

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 27.03.2012 r.
Zaakceptowano 29.03.2012 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ZMIENNOŚĆ STĘŻENIA RADONU (Rn-222) W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA NA TŁE WARTOŚCI STRUMIENIA CIEPŁA GLEBOWEGO

Agnieszka PODSTAWCZYŃSKA ^{ABCDEF}

Uniwersytet Łódzki, Katedra Meteorologii i Klimatologii

Streszczenie

Celem opracowania jest znalezienie związku między stężeniem radonu ($\rho_{\text{Rn-222}}$), rejestrowanym w powietrzu 2 m nad gruntem, i strumieniem ciepła glebowego (QG). Pomiar $\rho_{\text{Rn-222}}$ wykonywano co 1 godz. za pomocą automatycznej komory jonizacyjnej Alpha GUARD® PQ2000 Pro. Synchronicznie do stężenia radonu w latach 2008–2010 mierzono QG za pomocą czujnika typu HFP01 Heat Flux Plate firmy Cambell Scientific Ltd. w centrum Łodzi oraz na stacji zamiejskiej Ciosny (teren rolniczy, 25 km na północ od Łodzi). Badane zmienne cechuje quasi-synchroniczny przebieg doby z maksimum w godzinach nocnych i minimum w godzinach popołudniowych. Związek $\rho_{\text{Rn-222}}$ i QG opisano modelem funkcji ekspozycyjnej. Na stacji Ciosny miesiące od III do XI cechują się bardzo wysokim stopniem dopasowania danych modelowanych do danych pomiarowych stężenia radonu w świetle indeksu zgodności Willmotta. Dla stacji w Łodzi uzyskano gorsze rezultaty, stosując model $\rho_{\text{Rn-222}}$ w którym wykorzystuje się strumień ciepła glebowego.

Słowa kluczowe: centrum Łodzi, stacja zamiejska Ciosny, stężenie radonu (Rn-222) w powietrzu, strumień ciepła glebowego

WSTĘP

Radon (Rn-222) to szlachetny gaz promieniotwórczy, powstający w litosferze w wyniku rozpadu atomów radu (Ra-226), pochodnej uranu. Gaz ten stanowi najsilniejsze naturalne źródło promieniowania jonizującego na Ziemi. Według Raportu Państwowej Agencji Atomistyki, udział Rn-222 w średniej rocznej dawce efektywnej promieniowania jonizującego, na którą narażony był każdy mieszkaniec

Adres do korespondencji: dr A. Podstawczyńska, Uniwersytet Łódzki, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź, tel. +48 42 665-59-59, e-mail: apodstaw@uni.lodz.pl

Polski w 2009 r., wynosił 37,6%. W litosferze radon migruje drogą dyfuzji i konwekcji do powierzchni gruntu, gdzie jest uwalniany do atmosfery w procesie ekshalacji. Średnie stężenie Rn-222 w dolnej troposferze nad lądami dla całej kuli ziemskiej wynosi $10 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ [UNSCEAR 2000]. Wiele czynników wpływa na stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu w dolnej troposferze, m.in. zawartość Ra-226 (prekursor Rn-222) w podłożu, właściwości gruntu, wpływające na szybkość ekshalacji (porowatość, przepuszczalność, wilgotność, pionowy gradient temperatury, pokrywa śnieżna), warunki tektoniczne (uskoiki i spękania) oraz warunki atmosferyczne w przygruntowej warstwie powietrza (prędkość wiatru, ruchy turbulencyjne powietrza, stratyfikacja termiczna powietrza, ciśnienie atmosferyczne itd.) [BACIU 2005; BEM 2005; DUEÑAS i in. 1996; KATAOKA, TSUKAMOTO 1992; MAZUR 2008; PORSTENDÖRFER i in. 1991; UNSCEAR 2000].

Celem opracowania była analiza zmienności stężenia Rn-222, rejestrowanego w przygruntowej warstwie powietrza, na tle strumienia ciepła glebowego QG oraz dobór modelu statystycznego, opisującego zależność badanych zmiennych w celu prognozowania stężenia Rn-222. Czasowa zmienność QG , podobnie jak przepływ gazów w glebie (w tym radonu), zależy od różnic temperatury w profilu pionowym gleby oraz od współczynnika przewodnictwa cieplnego gleby, wynikającego z cech fizycznych gruntu, m.in. stopnia uwilgotnienia, porowatości [JANIK 2005; KĘDZIORA 1995; MAZUR 2008]. Dodatkowo wartości QG (przychód ciepła z gruntu do atmosfery) są czynnikiem sprzyjającym migracji gazów w glebie ku powierzchni ziemi, teoretycznie intensyfikując ekshalację Rn-222 do atmosfery. Wartości ujemne QG oznaczają strumień rozchodowy ciepła od powierzchni w głąb gruntu (powstający w konsekwencji inwersyjnego profilu temperatury podłoża), hamując transport gazów glebowych ku powierzchni gruntu. Ten element meteorologiczny może być zatem 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 QG ze stężeniem Rn-222 w przypowierzchniowej warstwie atmosfery. Związek stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza ze strumieniem ciepła glebowego dotychczas nie był udokumentowany w literaturze krajowej, a także zagranicznej.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Materiał źródłowy opracowania stanowiły wyniki pomiarów stężenia promieniotwórczego Rn-222 w powietrzu. Stężenie promieniotwórcze radonu wyrażono w $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (Bq – bekerel) i oznaczono symbolem $\rho\text{Rn-222}$; $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ oznacza 1 przemianę jądrową w ciągu 1 sekundy w 1 m^3 powietrza. Pomiary wykonywano metodą aktywną z wykorzystaniem automatycznej komory jonizacyjnej Alpha GUARD® PQ2000 Pro firmy Genitron Instruments GmbH (ciągły tryb dyfuzyjny,

objętość powietrza 0,6 l, czas uśredniania 1 godz.) synchronicznie na dwóch stanowiskach w latach 2008–2010. Miernik $\rho Rn-222$ był umieszczony w klatce meteorologicznej na wysokości 2 m nad gruntem w centrum Łodzi (51°46'10"N, 19°27'55"E, MSM – Miejska Stacja Meteorologiczna Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ) i na terenie rolniczym w miejscowości Ciosny (51°55'24"N 19°24'38"E, stacja hydrologiczno-meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ, gmina Zgierz, 25 km na północ od Łodzi). Wyniki pomiarów $\rho Rn-222$ były weryfikowane na podstawie analizy protokołu zapewnienia jakości danych, w konsultacji z Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Protokół z wynikami oceny jakości danych dostarczają mierniki Alpha GUARD® PQ2000 Pro, które równoległe z pomiarem stężenia radonu prowadzą szereg powtarzalnych programów kontrolnych i testów wiarygodności danych [GENRICH 2006]. Synchronicznie do wyników $\rho Rn-222$ rejestrowano co 1 godz. wartość strumienia ciepła glebowego QG (w $W \cdot m^{-3}$) za pomocą czujnika typu HFP01 Heat Flux Plate firmy Cambell Scientific, Inc. Płytki do pomiaru strumienia ciepła umieszczono na obu stanowiskach pod powierzchnią trawiastą, na głębokości ok. 10 cm (1 płytka na stanowisko). W opracowaniu strumień przepływu ciepła w głąb podłoża opisują wartości ujemne (pora dzienna), a dopływ ciepła z gleby do powierzchni czynnej opisują wartości dodatnie (pora nocna). W opracowaniu analizowano średnie dobowe przebiegi godzinnych wartości $\rho Rn-222$ i QG w poszczególnych porach roku i miesiącach. Związek stężenia radonu i QG opisano następującym modelem funkcji eksponencjalnej:

$$\rho Rn = a_1 \exp(a_2 QG) + a_3 \quad (1)$$

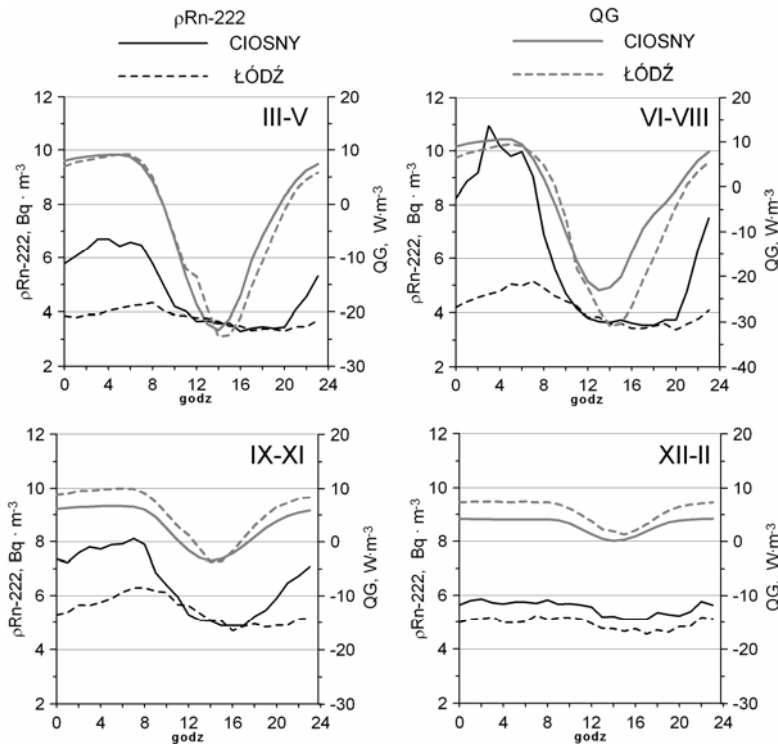
gdzie:

- ρRn – średnie godzinne stężenie promieniotwórcze radonu, $Bq \cdot m^{-3}$;
- QG – średnia godzinna gęstość strumienia glebowego, $W \cdot m^{-2}$;
- a_1, a_2 i a_3 – współczynniki modelu.

Podstawą wyznaczenia wartości współczynników powyższego modelu statystycznego były średnie miesięczne wartości godzinne $\rho Rn-222$ w zależności od średnich miesięcznych wartości godzinnych strumienia ciepła glebowego QG w latach 2008–2010. Estymacje $\rho Rn-222$ przeprowadzono dla kolejnych miesięcy z uwagi na duże zróżnicowanie zmian dobowych $\rho Rn-222$ w przebiegu rocznym. Parametry modelu dobrano metodą najmniejszych kwadratów. Dopasowanie wartości modelowych do empirycznych oceniono na podstawie następujących statystyk: d – indeksu zgodności Willmotta ($0 \leq d \leq 1$) [WILLMOTT 1981], MBE – średniego błędu pojedynczego pomiaru w $Bq \cdot m^{-3}$, $RMSE$ – średniego błędu kwadrato- wego pomiaru w $Bq \cdot m^{-3}$.

WYNIKI BADAŃ

Stężenie promieniotwórcze radonu na stacjach w Łodzi i Ciosnach cechuje się dobowym cyklem zmienności – największa aktywność promieniotwórcza tego radionuklidu przypada na godziny poranne, tj. od 03:00 do 08:00, a najmniejsza jest notowana w godzinach popołudniowych i przedwieczornych, tj. od 14:00 do 19:00 (rys. 1). Stacja zamiejska charakteryzuje się większym zakresem zmienności dobowej $\rho\text{Rn-222}$, z maksimum latem, niż stacja w centrum miasta. Największe różnice w poziomie stężenia promieniotwórczego radonu między stacjami występują w godzinach nocnych we wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy, przy czym większe $\rho\text{Rn-222}$ notowano za miastem (rys. 1). Przebieg dobowy strumienia ciepła QG jest quasi-synchroniczny w stosunku do przebiegu $\rho\text{Rn-222}$. W średnim przebiegu dobowym w 4 sezonach roku stwierdzono opóźnienie występowania wartości minimalnych $\rho\text{Rn-222}$ w stosunku do minimów QG . Średnie dobowe maksimum $\rho\text{Rn-222}$ wiosną i latem występowało o godzinę wcześniej niż

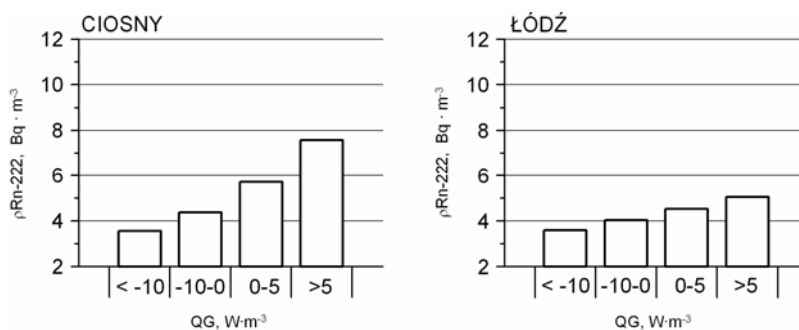


Rys. 1. Średni przebieg dobowy stężenia radonu ($\rho\text{Rn-222}$) i strumienia ciepła glebowego QG w Ciosnach i Łodzi w poszczególnych porach roku w latach 2008–2010; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Mean daily course of radon ($\rho\text{Rn-222}$) concentration and soil heat flux QG in Ciosny and in Łódź in the period 2008–2010; source: own studies

maksimum QG , a jesienią i zimą – później. Wyraźne zwiększenie stężenia promieniotwórczego radonu obserwowano po zmianie kierunku QG w stronę powierzchni czynnej, tj. ok. godz. 20:00–21:00 (rys. 1). Zaobserwowane prawidłowości dotyczą miesięcy od marca do listopada. Okres zimy cechuje się zanikiem rytmu dobowego wartości badanych zmiennych. Zwiększenie $\rho\text{Rn-222}$ w ciągu doby przypada na okres z dodatnimi wartościami QG , którym towarzyszy zanik ruchów powietrza i występowanie nocnej inwersji temperatury powietrza, co sprzyja zwiększeniu $\rho\text{Rn-222}$ przy gruncie. Wartościom ujemnym QG , pojawiającymi się od ok. 10:00 i występującymi latem do ok. 20:00–21:00, odpowiada zmniejszenie $\rho\text{Rn-222}$. Generalnie okres ujemnego QG w biegu dobowym pokrywa się z okresem intensywnej turbulencji termicznej powietrza w mieście i za miastem, najprawdopodobniej wynoszącej powietrze wraz z Rn-222 do wyższych warstw atmosfery, co w konsekwencji daje niewielkie stężenie tego gazu przy gruncie.

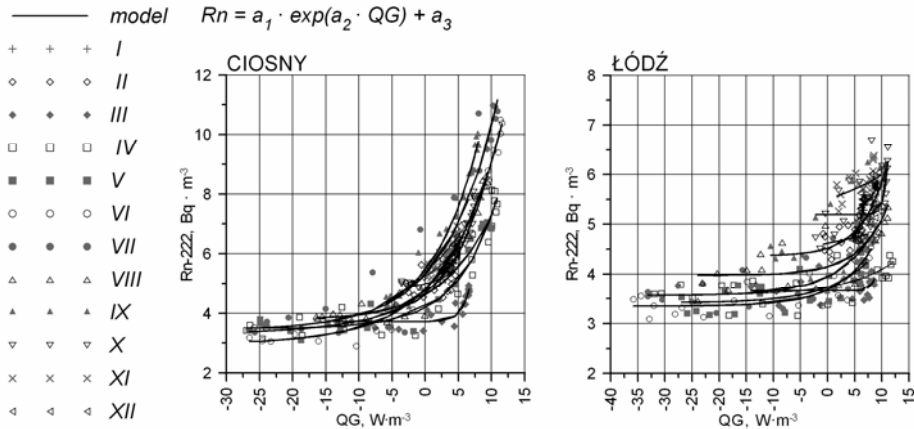
Analiza średniego $\rho\text{Rn-222}$ w funkcji QG wykazała, że największe średnie wartości stężenia tego radionuklidu rejestrowano na stacji w Łodzi i Ciosnach, gdy wartości QG przekraczały $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Najmniejsze wartości $\rho\text{Rn-222}$ występowały w czasie, gdy notowano wartości QG poniżej $-10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (rys. 2). Do opisu związku stężenia promieniotwórczego radonu z QG wybrano funkcję eksponencjalną (rys. 3). Zastosowanie tego modelu funkcji, jak pokazała wstępna analiza danych, daje mniejsze sumy kwadratów różnic między danymi pomiarowymi a modelowymi niż np. funkcji wielomianowej czy potęgowej.



Rys. 2. Średnie stężenie radonu $\rho\text{Rn-222}$ w wybranych przedziałach wartości gęstości strumienia ciepła glebowego QG w Ciosnach i w Łodzi w latach 2008–2010; źródło: wyniki własne

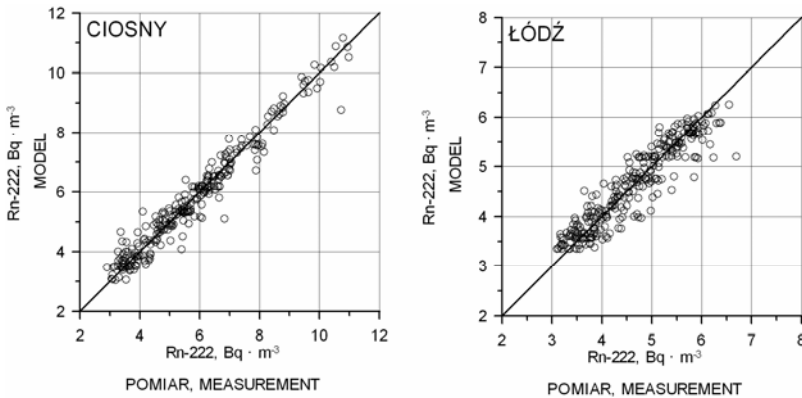
Fig. 2. Mean radon concentration $\rho\text{Rn-222}$ in selected intervals of soil heat flux QG in Ciosny and in Łódź in the period 2008–2010; source: own studies

W świetle wartości statystyk dopasowania danych estymowanych do pomiarowych oraz korelacyjnych wykresów rozrzutu modelowanie zależności $\rho\text{Rn-222} = \rho\text{Rn-222}(QG)$ funkcją eksponencjalną dało zadowalające rezultaty dla obu stacji (rys. 3, 4, 5, tab. 1). Dane modelowane dla Łodzi cechują się mniejszym dopasowaniem do danych pomiarowych niż dla stacji w Ciosnach, gdzie od marca do li-



Rys. 3. Średnie godzinne stężenie radonu $\rho Rn-222$ w funkcji gęstości strumienia ciepła glebowego QG w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010; I–XII – kolejne pomiary; linią zaznaczono regresję dla kolejnych miesięcy z zastosowaniem funkcji eksponencjalnej; źródło: wyniki własne

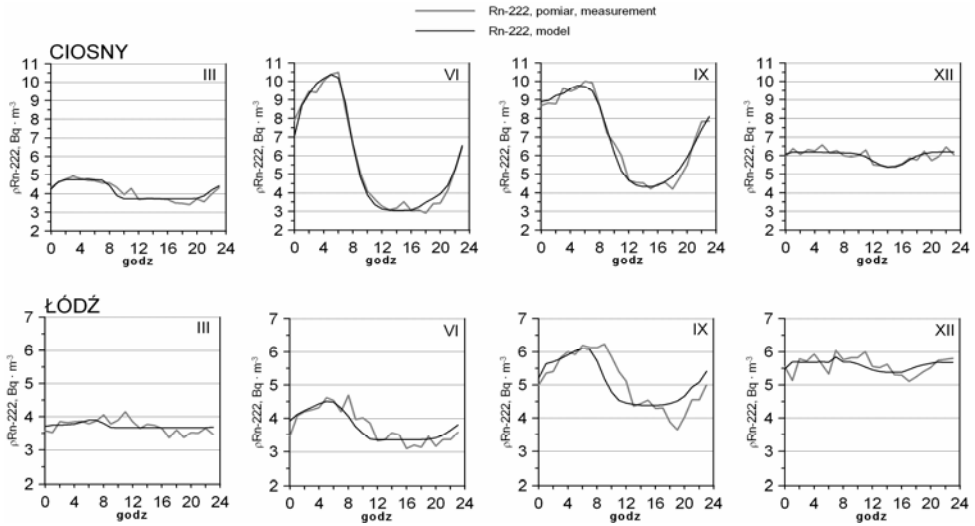
Fig. 3. Mean hourly radon concentration $\rho Rn-222$ as a function of soil heat flux QG in Ciosny and in Łódź in the period 2008–2010; I–XII – measurements in months; the line indicates the measurements for particular months regressed by means of exponential function; source: own studies



Rys. 4. Pomierzone i modelowane godzinne wartości stężenia radonu $\rho Rn-222$ w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010; źródło: wyniki własne

Fig. 4. Empirical and model-predicted hourly values of radon concentration $\rho Rn-222$ in Ciosny and in Łódź in the period 2008–2010; source: own studies

stopada indeks zgodności danych Willmotta d przyjmuje bardzo duże wartości, tj. powyżej 0,9 (tab. 1). Analizując wartości indeksu d dla kolejnych miesięcy, można stwierdzić, że na obu stacjach w okresie zimowym (XII–II), a także w listopadzie w Łodzi występują największe różnice między oszacowanymi wartościami $\rho Rn-222$ a danymi empirycznymi (tab. 1). Doświadczalny przebieg doby $\rho Rn-222$



Rys. 5. Średni przebieg dobowy stężenia radonu $\rho\text{Rn-222}$ w Ciosnach i Łodzi w wybranych miesiącach w latach 2008–2010 – dane pomiarowe i modelowane na podstawie strumienia ciepła glebowego QG ; źródło: wyniki własne

Fig. 5. Mean daily course of radon concentration $\rho\text{Rn-222}$ in Ciosny and in Łódź in particular months of the period 2008–2010 – observed and model data predicted from soil heat flux QG ; source: own studies

Tabela 1. Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu $\rho\text{Rn} = a_1 \exp(a_2 QG) + a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010

Table 1. The coefficients a_1, a_2, a_3 in the model $\rho\text{Rn} = a_1 \exp(a_2 QG) + a_3$ and the fitness of model-predicted to observed values at the stations in Łódź and in Ciosny in the period 2008–2010

Stacja Station	Miesiąc Month	Współczynniki modelu $\rho\text{Rn-222} (QG)$ Coefficients of $\rho\text{Rn-222} (QG)$ model			Statystyki dopasowania modelu $\rho\text{Rn-222} (QG)$ Statistics of the fitness of the $\rho\text{Rn-222} (QG)$ model		
		a_1	a_2	a_3	MBE	$RMSE$	d
1	2	3	4	5	6	7	8
Łódź	I	0,014	0,628	4,453	0,000	0,137	0,875
	II	11,325	0,002	-6,706	0,000	0,241	0,112
	III	0,000	1,144	3,663	0,000	0,183	0,253
	IV	0,162	0,118	3,570	0,000	0,303	0,563
	V	0,310	0,135	3,419	0,000	0,262	0,728
	VI	0,325	0,158	3,350	0,000	0,257	0,846
	VII	0,369	0,146	3,568	0,000	0,344	0,808
	VIII	0,161	0,194	3,977	0,000	0,399	0,759
	IX	0,150	0,230	4,366	0,000	0,496	0,762
	X	0,000	1,393	5,195	-0,002	0,488	0,524
	XI	0,456	0,072	5,058	0,000	0,280	0,252
	XII	0,001	0,632	5,317	0,004	0,225	0,393

cd. tab. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Ciosny	I	0,440	0,266	4,530	0,000	0,192	0,640
	II	0,223	0,250	4,768	0,000	0,367	0,352
	III	0,004	0,852	3,716	0,000	0,206	0,903
	IV	0,683	0,172	3,492	0,000	0,478	0,961
	V	1,258	0,114	3,332	0,000	0,420	0,960
	VI	1,793	0,122	2,982	0,000	0,314	0,993
	VII	1,852	0,131	3,441	0,000	0,830	0,959
	VIII	0,878	0,183	3,803	0,000	0,281	0,989
	IX	1,985	0,144	3,481	0,000	0,342	0,986
	X	0,513	0,233	4,735	0,000	0,286	0,960
	XI	2,438	0,081	2,945	0,000	0,209	0,900
	XII	1,621	0,128	3,209	0,000	0,195	0,797

Objaśnienia: *MBE* – średni błąd pojedynczego pomiaru, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, *RMSE* – średni błąd kwadratowy pomiaru, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, *d* – indeks zgodności Willmotta ($0 \leq d \leq 1$) wg: WILLMOTT [1981].

Explanations: *MBE* – mean bias error, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, *RMSE* – the root mean squared error, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, *d* – index of agreement by Willmott ($0 \leq d \leq 1$) acc. to WILLMOTT [1981].

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

w wybranych miesiącach w Ciosnach jest bardzo dobrze odwzorowany zastosowanym modelem funkcji eksponencjalnej, podczas gdy w odniesieniu do wyników z Łodzi dokładność modelu jest mniejsza (rys. 5).

WNIOSKI

Stężenie promieniotwórcze radonu w dolnej troposferze jest zdeterminowane oddziaływaniem wielu czynników, m.in. intensywnością procesu ekshalacji, czyli uwalniania się radionuklidu z gleby do atmosfery czy intensywnością ruchów powietrza, kształtujących poziom koncentracji tego gazu przy gruncie. Złożoność procesów, wpływających na $\rho\text{Rn-222}$ w powietrzu, oraz ich jednoczesne występowanie skłania do dużej ostrożności interpretacyjnej w ocenie zależności $\rho\text{Rn-222}$ od poszczególnych czynników.

Badane zmienne, tj. stężenie promieniotwórcze radonu i strumień ciepła glebowego, cechuje quasi-synchroniczny przebieg czasowy, z opóźnieniem w występowaniu dobowych minimów $\rho\text{Rn-222}$ w stosunku do *QG*. Zwiększenie $\rho\text{Rn-222}$ w ciągu doby przypada na okres z dodatnimi wartościami *QG*, a ujemnym wartościom *QG* odpowiada zmniejszenie stężenia tego radionuklidu w powietrzu. Dobry model funkcji eksponencjalnej, opisujący zależność badanych zmiennych, bardzo dobrze estymuje wartości $\rho\text{Rn-222}$ w miesiącach od III–XI na stacji zamiejskiej. Dla centrum Łodzi prognozowanie $\rho\text{Rn-222}$ na podstawie *QG* jest obciążone

większym błędem. W niniejszym opracowaniu wykazano istnienie związku stężenia promieniotwórczego radonu przy gruncie i strumienia ciepła glebowego. Nierozstrzygnięta jednak pozostaje kwestia siły oddziaływania tego czynnika wśród wielu innych na $\rho Rn-222$. Ten problem wymaga dalszych badań na podstawie, między innymi, pomiarów szybkości ekshalacji.

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

LITERATURA

- BACIU A.C. 2005. Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania). *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 83. No. 2 s. 171–189.
- BEM H. 2005. Radioaktywność w środowisku naturalnym. Łódź PAN. ISBN 83-86842-35-X. ss.100.
- 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*. Vol. 31. No. 1 s. 87–102.
- GENRICH V. 2006. AlphaGUARD PQ2000/MC50 multiparameter radon monitor. Characterisation of its physical properties under normal climatic and severe environmental conditions. Frankfurt. Publ. Genitron Instruments GmbH. ss 52.
- JANIK M. 2005. Przenikanie radonu z gruntu do budynku. Modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych. Raport Nr 1966/AP. Praca doktorska [online]. Kraków. Instytut Fizyki Jądrowej PAN. [Dostęp 28.10.2011] Dostępny w Internecie: www.ifj.edu.pl/reports/2005.html
- KATAOKA T., TSUKAMOTO O. 1992. YOUNOKI E., MICHIIRO 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*. Vol. 45. No ss. 403–406.
- KĘDZIORA A. 1995. Podstawy agrometeorologii. Warszawa. PWRiL. ISBN 83-09-01641-7 ss. 364
- MAZUR J. 2008. Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu a parametry meteorologiczne i własności gleby. Raport Nr 2014/AP. Praca doktorska [online]. Kraków Instytut Fizyki Jądrowej PAN. [Dostęp 28.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.ifj.edu.pl/publ/reports/2008/2014.pdf>
- 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*. Vol. 25A. No. 3 ss. 709–713.
- Państwowa Agencja Atomistyki 2009. Roczny Raport Państwowej Agencji Atomistyki. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2008 roku [online]. Warszawa, czerwiec 2009. [Dostęp 28.10.2011]. Dostępny w Internecie <http://www.paa.gov.pl/dokumenty/atomistyka2011.pdf>.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000. Sources and effects of ionizing radiation [online]. New York. [Dostęp 28.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.unscear.org/docs/reports/gareport.pdf>

Agnieszka PODSTAWCZYŃSKA

**VARIABILITY OF RADON (Rn-222) CONCENTRATION
IN THE NEAR-GROUND AIR LAYER
WITH REFERENCE TO SOIL HEAT FLUX VALUE**

Key words: exponential function, radon (Rn-222) concentration in the air, rural station Ciosny, soil heat flux, the city center of Łódź

S u m m a r y

The aim of the study was to find the relationship between radon (Rn-222) concentration and soil heat flux. Atmospheric concentration of radon was measured continuously (in 60-min intervals) at a height of 2 m above the ground using AlphaGUARD® PQ2000PRO (ionization chamber) at urban (city center of Łódź) and rural (Ciosny, 25 km north of Łódź) site in the period 2008–2010. Simultaneously, soil heat flux (QG) was measured by means of HFP01 Heat Flux Plate, Campbell Scientific Ltd. The diurnal pattern of Rn-222 concentration was revealed with a maximum in the early morning and a minimum in the afternoon. In general, the diurnal variation of near-surface Rn-222 concentration varied approximately in phase with the soil heat flux. The exponential function model was used to estimate a daily course of radon concentration on the basis of soil heat flux values in particular months. The period from March to November was characterised by a good agreement between the observed and model-predicted Rn-222 concentration (“index of agreement” by Willmott was used to evaluate the model). Measured Rn-222 concentrations in the rural station Ciosny fitted better to model data than those from the urban station in the city center of Łódź.