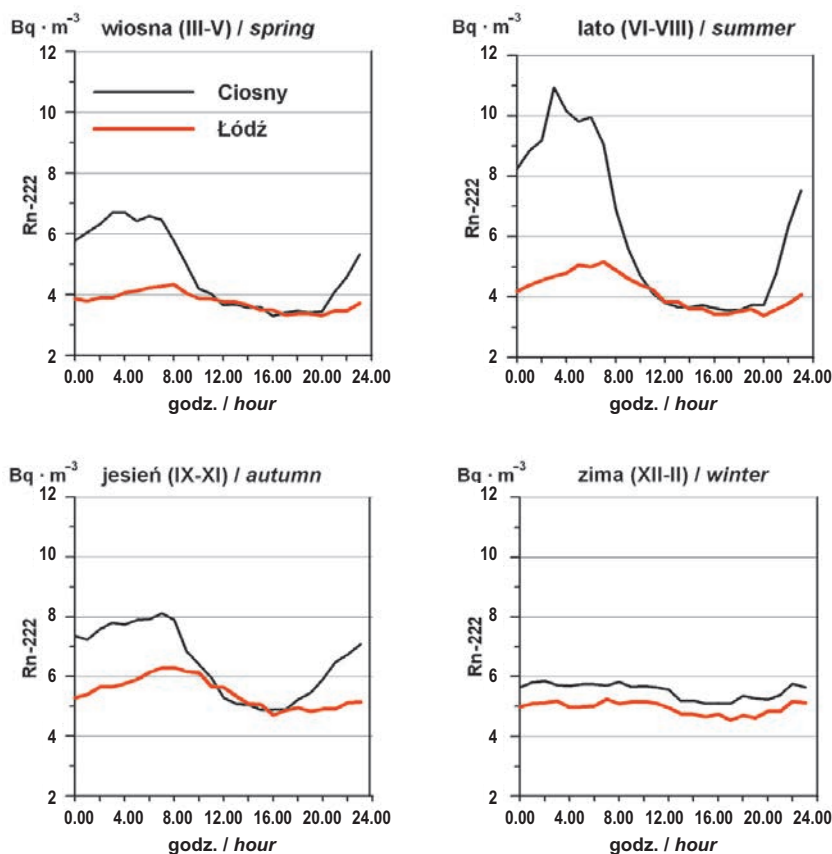
Największe różnice stężenia Rn-222, wyższe na stacji w Ciosnach, są w godzinach porannych. Wzrost koncentracji Rn-222 za miastem pojawia się już od godz. 20.00, wraz z intensywnym wychładzaniem gruntu i formowaniem nocnej inwersji temperatury. W czasie rozwoju tzw. dziennej warstwy mieszania (od około godz. 10.00 do 20.00) różnice stężenia promieniotwórczego Rn-222 na obu stacjach zanikają (ryc. 4).



Ryc. 3. Roczny przebieg najwyższego i średniego dobowego stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Opracowanie własne
Annual course of maximum and mean daily Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in the period 2008–2010. Authors' own elaboration

Analizując przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle zmian elementów meteorologicznych stwierdzono odwrotną zależność stężenia z temperaturą powietrza i prędkością wiatru opisywaną w literaturze m.in. przez A.C. Baciū (2005) oraz R. Winklera i innych (2001) – rycina 5. Quasi-synchroniczny przebieg wartości stężenia Rn-222 zaobserwowano w stosunku do przebiegu różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m oraz strumienia ciepła glebowego (ryc. 5). Zjawisko inwersji temperatury w przygrunтовой warstwie powietrza i związany z nią wzrost stabilności atmosfery hamującej pionową wymianę powietrza i zanik turbulencji stwarza warunki do koncentracji Rn-222. Istotna

rola inwersji temperatury powietrza jako „pułapki” dla radonu w dolnej troposferze była już akcentowana przez takich autorów jak T. Kopcewicz (1968, 1974), J. Porstendörfer i inni (1991), T. Kataoka i inni (1992), C. Dueñas i inni (1996), C. Perrino i inni (2001), S. Sesana i inni (2003), m.in. w badaniach

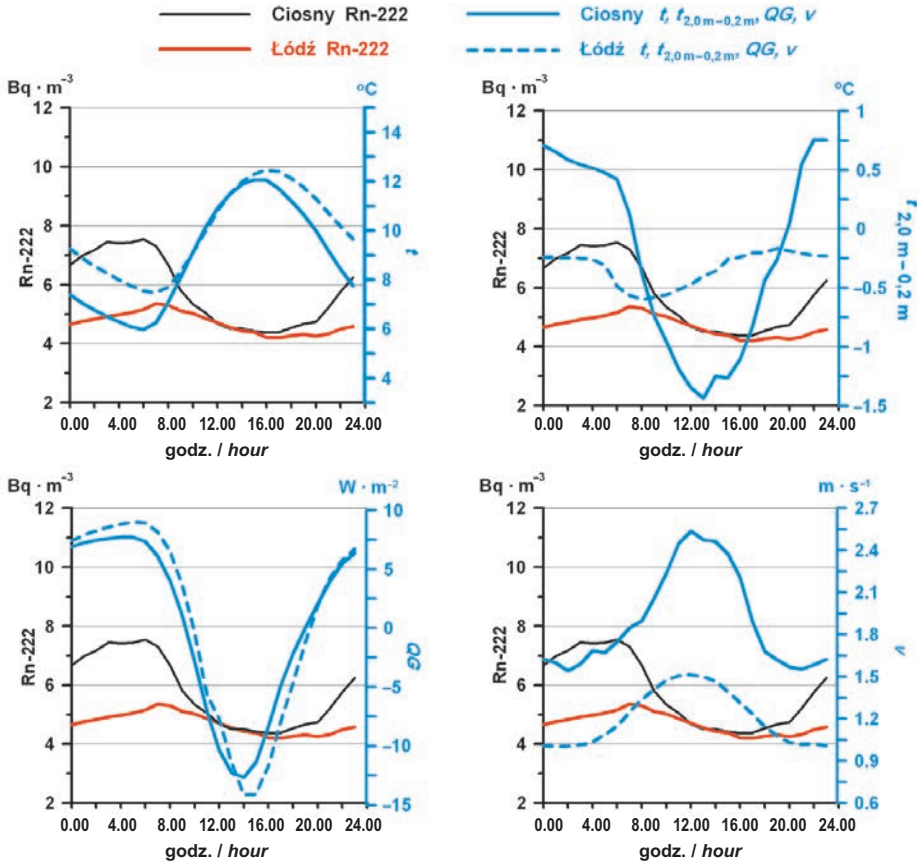


Ryc. 4. Średni przebieg dobowy stężenia $Rn-222$ w powietrzu 2 m npg. w poszczególnych porach roku w Łodzi i w Ciosnach w latach 2008–2010. Opracowanie własne

Mean daily course of $Rn-222$ concentration in the air at the height 2 m above the ground in particular seasons in Łódź and Ciosny in the period 2008–2010. Authors' own elaboration

nad wykorzystaniem radonu jako znacznika dyspersji zanieczyszczeń oraz znacznika procesów zachodzących w warstwie granicznej atmosfery (rozwoj turbulencji, stany równowagi termodynamicznej atmosfery). Związek stężenia $Rn-222$ w przygruntowej warstwie powietrza ze strumieniem ciepła glebowego dotychczas nie był udokumentowany w literaturze – ani krajowej, ani zagranicznej. Przychód ciepła z gruntu do atmosfery (strumień dodatni) jest czynni-

kiem sprzyjającym migracji gazów (w tym Rn-222) w glebie ku powierzchni ziemi, teoretycznie intensyfikując ekshalację Rn-222 do atmosfery (Janik, 2005; Mazur, 2008). Transport ciepła od powierzchni gruntu w głąb hamuje przepływ gazów w glebie, zmniejszając koncentrację Rn-222 w przypowierzchniowej



Ryc. 5. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m png. na tle dobowego przebiegu temperatury powietrza (t), różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m ($t_{2,0m}-t_{0,2m}$), strumienia ciepła glebowego (QG) i prędkości wiatru (v) w Łodzi i w Ciosnach w latach 2008–2010. Opracowanie własne

Mean daily course of Rn-222 concentration in the air at the height 2 m above the ground with the reference to daily course of air temperature (t), air temperature difference in the air stratum 2.0–0.2 m above the ground ($t_{2,0m}-t_{0,2m}$), soil heat flux (QG) and wind velocity (v) in Łódź and Ciosny in the period 2008–2010. Authors' own elaboration

warstwie gruntu i ekshalację do atmosfery. Strumień ciepła glebowego może być pośrednim wskaźnikiem tempa ekshalacji Rn-222, a także daje pogląd na warunki mikroklimatyczne w warstwie przygruntowej powietrza, wskazując na

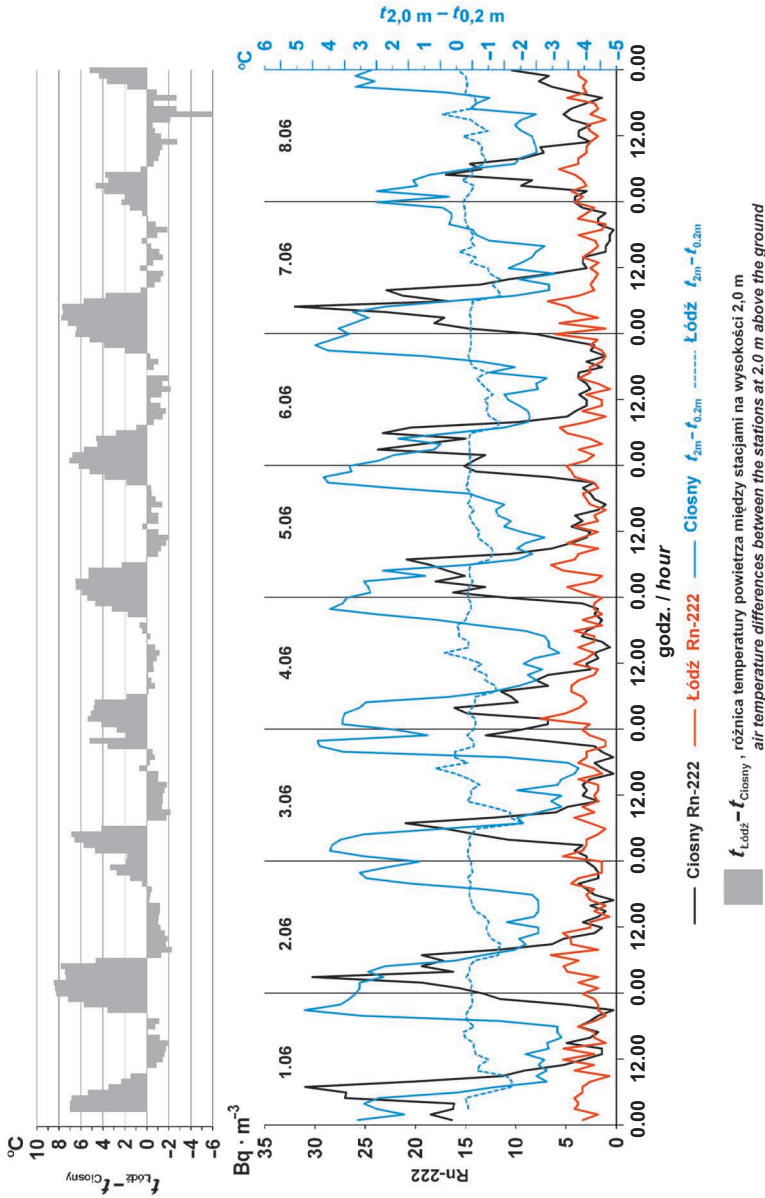
stopień nagrzania lub wychłodzenia powierzchni gruntu, nad którą ustawiony jest miernik radonu. To były główne przesłanki do poszukiwań związku tego elementu meteorologicznego ze stężeniem Rn-222 w przy powierzchniowej warstwie atmosfery.

Kolejnym wątkiem badawczym jest analiza różnic stężenia Rn-222 między stacjami. Ujemne wartości różnicy stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach z maksimum $35 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ stanowią 60% przypadków, z tego 50% udział mają wartości $-5 \div 0 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. W przypadku wartości dodatnich różnic frekwencja z przedziału $0-5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ wynosi 39%, a pozostałe 1% stanowią różnice mniejsze od $15 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Wyższa koncentracja Rn-222 na stacji w Ciosnach przeciętnie o $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w stosunku do centrum Łodzi pojawia się od kwietnia do września w warunkach pogody radiacyjnej, tj. bezchmurnej i z wiatrem makroskalowym o prędkości $<2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Taki typ pogody sprzyja występowaniu silnych inwersji przygruntowych za miastem, a w mieście wykształceniu się intensywnej wyspy ciepła. Przykład okresu ze znacznym wzrostem stężenia Rn-222 za miastem na tle warunków termicznych przedstawia rycina 6. W badanym okresie największa różnica stężenia między Łodzią a stacją w Ciosnach osiągnęła $30 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (2.06.2008, godz. 3.00) i wystąpiła podczas maksimum intensywności miejskiej wyspy ciepła, tj. przy $8,5^\circ\text{C}$. Za miastem występowała inwersja temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m z maksimum 5°C na 1,8 m i zanik wiatru (cisza). W tym czasie w centrum Łodzi obserwowano wzrost prędkości wiatru, a nadwyżka ciepła intensyfikowała pionową wymianę powietrza, niesprzyjającą zarówno powstawaniu inwersji przygruntowej (różnica temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m zmieniała się od $-2,0^\circ\text{C}$ do $0,7^\circ\text{C}$), jak i koncentracji radonu – rycina 6.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zmienność stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza w Łodzi i na stacji zamiejskiej w Ciosnach w latach 2008–2010. Sformułowano następujące wnioski.

1. Największy udział w wynikach pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem mają wartości $0-10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, tj. 97% w Łodzi i 88% w Ciosnach.
2. Średnie dobowe stężenie Rn-222 cechuje się małą zmiennością roczną – $3-7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w Łodzi i $3-11 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ poza miastem, z minimum wiosną i maksimum jesienią w mieście oraz odpowiednio latem i jesienią poza miastem.
3. Maksymalne dobowe stężenia Rn-222 są wyższe w Ciosnach niż w Łodzi i wynoszą przeciętnie odpowiednio $16 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.
4. Stężenie Rn-222 w powietrzu cechuje wyraźny rytm dobowy z maksimum w godz. porannych i minimum w godz. popołudniowych, we wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy. Rytm dobowy zmian poziomu stężenia pro-



Ryc. 6. Przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz pionowych różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m npg. w Łodzi i Ciosnach w okresie 1.06–8.06.2008. Opracowanie własne

The course of mean hourly values of Rn-222 concentration in relation to air temperature differences between the stations and vertical air temperature differences in the air stratum 2.0–0.2 m above the ground in Łódź and Ciosny in the period 1.06–8.06.2008. Authors' own elaboration

- mieniotwórczego radonu wynika z procesów zachodzących w warstwie granicznej – występowania stabilnej równowagi atmosfery w godzinach nocnych i porannych oraz rozwoju tzw. dziennej warstwy mieszania.
5. Amplituda dobowa stężenia $Rn-222$ jest wyższa za miastem, z maksimum latem. Różnice amplitudy dobowej stężenia $Rn-222$ między stacjami zanikają w zimie w związku ze wzrostem prędkości wiatru makroskalowego o tej porze roku.
 6. Od około godz. 20.00 obserwowano wzrost stężenia $Rn-222$ w Ciosnach w stosunku do centrum Łodzi z maksimum w godzinach porannych. W ciągu dnia (10.00–20.00) poziom stężenia promieniotwórczego na stacjach jest podobny. Zwiększonej koncentracji $Rn-222$ za miastem sprzyjały silne nocne inwersje przygruntowe temperatury powietrza.
 7. Zmienność stężenia $Rn-222$ wykazała odwrotną zależność w stosunku do temperatury powietrza i prędkości wiatru oraz quasi-synchroniczność w stosunku do różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m i strumienia ciepła glebowego.
 8. Stężenie $Rn-222$ w dolnej troposferze jest zdeterminowane jednoczesnym oddziaływaniem wielu czynników, m.in. szybkością ekshalacji oraz intensywnością dyfuzji i turbulencji w atmosferze, kształtujących poziom koncentracji tego gazu przy gruncie. To ogranicza możliwość jednoznacznej oceny wpływu poszczególnych czynników meteorologicznych na stężenia $Rn-222$, obliuguje do dużej ostrożności interpretacyjnej oraz motywuje do rozszerzenia dalszych badań np. o pomiary ekshalacji.

Piśmiennictwo

- Allen L., Sextro R., Sextro R.G., 1997, *Radon entry into building driven by atmospheric pressure fluctuations*, Environmental Science & Technology, 31, 6, s. 1742–1748.
- Baciu A.C., 2005, *Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania)*, Journal of Environmental Radioactivity, 83, 2, s. 171–189.
- Bem H., 2005, *Radioaktywność w środowisku naturalnym*, Polska Akademia Nauk, Oddział w Łodzi, Łódź.
- Dueñas C., Perez M., Fernandez C., Carretero J., 1996, *Radon concentrations in surface air and vertical atmospheric stability of the lower atmosphere*, Journal of Environmental Radioactivity, 31, 1, s. 87–102.
- Fujiyoshi R., Sakamoto K., Imanishi T., Sumiyoshi T., Sawamura S., Vaupotic J., Kobal I., 2006, *Meteorological parameters contributing to variability in ^{222}Rn activity concentrations in soil gas at a site in Sapporo, Japan*, Science of the Total Environment, 370, 1, s. 224–234.
- Genitron Instruments GmbH, 1998, *User manual portable radon monitor AlphaGUARD*, Publishers Genitron Instruments GmbH, Frankfurt, Germany, 2006, 12.
- Janik M., 2005, *Przenikanie radonu z gruntu do budynku. Modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych*, Raport Nr 1966/AP, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, www.ifj.edu.pl/reports/2005.html (wrzesień 2005).

- Janik M., Kozak, K., Mazur, J., Haber R., 2007, *Radon w budynkach – źródła i sposoby zabezpieczeń*, Builder, 2, s. 76–79.
- Karpińska M., 2007, *Zagrożenie w budynkach mieszkalnych*, Builder, 8, s. 84–86.
- Karpińska M., Mnich Z., Kapała J., Antonowicz K., 2004, *Seasonal changeability of indoor radon concentrations in one-family house*, Nukleonika, 49, 1, s. 33–36.
- Kataoka T., Tsukamoto O., Younoki E., Michihiro K., Sugiyama H., Shimizu M., Mori T., Sahashi K., Fujii S., 1992, *Variation of ^{222}Rn concentration in outdoor air due to variation of the atmospheric boundary layer*, Radiation Protection Dosimetry, 45, 1/4, s. 403–406.
- Kopcewicz T., 1968, *O wpływie rodzaju mas powietrza na koncentrację naturalnych radionuklidów – pochodnych radonu i toronu – w przyziemnej warstwie powietrza*, Przegląd Geofizyczny, 13 (21), 4, s. 33–344.
- , 1974, *O zmianach promieniotwórczości naturalnej powietrza*, Przegląd Geofizyczny, 19 (27), 3–4, s. 181–203.
- Marley F., 2001, *Investigation of the influence of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings*, Atmospheric Environment, 35, 31, s. 5347–5360.
- Mazur J., 2008, *Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu a parametry meteorologiczne i własności gleby*, Raport Nr 2014/AP, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, <http://www.ifj.edu.pl/publ/reports/2008/2014.pdf> (wrzesień 2008).
- Perrino C., Pietrodangelo A., Febo A., 2001, *An atmospheric stability index based on radon progeny measurements for evaluation of primary urban pollution*, Atmospheric Environment, 35, 2, s. 5235–5244.
- Plewa M., Plewa S., 1999, *Radon w środowisku naturalnym i jego migracja do budynków mieszkalnych*, Prace Geologiczne, 145, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie.
- Porstendörfer J., Butterweck G., Reineking A. 1991, *Diurnal variation of concentration of radon and its short-lived daughters in the atmosphere near the ground*, Atmospheric Environment, 25, 3–4, s. 709–713.
- Przylibski T.A., 2005, *Radon składnik swoisty wód leczniczych Sudetów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Radiologiczny Atlas Polski 2005, 2006*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, A.P.A. JAGART, Warszawa.
- Sesana S., Caprioli E., Marcazzan G.M., 2003, *Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere*, Journal of Environmental Radioactivity, 65, 2, s. 147–160.
- Szot Z., 1993, *Rad i radon w środowisku oraz skutki ich wnikięcia do organizmu człowieka*, Problemy Techniki Jądrowej, 36, 1–2, s. 7–16.
- UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, report, *Sources and effects of ionizing radiation*, United Nations, New York. <http://www.unece.org/docs/reports/gareport.pdf> (12.08.2011).
- Winkler R., Ruckerbauer F., Trautmannsheimer M., Tschiersch J., Karg E., 2001, *Diurnal and seasonal variation of the equilibrium state between short-lived radon decay products and radon gas in the ground-level air*, Radiation Environment Biophysic, 40, 2, s. 115–123.
- Zhang Liang, Zhang Liguo, Guo Qiuju, 2009, *A long-term investigation of the atmospheric radon concentration in Beijing, China*, Journal of Radiological Protection, 29, 2, s. 263–268.

[Wpłynęło: styczeń; poprawiono: czerwiec 2012 r.]

AGNIESZKA PODSTAWCZYŃSKA

RADON (RN-222) LEVEL IN THE AIR OVER CENTRAL POLAND
WITH REFERENCE TO METEOROLOGICAL CONDITIONS

The objective of the work described here was to investigate the temporal variability to outdoor radon (Rn-222) levels registered in the 2008–2010 period at the center of the Polish city of Łódź and in the village of Ciosny situated in a rural area 25 km to the north of Łódź, with reference to meteorological elements (i.e. air temperature, temperature differences in the air stratum 2.0–0.2 m above the ground, wind speed, soil heat flux) with special consideration to urban-rural differences. The indoor Rn-222 concentration in the detached house (on the ground floor) in Łódź in September 2007 in relation to air temperature, air pressure and macroscale weather conditions were also analyzed in the study. Continuous measurements of Rn-222 concentration (in 60-min intervals) were performed at a height 2 m above the ground using AlphaGUARD® PQ2000PRO (ionization chamber) and the meteorological elements were recorded simultaneously (Fig. 1). The range of 0–10 Bq·m⁻³ dominated in frequency distribution of Rn-222 levels in Łódź and Ciosny, 97% and 88% respectively (Fig. 2). Daily average of Rn-222 levels varied from 3 to 7 Bq·m⁻³ (Łódź) and 3–11 Bq·m⁻³ (Ciosny) in annual course with minimum in spring and maximum in autumn (Łódź) and summer and autumn (Ciosny). The mean daily maximum of Rn-222 concentration was higher at rural station than in the city amounted to 16 Bq·m⁻³ and 10 Bq·m⁻³ respectively. The daily pattern of Rn-222 concentration at two stations was revealed in all seasons except winter, with maximum in an early morning maximum and a minimum in the afternoon. In winter, radon levels at the urban and rural stations did not vary significantly over diurnal cycle because of strong atmospheric mixing. Rn-222 concentration increased at night stronger at rural station than in Łódź due to the formation of a surface-based inversion. Increase of turbulence in the daytime strongly reduced Rn-222 concentration at both stations. The daily course of Rn-222 concentration was characterized by the opposite pattern with air temperature and wind speed. The increase of Rn-222 concentration was observed together with the increase of soil heat flux and temperature differences in the air stratum 2.0–0.2 m.

