http://dx.doi.org/10.18778/7525-810-3

Agnieszka Podstawczyńska

Meteorologiczne uwarunkowania stężenia radonu w przygruntowej warstwie powietrza w środowisku miejskim i zamiejskim

WYDAWNICTWO
UNIWERSYTETU
ŁÓDZKIEGO

ŁÓDŹ 2013

Agnieszka Podstawczyńska – Katedra Meteorologii i Klimatologii
Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki
90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88
e-mail: apodstaw@uni.lodz.pl

RECENZENCI
Ewa Bednorz, *Stanisław Chałupnik*

REDAKCJA TECHNICZNA I SKŁAD KOMPUTEROWY
Iwona Gajda-Pijanowska, *Agnieszka Podstawczyńska*

PROJEKT OKŁADKI
Elżbieta Górska, *Agnieszka Podstawczyńska*

Na okładce wykorzystano ilustracje autorstwa Agnieszki Podstawczyńskiej

© Copyright by Uniwersytet Łódzki, Łódź 2013

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
Wydanie I. W.06114.13.0.H

ISBN (wersja drukowana) 978-83-7525-810-3
ISBN (ebook) 978-83-7969-322-1

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
90-131 Łódź, ul. Lindleya 8
www.wydawnictwo.uni.lodz.pl
e-mail: ksiegarnia@uni.lodz.pl
tel. (42) 665 58 63, faks (42) 665 58 62

Spis treści

1. WSTĘP 5

2. RADON W ŚRODOWISKU GEOGRAFICZNYM 7
   2.1. Źródła i właściwości radonu 7
   2.2. Radon w środowisku geograficznym Polski 11
   2.3. Biologiczny aspekt oddziaływania radonu 16
   2.4. Główne współczesne kierunki badań nad radonem 23

3. POMIARY STĘŻENIA RADONU I ELEMENTÓW METEOROLOGICZNYCH W ŚRODKOWEJ POLSCE I KRAKOWIE 31
   3.1. Metodyka pomiarów stężenia Rn-222 i elementów meteorologicznych 31
   3.2. Lokalizacja stacji pomiarowych stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza 38
   3.3. Cechy środowiskowe emisji Rn-222 na badanych stacjach 44
   3.4. Baza danych i metody badawcze wykorzystane w opracowaniu 50

4. ROCZNA I DOBOWA ZMIENNOŚĆ STĘŻENIA RADONU W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA 59
   4.1. Cechy rocznej zmienności stężenia Rn-222 59
   4.2. Średnie roczne, sezonowe i miesięczne przebiegi dobowe stężenia Rn-222 68

5. ZMIENNOŚĆ STĘŻENIA RADONU W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA NA TLE LOKALNYCH WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH 79
   5.1. Zmienność stężenia Rn-222 i temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem 79
   5.2. Zmienność stężenia Rn-222 i ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości wiatru 102
   5.3. Zmienność stężenia Rn-222 i strumienia ciepła glebowego oraz wilgotności gleby 114
   5.4. Modele statystyczne stężenia Rn-222 w Ciosnach i Łodzi 130
   5.5. Analiza wieloparametryczna związku stężenia Rn-222 z elementami meteorologicznymi 149
   5.6. Różnice stężenia Rn-222 między centrum Łodzi a terenem zamiejskim 162

6. WPŁYW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA STĘŻENIE RADONU W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA 183
6.1. Stan badań nad rolą kierunku adwekcji mas powietrza i typu cyrkulacji atmosferycznej dla stężenia Rn-222 w dolnej troposferze 183
6.2. Stężenie Rn-222 na tle kierunku wiatru geostroficznego i charakteru cyrkulacji w środkowej i południowej Polsce 186
6.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na zmienność dobową stężenia Rn-222 198
6.4. Radon w budynkach. Wpływ pogody antycyklonalnej i cyklonalnej na stężenie Rn-222 w domu dwukondygnacyjnym w Łodzi 210

7. PODSUMOWANIE 227

SPIS LITERATURY 237
SPIS RYSUNKÓW I TABEL 249
LIST OF FIGURES AND TABLES 264
SUMMARY 279

1. WSTĘP

Atmosfera jest źródłem różnorodnych bodźców nieustannie oddziałujących na organizmy żywe. Promieniowanie słoneczne, temperatura powietrza, wiatr, wilgotność powietrza to przykłady elementów meteorologicznych bezpośrednio odczuwalnych przez człowieka, kształtujących tzw. klimat odczuwalny. Przykładem składnika środowiska atmosferycznego niewyczuwalnego zmysłami ludzkimi, o niebagatelnym oddziaływaniu ogólnoustrojowym, jest promieniowanie jonizujące. Źródłem tego promieniowania w atmosferze są obecne w powietrzu radionuklidy, do których należy radon (Rn-222). Radon to naturalny gaz promieniotwórczy powszechnie występujący w przyrodzie - najważniejsze źródło narażenia radiacyjnego na Ziemi. Dla przykładu udział Rn-222 w średniej rocznej dawce efektywnej promieniowania jonizującego dla mieszkańca Polski w 2008 i 2009 r. wynosił odpowiednio 40,6% i 37,6% (*Raport Państwowej Agencji Atomistyki* 2009 i 2010). Rn-222 jest gazem bardzo mobilnym, łatwo przenikającym między litosferą, atmosferą, hydrosferą i biosferą. Odkryty w 1900 r. przez F.E. Dorna, jest obiektem wieloletnich, interdyscyplinarnych badań. Od wielu lat radon jest przedmiotem zainteresowania różnych dyscyplin naukowych, m.in. geofizyki, fizyki jądrowej, chemii radiacyjnej, geologii, radiobiologii, medycyny. Ten promieniotwórczy gaz jest traktowany jako znacznik procesów zachodzących w wyżej wymienionych sferach Ziemi (znacznik trzęsień ziemi i wulkanizmu, mineralizacji uranowej i radowej, mieszania wód podziemnych i powierzchniowych, adwekcji mas powietrza), czynnik zagrożeń środowiskowych, czy jako kontrowersyjny czynnik leczniczy. Problematyka radonowa na świecie ma bogaty dorobek publikacyjny, który ciągle jest poszerzany o nowe zagadnienia badawcze w kontekście rozwoju poglądów na temat czynników ryzyka środowiskowego, postępu technicznego w zakresie aparatury pomiarowej radionuklidów. Do dziś mimo wieloletnich badań nad tym radionuklidem nie wszystkie czynniki warunkujące stężenie Rn-222 w środowisku są w pełni wyjaśnione. W literaturze światowej i polskiej słabo udokumentowany jest wątek badań nad meteorologicznymi czynnikami determinującymi wartości stężenia Rn-222 w powietrzu atmosferycznym. Mało znana jest dynamika zmian aktywności promieniotwórczej radonu w środowisku miejskim.

Celem opracowania jest rozszerzenie wiedzy na temat czasowej zmienności stężenia radonu w powietrzu atmosferycznym na obszarze miasta i na tere-

nie niezurbanizowanym oraz poszukiwanie związku tej zmienności z lokalnymi i makroskalowymi warunkami meteorologicznymi. W pracy podjęto próbę oceny wpływu poszczególnych elementów meteorologicznych na kształtowanie dynamiki zawartości radonu w powietrzu. Ocenie poddano także rolę cyrkulacji atmosferycznej determinującej dwie składowe stężenia tego radionuklidu przy gruncie, tj. składową lokalną i składową, będącą efektem transportu radonu do miejsc pomiaru. Ponadto celem badawczym była odpowiedź na pytanie czy środowisko miejskie cechuje odmienna dynamika zmian stężenia radonu w powietrzu w porównaniu z rolniczymi terenami zamiejskimi. Podstawową bazą danych dla niniejszego opracowania były pomiary stężenia Rn-222 w powietrzu wykonane synchronicznie co godzinę 2 m nad gruntem w latach 2008–2010 w centrum Łodzi, w Ciosnach (gm. Zgierz, teren rolniczy, 25 km na północ od Łodzi) oraz w Krakowie-Bronowicach. Dane meteorologiczne wykorzystane w pracy pochodzą z równoległych pomiarów na wymienionych stanowiskach oraz z bazy danych z reanalizy NCEP/NCAR-Narodowego Centrum Prognoz Środowiskowych USA.

Praca częściowo powstała w ramach projektu badawczego N306 015 32/1011 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w latach 2007–2010.

Składam serdeczne podziękowania za współpracę wszystkim pracownikom Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, a szczególnie dr Krzysztofowi Kozakowi i dr Jadwidze Mazur. Dziękuję za udostępnienie danych z „serii krakowskiej”, opracowanie laboratoryjne wyników badań, konsultacje metodyczne, cenne uwagi i nieocenione wsparcie w pracy badawczej, dodające autorce wytrwałości na nowym „gruncie” poznawczym.

Dziękuję także wszystkim pracownikom Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego biorących udział w pomiarach stężenia radonu, a w szczególności Koleżankom i Kolegom z Katedry Meteorologii i Klimatologii.

2. RADON W ŚRODOWISKU GEOGRAFICZNYM

2.1. Źródła i właściwości radonu

Radon (z jęz. łac. *radon*, symbol chemiczny Rn) to gaz promieniotwórczy, występujący naturalnie w przyrodzie. Powstaje w środowisku geologicznym w wyniku samorzutnego rozpadu promieniotwórczego nuklidów wchodzących w skład trzech naturalnych szeregów promieniotwórczych. Szeregom tym dają początek tzw. radionuklidy pierwotne, powszechnie obecne we wszystkich skałach litosfery, tj. uran (U-238, U-235) i tor (Th-232). Radon jest najcięższym znanym pierwiastkiem gazowym - ok. 7,6 razy cięższym od powietrza, a jego gęstość to 9,73 $kg \cdot m^{-3}$ (Miliszkiewicz 1978). Rn-222 należy do grupy gazów szlachetnych (helowce) i jest bierny chemicznie, bezbarwny, bez smaku i zapachu, zatem nie wykrywalny zmysłami człowieka. Radon bardzo dobrze rozpuszcza się w wodzie (im niższa temperatura wody, tym lepsza rozpuszczalność), szczególnie lekko kwaśnej lub o słabej mineralizacji oraz w alkoholach i kwasach tłuszczowych. Istnieją trzy naturalne izotopy radonu o liczbie atomowej 86 i liczbie masowej 222 (Rn-222), 220 (Rn-220, tzw. toron Tn), 219 (Rn-219, tzw. aktynon An), występujące odpowiednio w szeregach promieniotwórczych: uranowym, torowym i aktynowo-uranowym. Te promieniotwórcze izotopy różnią się istotnie czasem połowicznego zaniku. Najkrótszym czasem półrozpadu cechuje się aktynon $T_{1/2}$ = 3,92 s, dłuższym toron $T_{1/2}$ = 54,5 s, a najdłuższym Rn-222 $T_{1/2}$ = 3,825 dnia. Największe znaczenie w środowisku ma najdłużej żyjący izotop radonu z uwagi na możliwość swobodnej migracji między litosferą, hydrosferą i atmosferą oraz duży ciężar właściwy sprzyjający jego gromadzeniu np. w obniżeniach terenu, jaskiniach, kopalniach, kamieniołomach, tunelach oraz w budynkach. Rn-222 został odkryty przez F.E. Dorna w 1900 r. W tekście rozprawy określenie „radon” będzie używane dla tego właśnie izotopu. W wyniku rozpadu promieniotwórczego radon emituje cząstki alfa obdarzone dużą energią (5,49 MeV, co odpowiada prędkości cząstek 15 000 $km \cdot s^{-1}$), o małej przenikliwości, ale silnych właściwościach jonizujących, powodujących zmiany w otaczającej materii. Pochodne Rn-222 to tzw. izotopy krótkożyciowe, z czasami połowicznego rozpadu poniżej 30 min. (polon Po-218 $T_{1/2}$ = 3,05 min.; ołów Pb-214 $T_{1/2}$ = 26,8 min.; bizmut Bi-214 $T_{1/2}$ = 19,7 min.; polon Po-214 $T_{1/2}$ = 164 μs) oraz tzw. izotopy długożyciowe (ołów Pb-210 $T_{1/2}$ = 22,3 lat; bizmut Bi-210 $T_{1/2}$ = 5,0 dni; polon Po-210 $T_{1/2}$ = 138,4

dni). Pochodne radonu emitują cząstki alfa lub beta z towarzyszącym promieniowaniem gamma. Po ok. 4 dobach pozostaje połowa początkowej ilości Rn-222, a po 40 dniach zanika niemal zupełnie. Produkty rozpadu Rn-222 są promieniotwórczymi ciałami stałymi, tworzącymi radioaktywny aerozol lub osad (oprócz trwałego Pb-206) (Miliszkiewicz 1978, Cothern i Smith 1987, Eisenbud 1987).

Tabela 2.1

Szereg promieniotwórczy uranu (U-238) (wg. Nazaroff i Nero 1988)

Table 2.1

Radioactive uranium series (U-238) (by Nazaroff and Nero 1988)

Izotop z liczbą masową	**Symbol**	**Czas połowicznego rozpadu**	**Rodzaj promieniowania**
Uran -238 ↓	U	$4,5 \times 10^9$ lat	α
Tor -234 ↓	Th	24,1 dni	β, γ
Protaktyn ↓	Pa	1,18 min.	β, γ
Uran-234 ↓	U	$2,5 \times 10^4$ lat	α, γ
Tor-230 ↓	Th	$8,0 \times 10^4$ lat	α
Rad-226 ↓	Ra	1622 lat	α, γ
Radon-222 ↓	**Rn**	**3,82 dni**	**α**
Polon-218 ↓	Po	3,05 min.	α
Ołów-214 ↓	Pb	26,8 min.	β, γ
Bizmut-214 ↓	Bi	19,7 min.	β, γ
Polon-214 ↓	Po	160×10^{-6} s	α
Ołów-210 ↓	Pb	22,3 lat	β, γ
Bizmut-210 ↓	Bi	5,0 dni	β
Polon-210 ↓	Po	138,4 dni	α
Ołów-206	Pb	trwały	-

Głównym źródłem radonu w środowisku jest litosfera, gdzie gaz ten powstaje w ziarnach minerałów w wyniku rozpadu radu (Ra-226), będącego produktem rozpadu uranu (U-238). Uwolnienie się atomu radonu, dzięki energii kinetycznej odrzutu po rozpadzie jądra radu, z ziarna do przestrzeni międzyziarnowej, wypełnionej wodą lub gazem, nazywa się emanacją. Po wydostaniu się Rn-222 z ziaren mineralnych rozpoczyna się etap jego transportu w skorupie ziemskiej. Migracja Rn-222 odbywa się głównie przez dyfuzję molekularną wywołaną gradientem koncentracji oraz konwekcję, która spowodowana jest różnicą ciśnienia lub temperatury w profilu pionowym. Transport Rn-222 w gruncie warunkują takie czynniki, jak: przepuszczalność, porowatość, wilgotność (optymalna 20–30%), temperatura oraz warunki atmosferyczne, np. ciśnienie atmosferyczne, którego spadek przyspiesza ruch radonu do powierzchni ziemi. Radon, jako gaz szlachetny, nie wchodząc w reakcje chemiczne, może być przenoszony ze strumieniem innych gazów (głównie CO_2, CH_4, N_2) lub przez wodę. Szybki transport tego radionuklidu z wymienionymi mediami może zachodzić w obszarach aktywnych tektonicznie, wulkanicznie, geotermalnie w związku z istnieniem dużych gradientów temperatury i ciśnienia w litosferze (Cothern i Smith 1987, Eisenbud 1987). Najefektywniejszy transport radonu zachodzi w skałach szczelinowych, w sąsiedztwie uskoków tektonicznych, na obszarach krasowych poprzez naturalne systemy szczelin i pęknięć. Przy uskokach tektonicznych często notuje się występowanie tzw. anomalii radonowych, gdzie koncentracje tego radionuklidu kilkakrotnie przewyższają wartości średnie (Swakoń i in. 2005). Dwa opisywane wyżej procesy, tj. emanacja i transport Rn-222 poprzedzają zjawisko ekshalacji, czyli uwalniania radonu do atmosfery. Szybkość ekshalacji uwarunkowana jest zawartością radu w skorupie ziemskiej, parametrami fizycznymi gleby, wilgotnością i temperaturą gleby oraz elementami meteorologicznymi. Wśród składowych meteorologicznych istotne znaczenie dla tempa ekshalacji ma ciśnienie atmosferyczne (spadek sprzyja rozprzestrzenianiu się radonu do atmosfery), wiatr (wzrost prędkości wiatru i intensywna konwekcja przyspieszają ekshalację), opady i występowanie pokrywy śnieżnej (spowalniają ekshalację) (Mazur 2008). Na obszarach lądowych bez pokrywy lodowej między 30°N a 70°N szybkość ekshalacji wynosi odpowiednio od 0,2 atomu do 1 atomu z każdego 1 cm^2 powierzchni, zmniejszając się liniowo w zależności od szerokości geograficznej (Cohen i Robertson 2002). Jak podają Nevissi i Bodansky (1987) ekshalacja radonu z gleb to największe jego źródło w atmosferze, wnoszące 78,9% do jego całkowitej zawartości w powietrzu (tab. 2.2). Drugorzędnymi źródłami radonu w atmosferze są gaz ziemny, wody powierzchniowe, materiały budowlane, odpady antropogeniczne z przeróbki surowców mineralnych, spalanie węgla (Nevissi i Bodansky 1987, Bem 2005).

Tabela 2.2

Wkład procentowy źródeł Rn-222 do jego zawartości w atmosferze
(wg Nevissi i Bodansky 1987)

Table 2.2

Percentage contribution of Rn-222 sources to its content in the atmosphere
(by Nevissi and Bodansky 1987)

Źródła	**%**
Ekshalacja z gleb	78,9
Wody podziemne	19,7
Ekshalacja z oceanów	1,2
Wydobycie i przeróbka fosforytów	0,12
Wydobycie i przeróbka uranu	0,08
Wydobycie i przeróbka węgla	0,0008
Gazy naturalne	0,0004
Spalanie węgla	0,00004

Środowisko geologiczne, główne źródło Rn-222, cechuje się przestrzennym zróżnicowaniem tzw. potencjału radonowego, głównie w związku z przestrzennym zróżnicowaniem koncentracji radu (Ra-226), prekursora tego gazowego radionuklidu w skorupie ziemskiej. Rad w przyrodzie występuje zwykle z uranem jako kolejne ogniwo w łańcuchu przemian jądrowych szeregu uranowego. Największe koncentracje minerałów zawierających uran i rad związane są z występowaniem kwaśnych skałach magmowych (różnego rodzaju granity, gnejsy, przeciętnie 3–5 g U na tonę skały). Występowanie tych formacji skalnych na danym obszarze potencjalnie zwiększa stężenie radonu w powietrzu glebowym, wodach podziemnych i powierzchniowych oraz w atmosferze. W procesie wietrzenia nuklidy promieniotwórcze zawarte w skałach magmowych przechodzą do osadowych i dlatego czasami podwyższoną koncentrację radiopierwiastków wykazują piaski i piaskowce kwarcytowe, łupki ilaste i bitumiczne. W skałach luźnych zawartość uranu jest największa w glinach, głównie tych o znacznych ilościach materiału granitowego (Strzelecki i Wołkowicz 1993, Skowronek i in. 1999, Przylibski 2006). W obrębie innych skał możemy także spodziewać się potencjalnie wysokiej koncentracji radonu, jeśli sprzyja temu budowa tektoniczna ułatwiająca transport radonu i wód podziemnych, o czym wspomniano wcześniej. Duża zdolność migracji tego gazu sprawia, że znaczne jego koncentracje można spotkać w oddaleniu od źródła macierzystego radu.

W pomiarach zawartości radonu w środowisku oznacza się jego aktywność promieniotwórczą, czyli liczbę atomów (jąder atomowych) nuklidu, która ulega

rozpadowi w jednostce czasu. Jednostką aktywności promieniotwórczej w układzie SI jest bekerel (Bq). 1 Bq oznacza 1 rozpad promieniotwórczy w ciągu 1 sekundy. W przypadku powietrza czy wody aktywność promieniotwórczą odnosi się do ośrodka określając tzw. stężenie promieniotwórcze (Musiałowicz 2011). Stężenie promieniotwórcze Rn-222 w glebie wyraża się w $Bq \cdot kg^{-1}$, a w powietrzu w $Bq \cdot m^{-3}$. 1 $Bq \cdot m^{-3}$ oznacza 1 przemianę jądrową w ciągu 1 sekundy w 1 m^{-3} powietrza.

Przeciętne stężenie radonu w dolnej troposferze nad lądami dla całej kuli ziemskiej wynosi 10 $Bq \cdot m^{-3}$ i zmienia się w szerokich granicach od 1 $Bq \cdot m^{-3}$ dla obszarów nadmorskich i wysp do powyżej 100 $Bq \cdot m^{-3}$ na obszarach lądowych o dużej koncentracji radu w skałach litosfery (UNSCEAR 2000). Zawartość radonu w objętości powietrza w dolnej troposferze dla całej kuli ziemskiej wynosi $6 \cdot 10^{-18}$ %, a jego stężenie maleje wraz ze wzrostem wysokości. W profilu pionowym troposfery gaz ten może docierać w lecie do wysokości 5500 m nad poziomem terenu (Ciba i in. 1996). W powietrzu glebowym stężenie Rn-222 jest średnio 1000-krotnie wyższe niż w atmosferze. W profilu glebowym stężenie Rn-222 rośnie wraz z głębokością do 2 m, a poniżej już nie wykazuje zmian ze wzrostem głębokości (Janik 2005).

2.2. Radon w środowisku geograficznym Polski

W ocenie środowiska pod względem występowania obszarów o podwyższonych stężeniach Rn-222 (zwanych z jęz. ang. „radon prone area”) bierze się pod uwagę następujące cechy:

- zawartość w glebach lub skałach radu (Ra-226), macierzystego izotopu radonu, oraz uranu (powyżej 30 $Bq \cdot kg^{-1}$),
- głębokość występowania podwyższonych koncentracji radu lub uranu (mniejsza niż 200 m p.p.t.),
- występowanie złóż uranu na głębokościach nie większych niż 100–200 m p.p.t.,
- występowanie warunków sprzyjających transportowi radonu na duże odległości, np. uskoki, spękania i inne deformacje tektoniczne, wód podziemnych i dwutlenku węgla, aktywnych stref sejsmicznych, wulkanicznych i pól geotermalnych, gęstej sieci wyrobisk górniczych lub pustek krasowych (Przylibski 2006).

Wśród skał magmowych w Polsce największą zawartość uranu mają granity karkonoskie, w których zakres stężeń wynosi od 27 do 199 $Bq \cdot kg^{-1}$. Największe stężenie toru na terenie Polski występuje w granitoidach platformy wschodnioeuropejskiej, w zakresie od 68 do 132 $Bq \cdot kg^{-1}$. W granitoidach pod-

łoża krystalicznego północno-wschodniej Polski stężenie uranu wynosi 17–23 $Bq \cdot kg^{-1}$, a w Tatrach średnio 40 $Bq \cdot kg^{-1}$. Zawartość radiopierwiastków w skałach metamorficznych maleje wraz ze wzrostem stopnia ich metamorfizmu. Dotychczas największa zawartość uranu w skałach metamorficznych w Polsce była stwierdzona w gnejsach karkonoskich, tj. od 2,1 $Bq \cdot kg^{-1}$ do 152,7 $Bq \cdot kg^{-1}$. Wśród skał osadowych największe stężenie uranu cechowało łupki ilasto-krzemionkowe Sudetów, tj. 11–134 $Bq \cdot kg^{-1}$ oraz piaskowce karbonu w Karpatach fliszowych, tj. średnio 122 $Bq \cdot kg^{-1}$ (Plewa i Plewa 1999).

Według danych Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego – UNSCEAR (2000) stężenie promieniotwórcze Ra-226 w przypowierzchniowej warstwie litosfery dla całej kuli ziemskiej, gdzie nie występują złoża uranu wynosi około 35 $Bq \cdot kg^{-1}$. W Polsce przeciętne stężenie Ra-226 wynosi 25 $Bq \cdot kg^{-1}$ i zmienia się od 13,1 $Bq \cdot kg^{-1}$ (łódzkie) do 38,1 $Bq \cdot kg^{-1}$ (dolnośląskie), tab. 2.3 (*Radiologiczny Atlas Polski* 2006). Analiza rozkładu przestrzennego średnich wartości stężenia tego nuklidu na terenie Polski wskazuje wyraźne uprzywilejowanie radiogeniczne województw południowych (tab. 2.3). Zakres zmierzonych stężeń Ra-226 w glebach Polski zawiera się w granicach od poniżej 10 $Bq \cdot kg^{-1}$ do 100 $Bq \cdot kg^{-1}$ (*Radiologiczny Atlas Polski* 2006).

Tabela 2.3

Średnie stężenie radu (Ra-226) w glebie na terenie poszczególnych województw Polski (wg *Radiologicznego Atlasu Polski* 2006)

Table 2.3

Average concentration of radium (Ra-226) in the soil in various Polish regions (by *Radiation Atlas of Poland* 2006)

Województwo	**Ra-226 ($Bq \cdot kg^{-1}$)**	**Województwo**	**Ra-226 ($Bq \cdot kg^{-1}$)**
łódzkie	13,1	pomorskie	19,3
lubuskie	13,5	lubelskie	19,7
kujawsko-pomorskie	14,3	świętokrzyskie	20,8
mazowieckie	14,4	opolskie	26,4
wielkopolskie	15,2	śląskie	28,1
zachodnio-pomorskie	17,9	podkarpackie	31,9
podlaskie	18,0	małopolskie	35,7
warmińsko-mazurskie	19,0	dolnośląskie	38,1
		POLSKA	25,0

Obszarami, spełniającymi wszystkie kryteria dla „radon prone area", gdzie w świetle budowy geologicznej Polski mogą występować podwyższone stężenia radonu, są Sudety, a także cały teren województwa dolnośląskiego, za-

chodniej i południowej części województwa opolskiego, południowej części województwa lubuskiego. Występowania takich obszarów można się także spodziewać w województwie śląskim, małopolskim i podkarpackim. Analizując jednostki tektoniczne Polski obszary podatne na występowanie podwyższonych stężeń radonu są na terenie (Przylibski 2006):

- Sudetów zachodnich,
- niecki śródsudeckiej,
- Karpat,
- zapadliska przedkarpackiego,
- zapadliska śląsko-krakowskiego,
- Gór Świętokrzyskich,
- monokliny przedsudeckiej,
- monokliny śląsko-krakowskiej.

Zawartość radu w skałach podłoża determinuje określone stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym – cechuje się ono dużą zmiennością czasową, jak i przestrzenną. Według *Radiologicznego Atlasu Polski* (2006) stężenie Rn-222 w Polsce w powietrzu glebowym wynosi średnio od 40 000 do 80 000 $Bq \cdot m^{-3}$ dla obszarów z wyłączeniem Dolnego Śląska. Z badań Państwowego Instytutu Geologicznego nad związkiem zawartości Rn-222 w glebie ze strukturami geologicznymi wynika, iż największe stężenie tego radionuklidu w powietrzu glebowym występowało w Karkonoszach, 300 000 $Bq \cdot m^{-3}$. W północnej Polsce, w okolicach Suwałk stężenie Rn-222 w glinie polodowcowej wynosiło od 10 000 do 50 000 $Bq \cdot m^{-3}$. W okolicach Krakowa średnie stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym wynosiło 15 000 $Bq \cdot m^{-3}$, a jego wartości maksymalne osiągały 38 000 $Bq \cdot m^{-3}$. W południowej Polsce maksymalne wartości mierzonego parametru wynosiły 100 000 $Bq \cdot m^{-3}$ (za Chałupnikiem i Wysocką 2003). Stężenie radonu w powietrzu glebowym jest jednym z kryteriów oceny tzw. ryzyka radonowego terenu.

Radon jest gazem łatwo rozpuszczalnym w wodzie, zatem jest powszechnie występującym składnikiem wód podziemnych, szczególnie na obszarach zbudowanych ze skał krystalicznych. Zwiększone stężenie Rn-222 w wodach podziemnych występuje, gdy koncentracja Ra-226 w skałach zbiornikowych wynosi powyżej 30 $Bq \cdot kg^{-1}$ (za Przylibskim 2005). W Polsce obszarem występowania wód radoczynnych, w stopniu uznanym za lecznicze, są Sudety. Początkowo polskie badania stężenia radonu w wodzie wykorzystywanej w balneologii wykonywano głównie w uzdrowiskach dolnośląskich. Na terenie Sudetów największa radoczynność wód podziemnych występuje głównie w okolicach Lądka Zdroju, Kowar, Szklarskiej Poręby, Świeradowa Zdroju, Czerniawy Zdroju. Na tych obszarach nawet zwykłe wody podziemne, powszechnie wykorzystywane w gospodarstwach domowych, często cechuje

większe stężenie Rn-222 niż dla wody radonowej uznanej za leczniczą, czyli o stężeniu powyżej 74 Bq·dm^{-3}. Przedział stężenia radonu w wodach podziemnych Sudetów wynosi od 3 Bq·dm^{-3} do 1 000 Bq·dm^{-3}. Wartości stężeń poniżej i powyżej granic wymienionego przedziału uznaje się za anomalie (za Przylibskim 2005). Dla porównania z obszarem sudeckim, pomiary stężenia Rn-222 w wodzie z ujęć głębinowych, powierzchniowych oraz studni prywatnych przeprowadzone w północno-wschodniej Polsce, wykazały zmienność wartości od 2 do 32 Bq·dm^{-3}, a tylko 10% próbek wody zawierało stężenie powyżej 14 Bq·dm^{-3} (Zalewski i in. 1997b). Badania prowadzone przez prof. Bema wraz z zespołem (Bem i in. 2004) nad zawartością Rn-222 w wodach podziemnych w Uniejowie (środkowa Polska) wykazały średnią zawartość tego radionuklidu 2,95 Bq·dm^{-3}. Taka zawartość radonu w wodach podziemnych, z radiologicznego punktu widzenia, pozwala na wykorzystanie ich dla celów rekreacyjnych i balneologicznych (Bem i in. 2004).

Stężenie Rn-222 w powietrzu atmosferycznym jest 1000–krotnie niższe od stężenia w powietrzu glebowym, z którego ten gazowy radionuklid uwalnia się do atmosfery w procesie ekshalacji. W Polsce przeciętne stężenie radonu w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem zawiera się w przedziale 1,0–11,9 Bq·m^{-3} i średnio wynosi 6,5 Bq·m^{-3} (*Radiologiczny Atlas Polski* 1998). Jak podają M. Plewa i S. Plewa (1999), stężenie tego radionuklidu w powietrzu cechuje znaczna zmienność przestrzenna, np. w Kowarach wynosi 30 Bq·m^{-3}, w Świeradowie 24,1 Bq·m^{-3}, w Karpaczu 8,7 Bq·m^{-3}, a w Warszawie 2,7 Bq·m^{-3}. Wartości stężenia Rn-222 rejestrowane na wolnym powietrzu w Polsce nie odbiegają istotnie od poziomu stężenia rejestrowanego m.in. w Niemczech, Włoszech, Rumunii, Słowenii, USA, Kanadzie, na terenie południowo-wschodniej Azji. W południowej części Niemiec średnie roczne stężenia Rn-222 w powietrzu wynosi 8,6 Bq·m^{-3}, a w części zachodniej 6,7 Bq·m^{-3} (Hötzl i Winkler 1994). We Włoszech, w okolicach Mediolanu średnie stężenie Rn-222 to 10 Bq·m^{-3} (Sesana i in. 2003). W Rumunii, w miejscowości Arad (zachodnia granica państwa) stężenie Rn-222 w powietrzu obliczone na podstawie 18-letniej serii pomiarów wynosi 8,1 Bq·m^{-3} (Florea i Duliu 2012). W Słowenii pomiary stężenia Rn-222 w powietrzu przeprowadzono na wysokości 1,5 m nad gruntem w 60 punktach kraju w latach 2005–2006. Zakres średnich stężeń Rn-222 wynosił 3,7–41,0 Bq·m^{-3}, przy średniej geometrycznej 11,8 Bq·m^{-3}. Wymienione pomiary posłużyły do skonstruowania mapy rozkładu przestrzennego stężenia Rn-222 w powietrzu w Słowenii (Vaupotič i in. 2010). W USA średnie wartości stężenia Rn-222 w powietrzu to 9 Bq·m^{-3}, we wschodniej Kanadzie 11 Bq·m^{-3}, a na terenie prerii kanadyjskich 56 Bq·m^{-3} (za Hötzl i Winkler 1994). W Japonii stężenie Rn-222 w powietrzu wynosi

6,1 Bq·m^{-3}, w Korei 15 Bq·m^{-3}, w Chinach 9 Bq·m^{-3}, na Tajwanie 10 Bq·m^{-3}, a w Hong-Kongu 9,3 (Chan i in. 2010).

Radon, z uwagi na duży ciężar właściwy łatwo gromadzi się w podziemnych pustkach skalnych, zatem środowiskiem o znacznych koncentracjach tego gazu są jaskinie, a także różne sztuczne obiekty podziemne np. tunele, sztolnie, wyrobiska górnicze. Przykładowo pomiary stężenia radonu w powietrzu Jaskini Niedźwiedziej i Jaskini Radochowskiej wykazały najwyższe stężenia latem, odpowiednio 4 180 Bq·m^{-3} i 1 370 Bq·m^{-3}, przy średnim stężeniu 1 300 Bq·m^{-3} i 400 Bq·m^{-3} (Przylibski 1999). Średnie stężenie Rn-222 w powietrzu podziemnego obiektu turystycznego, jakim jest muzeum „Kopalnia Złota" w Złotym Stoku (fragment wyrobisk poszukiwawczych arsenu i złota), wynosiło 1 880 Bq·m^{-3} przy wysokim stężeniu maksymalnym 18 500 Bq·m^{-3} (Przylibski 2001). Podwyższone stężenie Rn-222 rejestrowane jest w wyrobiskach górniczych. Dla przykładu w kopalniach węgla na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zmierzono stężenie tego radionuklidu do 15 000 Bq·m^{-3}, a w kopalniach dolnośląskich nawet 150 000 Bq·m^{-3} (za Chałupnikiem 2007, Skowronkiem 1991). Ekstremalnie wysokie stężenie radonu występuje w niewentylowanych wyrobiskach nieczynnych kopalń uranowych. Na przykład w sztolni „Śnieżnik" k/Kamienicy w Masywie Śnieżnika zarejestrowano wartość 1 500 000 Bq·m^{-3}. W kopalni Podgórze w Kowarach, w sztolni 19a wystąpiło stężenie Rn-222 ok. 550 000 Bq·m^{-3}. Są to najwyższe stężenia radonu w powietrzu, jakie zanotowano w Polsce (Ciężkowski i Ciężkowski 1981, Ciężkowski i in. 1993). Podwyższonym stężeniem radonu cechuje się powietrze w kopalniach nieuranowych - węgla, rud cynku, ołowiu, miedzi. W kopalniach miedzi w Polsce rejestrowano maksymalne stężenie powyżej 66 000 Bq·m^{-3}, a w kopalniach węgla kamiennego w 98% przypadków wartości nie przekraczały 1 110 Bq·m^{-3} (Domański i in. 1970). W kopalni soli w Wieliczce zarejestrowano stężenie 300 Bq·m^{-3} (za Plewą i Plewą 1999).

Działalność związana z przemysłem wydobywczym w Polsce może przyczyniać się do podwyższania stężenia Rn-222 w powietrzu i wodach. Problem ten dotyczy głównie środowiska południowej Polski (Dolnego i Górnego Śląska), tj. otoczenia wyrobisk górniczych i obszarów składowania odpadów pokopalnianych, wód powierzchniowych i podziemnych. Wydajnym źródłem emisji radonu do środowiska (powietrza, wód podziemnych, wód powierzchniowych) w Polsce są niewątpliwie hałdy, wyrobiska, szyby i sztolnie w rejonach wydobycia i poszukiwań rud uranu na terenie Sudetów. W 1973 r. oficjalnie zakończono przerabianie rudy uranowej w Kowarach, a poszukiwania nowych złóż zakończono w 1965 r. Na terenie Sudetów występują także wtórne źródła emisji Rn-222 - współczesne osady o genezie aluwialnej, tworzące się w rejonie złóż i mineralizacji uranowych (za Przylibskim 2005). Obszarem

Polski o sprzyjających warunkach do podwyższonej koncentracji radonu w atmosferze, na wolnym powietrzu i w budynkach, jest także Górny Śląsk. Te szczególne uwarunkowania wynikają ze specyficznej budowy geologicznej, ułatwiającej migrację gazów, dawna i aktualna intensywna działalność górnicza pod obszarami zabudowanymi, występowanie wstrząsów sejsmicznych w wyniku działalności górniczej, szkody górnicze naruszające strukturę budynków i ułatwiające wnikanie radonu do mieszkań (Skowronek i in. 1999, Wysocka i in. 2005, Wysocka i Chałupnik 2003). W podwyższaniu stężenia radonu w wodach i powietrzu istotną rolą odgrywają kopalnie węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, gdzie występują bardzo wysokie, rzadko spotykane w przyrodzie stężenia radu (Ra-226) w słonych wodach kopalnianych. Zjawisko to nazwano anomalią radiohydrogeologiczną w górotworze karbońskim. Stężenie Ra-226 w wodach, które dopływają do wyrobisk kopalnianych mogą osiągać ok. 400 000 $Bq \cdot m^{-3}$, a w wodach odprowadzanych na powierzchnię ok. 20 000 $Bq \cdot m^{-3}$. Zarówno wody kopalniane zawierające rad oraz powstające z nich osady promieniotwórcze są źródłem skażenia środowiska naturalnego na Górnym Śląsku. Na Górnym Śląsku w wodach podziemnych występują podwyższone stężenia radonu, który w procesie uzdatniania wody jest uwalniany do powietrza, co może powodować istotny wzrost narażenia radiacyjnego pracowników stacji uzdatniania wody (Chałupnik 2007, Chmielewska i in. 2011). Generalnie podwyższone stężenia radu, radonu i jego pochodnych na terenach Górnego Śląska dają w konsekwencji wzrost rocznej dawki promieniowania jonizującego dla mieszkańców tego obszaru.

Radon na swojej „drodze" w środowisku może poprzez spękania w fundamentach, ścianach, nieszczelnościach wokół infrastruktury przedostawać się z powietrza glebowego do budynków i gromadzić w piwnicach oraz dzięki systemowi wentylacji przedostawać na wyższe kondygnacje. Średnie stężenie radonu w budynkach na całej kuli ziemskiej wynosi 39 $Bq \cdot m^{-3}$ (UNSCEAR 2000), a w Polsce 49 $Bq \cdot m^{-3}$ (*Radiologiczny Atlas Polski* 2006).

2.3. Biologiczny aspekt oddziaływania radonu

Powszechne występowanie pierwiastków promieniotwórczych w przyrodzie warunkuje istnienie tła promieniowania jonizującego, oddziałującego na wszystkie organizmy żyjące na Ziemi. Nuklidy promieniotwórcze istnieją w skorupie ziemskiej od chwili jej powstania, a natężenie promieniowania jonizującego w odległej przeszłości Ziemi było dużo wyższe niż obecnie. Szacuje się, że emisja radonu do pierwotnej atmosfery była dwukrotnie wyższa niż

w czasach współczesnych. Radon jak i pozostałe naturalne nuklidy promieniotwórcze mogły odegrać istotną rolę w ewolucji środowiska zwiększając intensywność mutacji komórkowych (Zagórski 2010). Naturalne radionuklidy mają główny udział, ok. 70%, w całkowitej rocznej dawce promieniowania jonizującego, jaką statystyczny mieszkaniec Ziemi otrzymuje ze wszystkich źródeł. Według szacunków Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego – UNSCEAR (UNSCEAR 2000) średnia roczna dawka efektywna (skuteczna, określająca stopień narażenia całego ciała na promieniowanie jonizujące) od promieniowania jonizującego ze źródeł naturalnych przypadająca na mieszkańca Ziemi wynosi 2,4 mSv. Największy udział, ok. 50%, w tej dawce ma radon i jego pochodne, tj. około 1,15 mSv. Pozostałymi źródłami naturalnymi promieniowania jonizującego są promieniowanie kosmiczne, promieniowanie gamma i radionuklidy w ciele człowieka (m.in. potas K-40). Średnia roczna dawka efektywna od radonu odpowiada wartości stężenia tego gazu 39 $Bq \cdot m^{-3}$ w powietrzu w domach i 10 $Bq \cdot m^{-3}$ w warunkach zewnętrznych (UNSCEAR 2000). Dane o dawce efektywnej promieniowania jonizującego dla mieszkańców Polski z Raportu Państwowej Agencji Atomistyki przedstawia tabela 2.4. Wartości te nie odbiegają od średnich szacunków UNSCEAR i w 2010 r. wynosiły od źródeł naturalnych 2,43 mSv. W poprzednich dwóch latach wartości omawianych dawek w Polsce także były zbliżone do średniej światowej, tj. 2,32 mSv w 2008 r. i 2,48 mSv w 2009 r. W dawkach tych średni udział Rn-222 i jego pochodnych wynosił 1,2 mSv (2010 r.), 1 mSv (2009 r.) i 0,9 mSv (2008 r.) (*Raport PAA* 2009, 2010, 2011). Narażenie statystycznego mieszkańca Polski na promieniowanie jonizujace od źródeł naturalnych jest około 1,5–2 razy niższe niż mieszkańca Finlandii, Szwecji, Rumunii, Włoch (*Raport PAA* 2010).

Przyjmując, że przeciętnie człowiek spędza 80% czasu w pomieszczeniach zamkniętych, to właśnie radon zawarty w powietrzu budynków jest głównym źródłem promieniowania jonizującego w rocznej dawce skutecznej. Porównując średnie stężenie Rn-222 w domach w Polsce (49 $Bq \cdot m^{-3}$ wg *Radiologicznego Atlasu Polski* 2006) z danymi dla całej kuli ziemskiej (39 $Bq \cdot m^{-3}$) przedstawianymi przez UNSCEAR (2000) należy stwierdzić, że wartości te nie różnią się znacząco. Podobnie jest z zawartością Rn-222 w powietrzu na otwartym terenie. Średnie stężenie tego radionuklidu dla terenu całej Polski ma wartość ok. 6,5 $Bq \cdot m^{-3}$, przy zakresie wahań od 1,0 do 11,9 $Bq \cdot m^{-3}$ (*Radiologiczny Atlas Polski* 1998).

Dawka skuteczna promieniowania jonizującego, jaką otrzymał statystyczny mieszkaniec Polski w 2010 roku ze źródeł naturalnych i sztucznych (w tym medycznych), wynosiła 3,3 mSv i wg Państwowej Agencji Atomistyki taka wartość dawki utrzymywała się na podobnym poziomie w ostatnich kilku la-

tach (*Raport PAA* 2011). Radon miał największy udział w tej dawce, wynosił on w 2010 r. 36,4% (tab. 2.4).

Tabela 2.4

Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej (3,3 mSv) otrzymanej przez statystycznego mieszkańca Polski w 2010 r. (wg *Raportu Państwowej Agencji Atomistyki* 2011)

Table 2.4

Share of different sources of ionizing radiation in average per-capita annual effective dose (3.3 mSv) received by the Polish in 2010 (according to the National Atomic Energy Agency Report 2011)

Źródła promieniowania jonizującego	**Udział w milisiwertach (mSv)**	**Udział w %**
Źródła naturalne (2,433 mSv, 73,8%)		
Radon	1,201	36,4
Promieniowanie gamma	0,462	14,0
Promieniowanie kosmiczne	0,390	11,8
Radionuklidy naturalne wewnątrz organizmu	0,279	8,5
Toron	0,101	3,1
Źródła sztuczne (0,864 mSv, 26,2%)		
Zastosowania medyczne	0,850	25,8
Awarie	0,006	0,2
Inne (opad z dawnych wybuchów jądrowych, działalności zawodowe, przedmioty powszechnego użytku)	0,008	0,2

Dawka skuteczna od radonu i jego pochodnych dla mieszkańców Łodzi obliczona na podstawie badań stężenia Rn-222 w ok. 1 000 budynkach aglomeracji łódzkiej prowadzonych przez Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej w drugiej połowie lat 90. XX w. wyniosła 0,75 mSv (Ostrowska 2002). W świetle najnowszych badań Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi, statystyczny mieszkaniec tego miasta przebywający w pomieszczeniach na parterze otrzymał w 2008 r. średnią roczną dawkę skuteczną promieniowania od radonu i jego pochodnych o wartości 0,9–1,1 mSv (Olszewski i Skubalski 2011).

Energia promieniowania jonizującego oddziałując na organizmy żywe może wywoływać uszkodzenia biologiczne poprzez jonizację w komórkach oraz powstanie aktywnych związków chemicznych (tzw. wolne rodniki – wodorowy i hydroksylowy). Rodniki przyczyniają się do rozkładu białek i kwasów nukleinowych w komórkach, co prowadzi do zaburzeń funkcji biologicznych komórek i tkanek (Doll 1992, Henriksen i Maillie 2003).

Skutki napromieniowania opisuje m.in. Dyrektywa Rady Unii Europejskiej (Euratom nr 96/29) jako „skrócenie długości życia i pogorszenie jego jakości

w wyniku działania promieniowania jonizującego. Pojęcie to obejmuje straty związane ze skutkami somatycznymi, rakotwórczymi i poważnymi zmianami genetycznymi". Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) dzieli skutki napromieniowania na deterministyczne i stochastyczne. Skutki deterministyczne występują bezpośrednio lub w krótkim okresie po napromieniowaniu w postaci objawów klinicznych (przejściowe lub trwałe uszkodzenia tkanek, choroba popromienna). Deterministyczne skutki występują po otrzymanie dużych dawek promieniowania, przy umownym dolnym progu 200 mSv. Skutki stochastyczne ujawniają się dopiero po dłuższym czasie od napromieniowania (np. kilka lat), dużymi lub małymi dawkami. Są to choroby nowotworowe lub zaburzenia genetyczne spowodowane przez mutacje i zmiany chromosomowe w komórkach rozrodczych. Miarą ilościową skutku stochastycznego jest prawdopodobieństwo jego wystąpienia. Dawka promieniowania jonizującego wpływa zatem tylko na prawdopodobieństwo wystąpienia skutku stochastycznego (Doll 1992, Jaracz 2001, Henriksen i Maillie 2003, Bem 2005). Epidemiologiczne badania przeprowadzone na osobach, które przeżyły atak nuklearny na Hiroszimę i Nagasaki, na ludziach zawodowo narażonych na promieniowanie jonizujące (np. górnicy), na osobach poddających się radioterapii dostarczyły wiedzy na temat stochastycznych skutków oddziaływania promieniowania jonizującego. Na podstawie wyników tych badań Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej w 1959 r. zaleciła przyjęcie dla potrzeb ochrony radiologicznej tzw. bezprogowej hipotezy liniowej (LNT - linear non-threshold), według której zależność między dawką a skutkiem biologicznym ma postać linii prostej (ICRP 1959). Teoria liniowa zakłada, że te same skutki popromienne (nowotwory, choroby genetyczne), ale o różnej intensywności występują po otrzymaniu dużych i małych dawek promieniowania. Wyniki badań epidemiologicznych dla dużych dawek są ekstrapolowane do obszaru najmniejszych dawek, prawie równych zeru (ICRP 1959, Jaworowski 1997).

Istnieją przypuszczenia, że małe dawki promieniowania jonizującego, poniżej 100 mSv, działają stymulująco na organizm m.in. usprawniając działanie układu immunologicznego oraz mechanizmy ochronne komórki przed uszkodzeniami materiału genetycznego i indukcją procesu nowotworowego. Hipoteza ta, dla której dowody są niewystarczające, aby uznać ją za poprawną w ochronie radiologicznej, nosi nazwę hormezy radiacyjnej (Jaworowski 1997, Zdrojewicz i Belowska-Bień 2004). Wyniki badań epidemiologicznych prowadzonych od wielu lat na terenach o podwyższonym tle naturalnego promieniowania jonizującego (m.in. stan Kerala w Indiach, miasto Ramsar w Iranie, stan Yangjiyang w Chinach, gdzie dawki roczne wynoszą ponad 10 mSv) nie wykazały istotnego statystycznie wzrostu ryzyka nowotworów i defektów genetycz-

nych u dzieci urodzonych na tych terenach (Jaworowski 1997). Wyniki te jednak nie rozwiązały kontrowersyjnego problemu przebiegu zależności dawka–efekt w zakresie niskich dawek promieniowania jonizującego i nie są przekonującym dowodem na istnienie zjawiska hormezy.

Radon i jego pochodne emitują cząstki alfa, które są szczególnie wydajne w uszkadzaniu łańcuchów kwasów dezoksyrybonukleinowych (DNA), materiału genetycznego komórki. Radon, gaz szlachetny, jest mało radiotoksyczny - dostając się wraz z powietrzem do płuc jest szybko wydalany z organizmu przez wydychanie. Czas pozostawania Rn-222 w organizmie jest krótki, w 59% jest eliminowany już po 15–30 min., a ostateczny zanik radonu w organizmie do ilości nie uchwytnych analitycznie występuje po 2–3 godz. (za Zdrojewicz i Belowską-Bień 2004). Istotne znaczenie biologiczne, z uwagi na większą radiotoksyczność, mają pochodne radonu, tj. polon, bizmut i ołów (ciała stałe). Powstające jądra produktów rozpadu Rn-222 bardzo szybko otaczają się molekułami pary wodnej, zawartymi w powietrzu, tworząc tzw. klastry molekuł o średnicy 0,5–5,0 nm. W ciągu 1–100 sekund te radioaktywne klastry przyczepiają się do aerozoli atmosferycznych tworząc promieniotwórcze aerozole. Prawdopodobieństwo przyklejenia się produktu rozpadu radonu do aerozolu zwiększa się wraz z jego średnicą (Porstendörfer 1994, za Łoskiewiczem 1996, 1997). Takie promieniotwórcze aerozole są istotnym źródłem narażenia radiologicznego. Z uwagi na krótki czas połowicznego rozpadu (do kilkudziesięciu minut) droga usuwania pochodnych Rn-222 poprzez wydychanie jest utrudniona. Wnikanie alfa-promieniotwórczych pochodnych radonu do organizmu zachodzi poprzez wdychanie ich wraz z aerozolami atmosferycznymi (pyły, gazy). Sam radon, jak wspomniano wcześniej, niewiele wnosi do dawki promieniowania, jaką otrzymuje człowiek. Dla prawidłowej oceny wielkości dawki od radonu i jego pochodnych powinno się znać stężenie pochodnych radonu lub stężenie radonu wraz ze współczynnikiem równowagi promieniotwórczej między Rn-222 i jego pochodnymi. W takim przypadku niezbędny jest pomiar stężenia pochodnych Rn-222 lub stężenia energii potencjalnej alfa (za Chałupnikiem 2007).

Głębokość depozycji pochodnych radonu w układzie oddechowym zależy od rozmiarów cząstek aerozoli. Najczęściej depozycja występuje w górnych częściach układu oddechowego i w nabłonku płucnym, skąd mogą być usuwane w ciągu kilku godzin. Do pęcherzyków płucnych trafiają jedynie najmniejsze cząstki (średnica < 10 μm). Równoważnik dawki dla płuc w konsekwencji wdychania radonu zależy m.in. od stężenia Rn-222, stopnia równowagi promieniotwórczej, szybkości oddychania, obszaru płuc, gdzie są cząsteczki deponowane i czasu usuwania cząsteczek (wpływ średnicy cząsteczek) (za Mazur 2008). Promieniotwórcze aerozole, które tworzą pochodne radonu są źródłem

narażenia radiacyjnego i czynnikiem wzrostu ryzyka chorób nowotworowych dróg oddechowych (Łoskiewicz 1996). Uszkodzenia w komórkach, nie skorygowane przez mechanizmy obronne organizmu, mogą ujawnić się po ok. 20–30 latach jako rak płuc (Niewiadomski i Waligórski 1995). Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej oraz Światowa Organizacja Zdrowia klasyfikują radon i jego pochodne do tej samej grupy czynników ryzyka chorób nowotworowych jak dym tytoniowy, azbest i benzen. Współwystępowanie tych czynników razem z radonem daje efekt synergiczny (wzmacniający), znacznie podwyższający ryzyko wystąpienia chorób nowotworowych płuc (UNSCEAR 2000, WHO 2009).

Efekt wpływu palenia tytoniu na zapadalność na raka płuc dla różnych poziomów stężenia Rn-222 (< 50 $Bq \cdot m^{-3}$, 50–80 $Bq \cdot m^{-3}$, 80–140 $Bq \cdot m^{-3}$, 140–400 $Bq \cdot m^{-3}$, > 400 $Bq \cdot m^{-3}$) przedstawił Raport zawierajacy wyniki badań przeprowadzonych w Szwecji w Karolinska Hospital na grupie 1 360 osób (*Raport Karolinska Hospital* 1991). Przebadano 8 992 domów, w których te osoby mieszkały dłużej niż 2 lata. Z tych badań wynika, iż generalnie obserwuje się wzrost zachorowań na nowotwór płuc wraz z rosnącym stężeniem Rn-222, ale dla grupy niepalących jest on na granicy istotności statystycznej. Wykazano wyraźne wspomaganie efektu palenia tytoniu przez stężenie radonu. Także w tej grupie osób istniała korelacja wzrostu zachorowań na raka płuc wraz ze wzrostem stężenia Rn-222 w powietrzu mieszkań (*Raport Karolinska Hospital* 1991).

Dowodów na rakotwórcze działania radonu w dużych stężeniach dostarczyła zwiększona umieralność na raka płuc wśród górników pracujących przy wydobyciu różnych kopalin, m.in. rud uranu, węgla, miedzi, żelaza, fosforytów. Najwcześniejsze wzmianki o chorobach płuc u górników pojawiły się długo przed odkryciem promieniotwórczości, tj. w XVI w. i dotyczyły górników kopalń w Górach Kruszcowych (pogranicze Czech i Niemiec). Chorobę górników - rak płuc - odkryto dopiero w 1879 r., a w 1921 r. ustalono jej przyczynę jako konsekwencję emanacji radowej. Powiązanie zachorowalności górników kopalń wymienionego rejonu Europy na raka płuc z występowaniem radonu w środowisku pracy przyniosły dopiero badania z lat 40. XX w. (Cothern i Smith 1987). Dalsze badania różnych grup górników pracujących przy wydobyciu uranu w Kanadzie, USA, Czechach, Francji dostarczyły niezaprzeczalnych dowodów na związek wdychania powietrza o dużych stężeniach radonu z rakiem płuc.

Odkrycie w połowie XX w. podwyższonych stężeń radonu w domach mieszkalnych było podstawą do przypuszczenia, iż ryzyko zwiększenia zachorowalności na raka płuc może dotyczyć dużo szerszej populacji niż dotychczas objęta wysokim ryzykiem grupa zawodowa górników. W latach 80. i 90.

XX wieku przeprowadzono badania stężenia radonu w wielu domach w USA i Europie. Radon zaczął być postrzegany jako czynnik zagrożeń środowiskowych i problem ogólnospołeczny. Dość radykalne stanowisko w tej sprawie zajmuje Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) i Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA). Obie organizacje zakładają, że częstość nowotworów jest proporcjonalna do dawki promieniowania jonizującego. Według WHO ekspozycja na radon w budynkach przyczynia się do wzrostu ryzyka wystąpienia nowotworów płuc. Organizacja ta cytując wyniki badań podanych przez EPA, podaje, że radon jest w USA przyczyną 21 000 zgonów na nowotwory płuc rocznie. Podobna liczba zgonów wymieniana jest w przypadku 25 krajów Europy. Oszacowany udział procentowy nowotworów płuc związanych z ekspozycją na radon w domach wynosi od 3 do 14% całkowitej liczby nowotworów płuc. Światowa Organizacja Zdrowia reprezentuje pogląd, że nieznany jest próg koncentracji radonu nie stwarzający ryzyka zdrowotnego, zatem nawet niskie stężenie radonu daje niewielki wzrost ryzyka wystąpienia raka płuc (*WHO Handbook* ... 2009). Wymienione organizacje (WHO, EPA) propagują sposoby usuwania radonu z budynków i sposoby zabezpieczania domów przed migracją radonu do wnętrza. WHO rekomenduje wartość 100 $Bq \cdot m^{-3}$ jako maksymalną, dopuszczalną wartość stężenia radonu w budynkach.

W świetle stanowiska WHO oraz trwających polemik naukowych nad słusznością teorii oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm człowieka wykorzystywanie radonu w lecznictwie uzdrowiskowym do zabiegów balneologicznych (natryski, inhalacje, kąpiele, kuracja pitna itp.) wydaje się być zagadnieniem kontrowersyjnym. W wielu krajach Europy i świata od początku XX w. do czasów współczesnych funkcjonują uzdrowiska w oparciu o zasoby wód radonowych. W lecznictwie wykorzystuje się także radon gromadzący się w powietrzu jaskiń i sztolni. Zabiegi radonowe mają swoich zwolenników, jak i przeciwników. Sceptycyzm w kwestii oddziaływania terapii radonowych na organizm pacjentów i kuracjuszy wiąże się z brakiem jednoznacznych obiektywnych wyników badań potwierdzających pozytywne efekty terapii. W ostatnich latach teoria hormezy zyskuje jednak coraz więcej zwolenników, m.in. w zakresie toksykologii i to może zwiastować rewitalizację wielu uzdrowisk w Polsce (za Przylibskim 2005).

Podsumowaniem nie wyjaśnionej z dużą pewnością statystyczną kwestii wpływu niskich stężeń radonu na zdrowie niech będzie cytat z artykułu pt. „Bać się radonu?” (1997) autorstwa prof. dr hab. Zbigniewa Pawła Zagórskiego z Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie:

„Każdego nieprzyjaciela, nawet domniemanego, należy jednak raczej przeceniać niż lekceważyć”.

2.4. Główne współczesne kierunki badań nad radonem

Radon, odkryty ponad 100 lat temu, cieszy się do dziś niesłabnącym zainteresowaniem wielu dyscyplin naukowych, m.in. geofizyki, fizyki jądrowej, chemii radiacyjnej, geologii, radiobiologii, medycyny. Istnieje bardzo bogaty dorobek publikacyjny w zakresie problematyki radonowej na świecie, którego dokładna prezentacja przekracza ramy niniejszego opracowania. Najważniejsze wątki badawcze dotyczące tego radionuklidu poruszane na łamach literatury o zasięgu międzynarodowym, jak i krajowym, cytując za Przylibskim (2005), to:

- występowanie radonu w kopalniach i innych obiektach przemysłowych,
- różne aspekty występowania radonu w budynkach mieszkalnych (np. uwarunkowania stężenia tego gazu w mieszkaniach, kontekst epidemiologiczny oddziaływania radonu w budynkach, metody redukcji stężeń w budynkach),
- migracja i akumulacja radonu w skorupie ziemskiej,
- występowanie radonu w wodach podziemnych,
- wykorzystanie radonu jako znacznika np. w kartowaniu geologicznym, w przewidywaniu trzęsień ziemi, ruchów w skorupie ziemskiej, wybuchów wulkanów, w poszukiwaniu złóż ropy naftowej, gazów oraz złóż energii geotermalnej, w charakterystyce procesów hydrogeologicznych i hydrologicznych,
- wykorzystanie radonu jako znacznika w charakterystyce ruchów mas powietrza i ewaluacji modeli transportu atmosferycznego.

Badania nad radonem w kontekście meteorologicznym są także wielowątkowe i trwają od wielu lat. W badaniach atmosfery Rn-222 ze względu na swoje właściwości fizyko-chemiczne, m.in. niereaktywność i długi czas połowicznego rozpadu 3,8 dnia - zbliżony do czasu przebywania w atmosferze gazowych domieszek, takich jak NO_x, SO_2, CO, O_3, aerozoli i wody, jest wykorzystywany jako naturalny znacznik procesów transportu i dyspersji gazów w atmosferze, zarówno w skali lokalnej, regionalnej, a także globalnej (Zahorowski i in. 2004). Przykładem pierwszych prac wskazujących na użyteczność Rn-222 jako znacznika procesów atmosferycznych jest artykuł Pearsona i Jonesa z 1965 r.

Monitoring stężenia radonu w atmosferze stał się możliwy dzięki rozwojowi metod pomiaru niskiego poziomu aktywności promieniotwórczej w powietrzu. Pierwszy detektor do ciągłego pomiaru stężenia Rn-222 w powietrzu atmosferycznym metodą pośrednią, wykorzystujący pochodne radonu, skon-

struowano w połowie lat 60. XX w. i można przyjąć, że od tego czasu datuje się rozwój wymienionego wyżej nurtu badawczego.

Pierwsze prace badawcze dotyczące wpływu elementów meteorologicznych na koncentrację radonu w pionowym profilu dolnej atmosfery oraz czasowej zmienności tej koncentracji były prowadzone w oparciu o wykorzystanie do pomiarów węgla aktywnego jako absorbentu dla radonu (Moses i in. 1960). Skonstruowanie we wczesnych latach 70. XX w. monitora Rn-222, przystosowanego do detekcji niskich stężeń tego gazu, umożliwiło pomiary i analizy meteorologiczne dla obszarów wysp i wybrzeży (Zahorowski i in. 2004). Pojawiły się w literaturze wątki badawcze nad radonem łączące zagadnienie transportu tego radionuklidu wraz z różnymi masami powietrza (powietrze morskie cechuje wyraźnie niższy poziom stężeń tego gazu od powietrza kontynentalnego). Jedną z pierwszych prac dotyczących cyrkulacji atmosferycznej i poziomu stężeń Rn-222 w powietrzu opublikowano w 1970 (Lambert i in. 1970), a dotyczyła ona wysp Oceanu Indyjskiego. Wnioski z tej pracy dotyczące użyteczności radonu jako wskaźnika pochodzenia mas powietrza zostały potwierdzone w latach 80. XX w. (za Zahorowskim i in. 2004). Pionierską pracą z zakresu wykorzystania Rn-222 jako znacznika transportu aerozoli w powietrzu było opracowanie Prospero i Carlsona (1970) dotyczące transportu pyłu znad Afryki nad obszar północnego Atlantyku. Szczególnie duży postęp i bogactwo ujęć problemu w badaniach nad radonem jako wskaźnikiem transportu atmosferycznego przyniosły lata 90. XX w. Pomiary stężenia Rn-222 w dolnej troposferze znalazły zastosowanie aplikacyjne w badaniach atmosfery, głównie do tworzenia modeli transportu atmosferycznego (gazów i aerozoli) w skali globalnej i regionalnej. Wśród znaczących dla dorobku tej dziedziny należy wymienić publikacje takich autorów, jak np.: Sakashita i in. (1994), Carvalho (1995), Dueñas i in. (1996b), Jacob i in. (1997), Zahorowski i in. (2004), Arnold i in. (2009, 2010), Chambers i in. (2009), Omori i in. (2009). Szerszy opis literatury dotyczącej związków radonu z cyrkulacją zawiera rozdział 6.

W dobie globalnego ocieplenia, wśród wielu prac dotyczących stężenia Rn-222 w atmosferze, wagą problemu badawczego wyróżniają się te, których celem jest oszacowanie w skali regionalnej strumieni gazów szklarniowych CO_2, N_2O, CH_4 na podstawie tego gazowego radionuklidu (np. Schmidt i in. 1996, Morizumi i in. 1996, Van der Laan i in. 2009).

W latach 90. XX w. zaczęto wykorzystywać radon w konstrukcji modeli ogólnej cyrkulacji atmosfery (GCM) jako pasywny znacznik do ewaluacji horyzontalnego i wertykalnego transportu (Brost i Chatfield 1989, Jacob i Prather 1990). Feichter i Crutzen (1990) wykorzystali Rn-222 do weryfikacji modelu pionowego transportu w rozbudowanych chmurach konwekcyjnych.

Radon w badaniach atmosfery wykorzystywano także jako wskaźnik stabilności atmosfery i dyfuzji zanieczyszczeń oraz procesów mieszania w warstwie granicznej. Jedną z pierwszych prac, w której potraktowano Rn-222 jako wskaźnik poziomu zanieczyszczeń w obszarze zurbanizowanym i zamiejskim było opracowanie Hoslera (1966) dotyczące aglomeracji Waszyngtonu (USA). Autor ten wykazał na podstawie pomiarów stężenia Rn-222 na 3 stacjach, iż poziom koncentracji tego radionuklidu wzrastał 2–4 razy w dniach z nocną inwersją temperatury powietrza i w dniach ze zjawiskiem smogu. Hosler zwrócił uwagę na praktyczny aspekt wykorzystania omawianego radionuklidu jako indykatora stopnia dyspersji zanieczyszczeń atmosferycznych. Zagadnienie to było podejmowane także w latach późniejszych. Przykładem mogą być prace dotyczące Włoch (Mediolan, Rzym), gdzie modelowano dyspersję zanieczyszczeń atmosferycznych (m.in. ołowiu, ozonu, tlenków azotu, tlenku węgla) na podstawie stężenia Rn-222 (Sesana i in. 1998, 2003, Perrino i in. 2001).

Związków między procesami zachodzącymi w warstwie granicznej atmosfery (turbulencja, stany równowagi termodynamicznej atmosfery, wysokość warstwy mieszania) a stężeniem Rn-222 i jego pochodnych poszukiwali w swoich badaniach m.in. Kataoka i in. (1992, 1998, 2001), Butterweck i in. (1994), Hötzl i Winkler (1994), Dueñas i in. (1996a), Porstendörfer i in. (1991), Ośródka i in. (2002, 2003), Baciu (2005), Krajny i Ośródka (2005).

Stężenie Rn-222 i jego pochodnych w powietrzu było także analizowane w aspekcie poszukiwań jego okresowości w odniesieniu do warunków atmosferycznych. Roczną i dobową zmienność w oparciu o długookresowe pomiary tego radionuklidu na tle zmienności wybranych elementów meteorologicznych (m.in. prędkość i kierunek wiatru, ciśnienie atmosferyczne, temperatura powietrza, opady atmosferyczne, występowanie pokrywy śnieżnej) przedstawiali w publikacjach: Winkler i Aehling (1998), El-Hussein i in. (2001), Winkler i in. (2001), Magalhães i in. (2003), Baciu (2005), Zhang i in. (2009), Chan i in. (2010), Florea i Duliu (2012).

Innym wątkiem badawczym dotyczącym radonu w atmosferze jest ocena wpływu stężenia tego radionuklidu na jonizację dolnych warstw troposfery (Chandrashekara i in. 2006, Petrov i in. 2009). Badania te pośrednio mogą być użyteczne do szacowania stężenia aerozoli w dolnej troposferze. Radon wykorzystywany jest także w badaniach mikroklimatu jaskiń oraz podziemnych obiektów turystycznych jako wskaźnik cyrkulacji powietrza i warunków wentylacji. Badania wykazały sezonowe wahania stężenia tego radionuklidu w wymienionych obiektach (jaskinie bez podziemnych cieków) - najczęściej obserwuje się wzrost podczas ciepłej pory roku oraz spadek w chłodnej porze roku (Ciężkowski 1978, Przylibski i Piasecki 1998, Przylibski 2000, Tanahara i in. 1997, Dueñas 1999, Rovenska i Thinova 2010).

Odrębnym wątkiem badań nad wpływem warunków meteorologicznych na stężenie Rn-222 są analizy dotyczące budynków mieszkalnych oraz gleby (np. Riley i in. 1999, Rowe i in. 2002, Kitto 2005, Sundal i in. 2008).

W Polsce wpływ warunków meteorologicznych na zmiany czasowe naturalnej promieniotwórczości powietrza od radonu, toronu i ich pochodnych był podejmowany w latach 60. i 70. XX w. w Instytucie Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego przez Kopcewicza (1968, 1974). Autor ten na łamach Przeglądu Geofizycznego, przedstawił wyniki pomiarów średnich aktywności β radionuklidów naturalnych (radonu i jego pochodnych) w Warszawie w latach 1965–1969 w nawiązaniu do warunków meteorologicznych. Pomiar aktywności promieniotwórczej powietrza w Warszawie był wykonywany na wysokości około 3 m (w latach 1965–1966) i 2 m (w latach 1967–1969) nad gruntem z zastosowaniem filtrów, przez które przechodziły także pyły - produkty rozpadu radonu i toronu. Dokonano szczegółowej analizy zmienności czasowej aktywności β powietrza, wykazując zmienność okresową - dobową i roczną. Charakterystykę zmian dobowych z minimum we wczesnych godzinach porannych i maksimum w godzinach popołudniowych przedstawił Kopcewicz (1968, 1974) w przebiegu rocznym. Wykazał, iż najmniej wyraźny bieg dobowy wystąpił w miesiącach od listopada do lutego, a największy zakres wahań dobowych rejestrowano w miesiącach letnich i wczesnej jesieni. Koncentracja radionuklidów naturalnych w Warszawie wg Kopcewicza wykazuje wyraźny bieg roczny, z minimum w miesiącach marzec–maj i maksimum w okresie jesieni i wczesnej zimy (październik–listopad). Zmiany aktywności β radionuklidów naturalnych w powietrzu przedstawił Kopcewicz na tle warunków meteorologicznych - adwekcji genetycznie nowych mas powietrza, występowania stref frontów atmosferycznych ciepłych i chłodnych, inwersji temperatury powietrza, opadów atmosferycznych i mgieł. Autor korzystał m.in. z map synoptycznych z terminów 00, 06, 12 i 18 GMT, pomiarów aerologicznych w Legionowie k/Warszawy, wykazów spostrzeżeń Warszawa-Bielany. Kopcewicz w swoich opracowaniach zwrócił uwagę na rolę adwekcji w czasowych zmianach radioaktywności naturalnej powietrza w dolnej troposferze. Obszar źródłowy napływającej masy powietrza ma kluczowe znaczenie dla stopnia jej radioaktywności - najwyższe stężenia radonu wystąpiły w masach kontynentalnych z Eurazji (Kopcewicz 1974). Autor wykazał także istotne zaburzenie aktywności β powietrza przez opady ciągłe oraz mgły. W przypadku mgieł wpływ jest dwojaki. Mgły gęste z dużymi kroplami osadzającymi się na podłożu wymywają radionuklidy z powietrza i powodują spadek aktywności powietrza. Mgły umiarkowane, w których jest mniejsze osadzanie wody na powierzchni hamują dyfuzję radionuklidów z podłoża do górnych warstw atmosfery, a tym samym zwiększają aktywność β powietrza w warstwie przy-

gruntowej (Kopcewicz 1974). Kopcewicz w swoich opracowaniach podkreślał, że ocena wpływu czynnika meteorologicznego na aktywność β powietrza jest zadaniem trudnym z uwagi na jednoczesne oddziaływanie wielu zmiennych, m.in. turbulencji w atmosferze i ekshalacji radonu i toronu z podłoża do atmosfery. Autor ten postulował dużą ostrożność interpretacyjną w tego rodzaju badaniach oraz postulował weryfikację otrzymanych przez siebie wyników w oparciu o dłuższe serie obserwacyjne pomiarów radioaktywności dolnej troposfery w powiązaniu z warunkami pogodowymi pochodzące z różnych regionów Polski. Ten postulat badawczy jak dotąd nie został w Polsce zrealizowany, a nurt badań nad meteorologicznymi uwarunkowaniami stężenia radonu w powietrzu nie był szeroko popularyzowany.

Przy okazji prezentacji wyników uzyskanych przez Kopcewicza warto wspomnieć o inicjatywie, którą podjęto w 1967 r., tj. stworzenia punktu synchronicznych pomiarów elementów radioaktywnych, elektrycznych i meteorologicznych w Obserwatorium Geofizycznym PAN w Świdrze (Peńsko i in. 1976). Wyniki pierwszej serii pomiarów (brak rejestracji stężenia radonu i jego produktów) realizowanych na tej stacji, m.in. mocy dawki ekspozycyjnej oraz przewodnictwa elektrycznego w korelacji z warunkami meteorologicznymi, przedstawiono w Przeglądzie Geofizycznym w 1976 r. (Peńsko i in. 1976). Autorzy w tej pracy podkreślali dużą intensywność oddziaływań czynników meteorologicznych na badane parametry i argumentowali istotność badań nad relacją tych zmiennych. Wymieniony profil badań w Obserwatorium Geofizycznym w Świdrze, z pewnymi modyfikacjami, jest kontynuowany do dzisiaj *(http://www.igf.edu.pl/pl/obserwatoria/swider).*

Związki parametrów meteorologicznych i wartości promieniowania gamma oraz radioaktywności atmosfery są od wielu lat także monitorowane w sieci Stacji Wczesnego Wykrywania Skażeń Promieniotwórczych pracujących w strukturze Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego. Pomiary radioaktywności w przyziemnej warstwie atmosfery w Polsce wykonywane są od 1957 r. i obecnie należą do systemu Państwowego Monitoringu Środowiska (podsystem: monitoring promieniowania jonizującego), który nadzoruje Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Wyniki pomiarów prowadzonych na 9 stacjach IMGW w ww. sieci przekazywane są codziennie do Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych w Państwowej Agencji Atomistyki (PAA). W 2000 r. w ramach modernizacji sieci Wykrywania Skażeń Promieniotwórczych uruchomiono nowoczesną aparaturę do pomiarów radioaktywności atmosfery i rozszerzono profil badań m.in. o pomiary radioaktywności izotopów alfa, do których należy radon i toron. W corocznych opracowaniach wyników pomiarów radioaktywności atmosfery, publikowanych na oficjalnej stronie internetowej Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska

podawane są przykłady zależności parametrów meteorologicznych i wartości promieniowania gamma oraz radioaktywności atmosfery. W raportach tych podaje się m.in., że opad deszczu zmniejsza aktywność promieniowania alfa naturalnego wymywając z powietrza izotopy alfa promieniotwórcze. Opad śniegu powoduje zwiększenie mierzonych wartości aktywności aerozoli alfa naturalnych, co tłumaczy się kumulacją cząstek w przyziemnej warstwie powietrza *(http://www.gios.gov.pl/).*

Drugą siecią pomiarów skażeń radioaktywnych atmosfery w Polsce, obok wyżej opisanej, cechującą się znacznie większą czułością jest sieć nadzorowana przez CLOR i pracująca dla PAA, wyposażona w stacje ASS-500. Te wysokoczułe stacje stanowią główny trzon sieci radiacyjnego monitoringu Polski. *(http://www.clor.waw.pl/ochrona/stacje.htm).*

Pomiary stężenia promieniotwórczego samego radonu (Rn-222) w powietrzu w dolnej troposferze na terenie Polski i opracowania wyników badań związku koncentracji tego radionuklidu z parametrami meteorologicznymi nie są tak rozpowszechnione jak wyżej opisane pomiary stężenia izotopów alfa i beta promieniotwórczych w sieci IMGW. Pomiary aktywności radonu w atmosferze są prowadzone w Krakowie na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej. Punkt pomiarowy stężenia Rn-222 jest zlokalizowany ok. 20 m nad ziemią, w klatce meteorologicznej na dachu budynku Wydziału FiIS AGH. Ciągłe pomiary stężenia Rn-222 metodą pośrednią poprzez pomiar aktywności pochodnych radonu (Po-214 i Po-218) techniką filtrową (ciągłe pompowanie powietrza i detekcja promieniowania alfa od aerozoli zebranych na filtrze) rozpoczęto w AGH w maju 2004 r. Wybrane wyniki badań dotyczące czasowej zmienności stężenia Rn-222 w powietrzu w latach 2004–2007 w relacji z sytuacją synoptyczną, prędkością wiatru, opadem zaprezentowano na Międzynarodowej Konferencji „Radon in Environment" w 2009 r. (Wach i in. 2009) i jak dotąd nie doczekały się szerszej prezentacji na łamach literatury. Autorzy wykazali zmienność dobową i roczną stężenia Rn-222 z maksimum w październiku i minimum w marcu lub kwietniu. Roczna okresowość stężenia Rn-222 wykazana w Krakowie była zgodna ze spostrzeżeniami przedstawionymi przez Kopcewicza dla Warszawy (Kopcewicz 1968, 1974). Wymieniona seria pomiarów stężenia Rn-222 w Krakowie była prezentowana także w opracowaniu Zimnocha i Godłowskiej (2009).

Wyniki pomiarów stężenia Rn-222 prowadzone w AGH w okresie od czerwca 2004 r. do czerwca 2007 r. były także wykorzystywane do szacowania średnich miesięcznych wartości strumienia gazów cieplarnianych, CO_2 i CH_4 emitownych z obszaru Krakowa (Zimnoch i in. 2008).

Ciągłe, bezpośrednie pomiary stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. w Krakowie metodą aktywną z zastosowaniem komory jonizacyjnej Alpha-

GUARD PQ Pro (dokładny opis metody i lokalizacji pomiarów w rozdz. 3) były prowadzone przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w okresie od grudnia 2007 r. do marca 2010 r. Pomiary te prowadzono w ramach realizacji wspólnego projektu badawczego z Katedrą Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Łódzkiego (projekt MNiSW N306 015 32/1011), synchronicznie do pomiarów stężenia Rn-222 wykonywanych tym samym przyrządem w środkowej Polsce. Wyniki pomiarów stężenia Rn-222 na tle parametrów meteorologicznych prezentowano wspólnie z wynikami stężenia Rn-222 dla Łodzi i stacji w Ciosnach w publikacjach wymienionych poniżej. Monitoring stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza synchronicznie z wybranymi elementami meteorologicznymi w Łodzi i Ciosnach zapoczątkowany w 2007 r. jest obecne kontynuowany. Klimatologiczny wątek badań nad stężeniem promieniotwórczym Rn-222 w środkowej Polsce i w Krakowie w ujęciu klimatologii miejskiej oraz w aspekcie makroskalowym (związków z cyrkulacją atmosfery) został wstępnie przedstawiony w kilku opracowaniach (Podstawczyńska i in. 2008, 2009, 2010a, 2010b, 2010c, Podstawczyńska i Piotrowski 2010a, 2010b, Podstawczyńska i Piotrowski 2012, Podstawczyńska 2012a, 2012b), a obecnie rozszerzony i podsumowany przez autorkę w niniejszej pracy.

Do nurtu badań nad stężeniem Rn-222 w odniesieniu do związków z pogodą (głównie analiza zmian ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza) i klimatem w Polsce należy także zaliczyć prace dotyczące budynków mieszkalnych (np. Karpińska i in. 2004a, 2004b, Kozak i in. 2011). Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie zespołu autorskiego Kozak i in. (2011), gdzie podjęto próbę zastosowania regionalizacji termiczno-opadowej klimatu Polski do prezentacji wyników pomiarów stężenia Rn-222 w budynkach. Przedmiotem analiz stężenia Rn-222 w powiązaniu z warunkami meteorologicznymi były opracowania dotyczące mikroklimatu Jaskini Niedźwiedziej, o których już wspomniano w tym rozdziale (np. Ciężkowski 1978, Przylibski i Piasecki 1998).

Z prac polskich autorów zajmujących się problematyką radonową w kontekście warunków atmosferycznych należy wymienić publikację Krajny i Ośródki (2005) dotyczącą badania dobowej zmienności wysokości warstwy mieszania w Katowicach i Krakowie. Praca ta w zasadniczej części dotyczyła wykorzystania pochodnej radonu - polonu (Po-218) do szacowania wysokości warstwy mieszania. Tej samej tematyki dotyczyły publikacje Ośródki i innych wydane w latach 2002 i 2003. W opracowaniach założono wysoki stopień równowagi pomiędzy Rn-222 a Po-218, zatem wartościom stężenia polonu odpowiadały stężenia radonu. Radon w pracy Krajny i Ośródki (2005) wykorzystano dodatkowo w ujęciu analizy czasowej zmienności stężenia tego

radionuklidu (prekursora polonu) w powietrzu glebowym na tle warunków meteorologicznych. Stwierdzono, że dla okresów jednodniowych brak wpływu warunków meteorologicznych na stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym na głębokości 1 m. Dla okresów 10–20 dniowych wykazano wyraźny wpływ temperatury powietrza, opadów, wiatru na stężenie Rn-222 w glebie.

Wśród prac dotyczących ekshalacji Rn-222, nowatorskim opracowaniem w polskiej literaturze była publikacja Mazur (2008) dotycząca problematyki szybkości ekshalacji Rn-222 w zależności od parametrów meteorologicznych powietrza i gleby. Wybrane wyniki badań przedstawione w pracy Mazur omówiono w podrozdziale 3.3.

3. POMIARY STĘŻENIA RADONU I ELEMENTÓW METEOROLOGICZNYCH W ŚRODKOWEJ POLSCE I KRAKOWIE

3.1. Metodyka pomiarów stężenia Rn-222 i elementów meteorologicznych

Opracowanie i rozwój metod pomiaru niskiego poziomu aktywności promieniotwórczej radionuklidów umożliwiło monitoring stężenia radonu w atmosferze (Zahorowski i in. 2004). Z uwagi na bardzo niskie stężenie Rn-222 w powietrzu atmosferycznym, tj. 1 atom na ok. 10^{18} atomów gazów wchodzących w skład powietrza metoda jego pomiaru opiera się na detekcji promieniowania emitowanego w wyniku rozpadów radonu lub jego pochodnych. Promieniowanie to wywołuje w detektorze jonizację, a pomiar generalnie polega na rejestrowaniu jonizacji lub jej następstw w postaci np. przepływu prądu, czy naruszenia struktury i pozostawieniu śladu na przenikanej materii. Dopiero w połowie lat 60. XX w. skonstruowano pierwszy detektor do ciągłego pomiaru stężenia Rn-222 w powietrzu atmosferycznym metodą pośrednią, poprzez wykorzystanie pochodnych radonu (Zahorowski i in. 2004). Czułość detektora umożliwiała jedynie pomiar stężenia Rn-222 na stacjach kontynentalnych. Na początku lat 70. XX w. skonstruowano detektor o dużej czułości, rejestrujący bardzo niskie stężenia Rn-222 cechujące powietrze morskie, co umożliwiło monitoring zawartości tego radionuklidu na terenach nadmorskich i wyspach. Lata 90. XX w. to dekada dużego postępu w technikach pomiarowych – skonstruowano zaawansowane automatyczne detektory do bezpośredniego pomiaru stężenia Rn-222, bez wykorzystania jego pochodnych (Zahorowski i in. 2004).

Detektorem stężenia Rn-222 w powietrzu wykorzystanym do długoterminowych, ciągłych pomiarów w Łodzi i na stacji zamiejskiej w Ciosnach, był przyrząd AlphaGUARD® PQ2000PRO niemieckiej firmy Genitron Instruments GmbH, w przyrządzie tym detektorem radonu jest komora jonizacyjna (rys. 3.1). Miernik ten posiada szeroki zakres pomiarowy - pomiędzy 2–2 000 000 $Bq \cdot m^{-3}$ oraz możliwość ciągłej rejestracji danych z krótkim, 10–minutowym krokiem czasowym, odpowiadającym systemowi pracy m.in. automatycznych stacji meteorologicznych. Urządzenie jest przystosowane do bezobsługowej, długoterminowej pracy w zewnętrznych warunkach środowiskowych i może być wykorzystywane (z dodatkowym wyposażeniem) nie tylko do oznaczania stężenia radonu i produktów jego rozpadu w powietrzu, ale

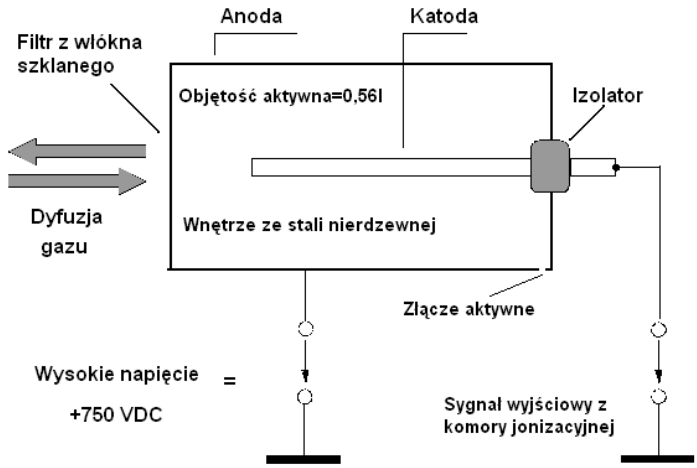
także w wodzie i glebie (rys. 3.2). Jest to miernik rejestrujący dane o stężeniach radonu z równoczesnym pomiarem parametrów meteorologicznych. Przyrząd ten ma duże możliwości konfiguracyjne z innymi systemami pomiarowymi m.in. elementów pogody. Specjalistyczne komputerowe oprogramowanie miernika AlphaGUARD o nazwie DataEXPERT zapewnia właściwą weryfikację danych i możliwość obszernej analizy wyników pomiarów wszystkich elementów w trybie off-line.

Rys. 3.1. Przyrząd AlphaGUARD® PQ2000PRO w Ogrodzie Skalnym Collegium Geographicum Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego (fot. A. Podstawczyńska)

Fig. 3.1. AlphaGUARD® PQ2000PRO device in the Rocky Garden of Collegium Geographicum of Faculty of Geographical Sciences, University of Łódź (photo by A. Podstawczyńska)

Przyrząd AlphaGUARD jest urządzeniem przenośnym, mogącym pracować w technice aktywnej pomiarów. Do pracy miernika niezbędne jest źródło zasilania sieciowego lub wewnętrznego. Urządzenie jest przystosowane do ciągłych pomiarów stężenia radonu oraz jego pochodnych, a także 3 parametrów meteorologicznych (temperatura, wilgotność i ciśnienie powietrza) oraz mocy dawki promieniowania gamma. W konstrukcji przyrządu zastosowano impulsową komorę jonizacyjną (spektrometria alfa) o objętości roboczej 0,56 l, do której gaz przechodzi w trybie dyfuzyjnym przez filtr z włókna szklanego (rys. 3.2). Przez filtr przechodzi tylko Rn-222, a produkty rozpadu radonu lub zanieczyszczenia pyłowe są zatrzymywane. Wnętrze komory jonizacyjnej jest metalowe, a jej centralną część stanowi sztywna elektroda o potencjale +750V. Elektroda centralna rejestruje impulsy elektryczne generowane przez promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu (rejestracja prądu jonizacji) i połą-

czona jest z obwodami elektroniki dokonującymi cyfrową obróbkę sygnału (rys. 3.2). Cyfrowa obróbka sygnału pomiarowego oparta jest m.in. na algorytmie eliminacji zliczeń impulsów pochodzących od produktów rozpadu Rn-222, co pozwala na rejestrację stężenia radonu w komorze pomiarowej. Przepływ gazu przez komorę jonizacyjną może być także wymuszony pompą połączoną przez złącze aktywne z miernikiem, wówczas urządzenie pracuje w trybie tzw. przepływowym (Genitron Instruments GmbH 1998). Miernik AlphaGUARD, w opisywanych w niniejszej pracy pomiarach stężenia Rn-222 w powietrzu atmosferycznym, pracował w ciągłym trybie dyfuzyjnym, a w trakcie pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym działał w trybie przepływowym. Interwał czasowy uśredniania pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu atmosferycznym wykonywanych dla potrzeb niniejszego opracowania to 60 min.



Rys. 3.2. Schemat komory jonizacyjnej AlphaGUARD® PQ2000PRO firmy Genitron Instruments GmbH (na podstawie: Genitron Instruments GmbH 1998)

Fig. 3.2. Scheme of ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO by Genitron Instruments GmbH (based on: Genitron Instruments GmbH 1998)

Dane były gromadzone w module pamięci miernika AlphaGUARD i przenoszone co miesiąc na nośnik zewnętrzny (rys. 3.3.a). Urządzenie AlphaGUARD® PQ2000PRO firmy Genitron Instruments GmbH wyróżnia się wysoką jakością wyników pomiarów zweryfikowaną przez renomowane światowe instytuty miernictwa, tj. NIST (National Institute of Standards and Technology,

USA), PTB (The Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Niemcy), NPL (The National Physical Laboratory, Wielka Brytania). Kalibracji urządzenia dokonał producent w oparciu o światowe standardy kalibracyjne dla pomiarów radonu wyznaczone przez NIST, PTB i NPL (Genitron Instruments GmbH 1998). Przyrządy użytkowane dla potrzeb niniejszej pracy posiadają certyfikaty kalibracji wydane przez producenta urządzenia. Producent urządzenia AlphaGUARD gwarantuje stabilność pracy miernika przez 5 lat ciągłego użytkowania. Przyrząd w tym czasie nie wymaga kalibracji. Przyrząd AlphaGUARD wyposażony jest w wewnętrzny system zapewnienia jakości danych. Równolegle z pomiarem stężenia radonu mikroprocesor prowadzi szereg powtarzalnych programów kontrolnych i testów wiarygodności danych. Wyniki obliczeń są rejestrowane w pamięci wewnętrznej przyrządu jednocześnie z wartością koncentracji radonu oraz parametrów meteorologicznych. Wyniki pomiarów są przenoszone do komputera razem z protokołem programów zapewniania jakości. Oprogramowanie DataEXPERT do analizy wyników z przyrządu AlphaGUARD pozwala na analizę tego protokołu. Protokół składa się z dwóch części, tj. SYSQAG (warunki sprzętowe) i DATQAG (jakość danych). Umożliwia to użytkownikowi dokładny monitoring stanu urządzenia oraz wykrycie różnic w wartościach danych spowodowanych np. pracą miernika radonu w ekstremalnych warunkach (np. w czasie kondensacji pary wodnej na urządzeniu) (Genitron Instruments GmbH 1998, Genrich 2006).

Urządzenie AlphaGUARD® PQ2000PRO wykorzystano także do pomiaru chwilowego stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym na stacjach do ciągłego monitoringu stężenia Ra-226 w przygruntowej warstwie powietrza. Zestaw pomiarowy składał się z następujących przyrządów: miernika AlphaGUARD® PQ2000PRO, sondy RS-1 do pobory powietrza glebowego, pompy AlphaPUMP i rurki łączącej sondę z miernikiem (rys. 3.3.b). Pomiar poprzedziło wykonanie otworu glebowego o średnicy 5 cm i głębokości 1 m za pomocą świdra ręcznego, gdzie umieszczono sondę glebową do poboru powietrza. Sondę połączono z pompką AlphaPUMP wtłaczającą powietrze do detektora AlphaGUARD, co oznacza, że komora jonizacyjna pracowała w trybie przepływowym, tj. powietrze glebowe było pompowane przez złącze aktywne. Wartość mierzonego chwilowego stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym to średnia z około 30 jednominutowych pomiarów zarejestrowanych przez detektor (Swakoń i in. 2005). Mobilne Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych CHIMERA LAB wykorzystano w pomiarach stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym, a także do poboru i transportu próbek gleby do badań zawartości m.in. Ra-226 w podłożu na analizowanych stacjach.

Wyniki pomiarów stężenia Rn-222 były weryfikowane w konsultacji z Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie na podstawie analizy protokołu zapewnienia jakości danych. Protokół z wynikami oceny jakości danych dostarczają mierniki AlphaGUARD® PQ2000PRO, które równolegle z pomiarem stężenia radonu prowadzą szereg powtarzalnych programów kontrolnych i testów wiarygodności danych (Genrich 2006).

Oprócz długoterminowych pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu wykonano także pomiary średniego stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym z zastosowaniem metody pasywnej za pomocą detektorów śladowych CR-39. Pomiary miały na celu rozpoznanie środowiska emisji Rn-222. Detektory zostały umieszczone w otworze glebowym o średnicy ok. 10 cm, wykonanym za pomocą świdra okienkowego, na głębokości 1 m.

a. b.

Rys. 3.3. a. Przyrząd AlphaGUARD® PQ2000PRO w konfiguracji z komputerem w trakcie transmisji danych, stacja Ciosny; b. System pomiarowy chwilowych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym - komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO, sonda glebowa RS-1, pompa AlphaPUMP - wykorzystany w sesji pomiarowej na Miejskiej Stacji Meteorologicznej (MSM) w centrum Łodzi w dniu 19.02.2008 r. (fot. A. Podstawczyńska)

Fig. 3.3. a. AlphaGUARD® PQ2000PRO device in configuration of the computer during data transmission, the station Ciosny; b. System of instantaneous measurements of Rn-222 concentrations in soil air - ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO, a soil probe RS-1, the pump AlphaPUMP - used in the measurement session at the Municipal Meteorological Station (MSM) in the city centre on 19th February 2008 (photo by A. Podstawczyńska)

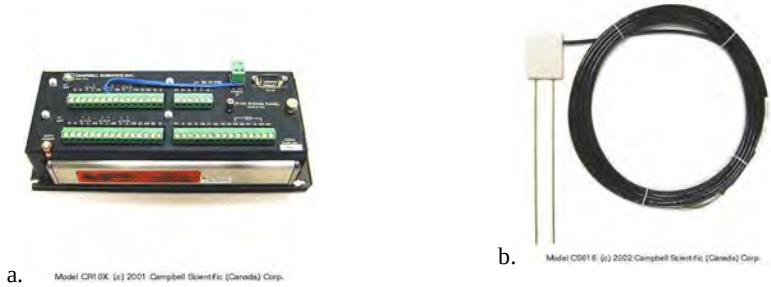
Laboratoryjne opracowanie wyników pomiarów wykonano w latach 2008–2010 w Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN w Krakowie, zgodnie z udokumentowanym systemem jakości spełniającym wymagania normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 z wykorzystaniem atestowanych wzorców kalibracyjnych (Mamont-Cieśla i in. 2010). Odczyt detektorów prowadzony był za pomocą automatycznego systemu „The Radosys - dosimeter systems based on CR-39 etched-track technology". Budowę detektora przedstawia rys. 3.4. Detektor składa się z plastikowej osłony, tzw. komory dyfuzyjnej oraz umieszczonej wewnątrz komory folii CR-39 (poliwęglan allilodiglikolowy). Radon dyfunduje do komory przez materiał obudowy i w trakcie rozpadu promieniotwórczego emituje cząstki alfa, które pozostawiają ślady na folii w postaci mikroskopijnych uszkodzeń. Średnica mikrośladu powstałego na folii w wyniku uderzenia cząsteczki alfa jest rzędu 20 nm. Uszkodzenia te są dopiero widoczne na folii pod mikroskopem, po uprzednim jej wytrawieniu zasadą NaOH lub KOH. Proces wytrawiania powiększa średnicę mikrośladów o około 1000 razy, co umożliwia ich zliczanie i obliczenie średniego stężenia Rn-222.

Rys. 3.4. Budowa detektora śladowego CR-39 wykorzystywanego do sezonowych pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym: a. Komora dyfuzyjna z detektorem śladowym CR-39; b. Schemat budowy komory dyfuzyjnej z detektorem śladowym, tj. folią CR-39; c. Obraz mikroskopowy śladów cząstek alfa pochodzących z rozpadu Rn-222 na folii CR-39 (poliwęglan allilodiglikolowy) po jej wytrawieniu (opracowanie własne na podstawie materiałów udostępnionych przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN w Krakowie)

Fig. 3.4. Construction of a trace detector CR-39 used for the measurements of seasonal Rn-222 concentration in soil: a. Diffuse chamber with etched-track detector foil CR-39; b. Scheme of construction of diffuse chamber with etched-track detector i.e. foil CR-39; c. Microscopic image of alpha particle tracks from Rn-222 decay on foil CR-39 (polycarbonate) after etching (own elaboration based on material from Laboratory of Radiometric Expertise Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences in Kraków)

W niniejszej pracy oprócz danych o stężeniu Rn-222 zostały przedstawione wyniki pomiarów meteorologicznych, wykonywanych równolegle do pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu. Dane o temperaturze i wilgotności względ-

nej powietrza oraz ciśnieniu atmosferycznym na wysokości 2 m nad gruntem pochodzą z czujników zainstalowanych w urządzeniu Alpha GUARD pracującym synchronicznie na 3 stacjach, tj. w Łodzi, Ciosnach i Krakowie. Poprawność wyników wymienionych elementów meteorologicznych została zweryfikowana poprzez m.in. porównanie z wynikami pomiarów przyrządów pracujących w ramach systemu pomiarowego automatycznej Miejskiej Stacji Meteorologicznej (MSM) w centrum Łodzi oraz Stacji Hydrologiczno-Meteorolo-gicznej w Ciosnach.



Rys. 3.5. a. Rejestrator danych meteorologicznych CR10X; b. Reflektometr CS616 do pomiaru wilgotności gruntu firmy Campbell Scientific, Inc. wykorzystywane na stacjach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 3.5. Meteorological data logger CR10X; CS616 reflectometer to measure soil moisture Campbell Scientific, Inc. used in Ciosny and Łódź stations in 2008–2010

Na stacjach w centralnej Polsce dla potrzeb niniejszej pracy prowadzono także pomiary: prędkości wiatru (wiatromierz A100R firmy Victor Instruments), temperatury powietrza na wysokości 20 cm nad gruntem (sonda HMP45 firmy Vaisala, pomiar dla celów monitoringu różnic temperatury w warstwie 2,0 m–0,2 m), wilgotności gruntu metodą objętościową w % *VWC* (reflektometr CS616 firmy Campbell Scientific, Inc., rys. 3.5), strumienia ciepła glebowego *QG* (płytki HFP01 Heat Flux Plate firmy Campbell Scientific, Inc., rys. 3.6). Reflektometr zainstalowano na głębokości 3 cm, pod kątem ok. 40° w stosunku do powierzchni gruntu, co daje pomiar wilgotności gruntu w warstwie ok. 20 cm. Płytki do pomiaru strumienia ciepła w gruncie umieszczono na głębokości ok. 10 cm. Strumień ciepła (*QG*) wyrażony jest w Wm^{-2}. Powierzchnia gruntu była pokryta trawą na obu stanowiskach pomiarowych. Dodatni *QG* oznacza przychód ciepła do powierzchni czynnej, a ujemny *QG* oznacza rozchodzenie się ciepła od powierzchni czynnej w głąb gruntu. Rejestratorem danych na stacjach w Ciosnach i MSM był Datalogger CR10X firmy Campbell Scientific, Inc., rys. 3.5.

Rys. 3.6. Przyrząd do pomiaru strumienia ciepła w gruncie – płytki HFP01 Heat Flux Plate firmy Campbell Scientific, Inc. wykorzystywany na stacjach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 3.6. Instrument to measure the heat flux in the soil – shallow HFP01 Plate Heat Flux Campbell Scientific, Inc. used in Ciosny and Łódź stations in 2008–2010

3.2. Lokalizacja stacji pomiarowych stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza

Pomiary stężenia Rn-222 były prowadzone w dolnej warstwie granicznej atmosfery zwanej warstwą tarcia, na wysokości 2 m nad gruntem. Przygruntowa warstwa atmosfery to środowisko życia człowieka, w którym radon stanowi główne, naturalne źródło promieniowania jonizującego. Kolejnym argumentem przemawiającym za lokalizacją w warstwie tarcia stanowisk pomiarowych dla długoterminowego monitoringu stężenia tego radionuklidu była najsilniej zaznaczająca się w tej części warstwy granicznej atmosfery indywidualność klimatu lokalnego. Na tę indywidualność mają wpływ w dużym stopniu cechy podłoża. Specyfika mikroklimatyczna stanowisk pomiarowych - stacja MSM w Łodzi reprezentatywna dla obszarów zurbanizowanych oraz stacja Ciosny zlokalizowana w warunkach zamiejskich - umożliwiają analizę stężenia Rn-222 na tle różnic klimatu lokalnego (rys. 3.7).

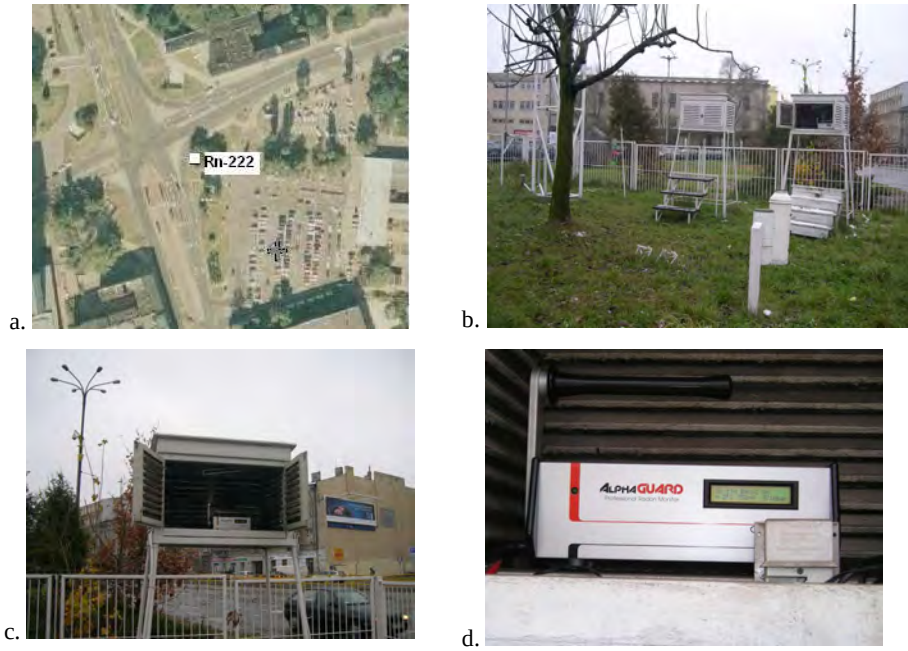
Rys. 3.7. Lokalizacja stacji pomiarowych stężenia radonu (Rn-222) w centralnej Polsce. 1 MSM - Miejska Stacja Meteorologiczna Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ, k/dworca kolejowego Łódź-Fabryczna, 2 Ciosny - Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ, gmina Zgierz (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*)

Fig. 3.7. Location of radon (Rn-222) concentration measuring stations in central Poland. 1 MSM - Municipal Meteorological Station of Department of Meteorology and Climatology, University of Łódź, near Łodź-Fabryczna railway station, 2 Ciosny - Hydrological and Meteorological Station of Department of Hydrology and Water Management, University of Łódź, Zgierz community (based on: *www.geoportal.gov.pl*)

Mierniki radonu AlphaGUARD® PQ2000PRO były ustawione na wysokości 2 m n.p.g. w klatce meteorologicznej na trzech stanowiskach pomiarowych, a pomiary odbywały się z zachowaniem tej samej metodyki:

1) Łódź - 51°46’10”N, 19°27’55”E, 214 m n.p.m. - Miejska Stacja Meteorologiczna (MSM) Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ, centrum Łodzi, k/dworca kolejowego Łódź-Fabryczna, u zbiegu ulic: Kilińskiego i Składowej (rys. 3.7 i 3.8),
2) Ciosny - 51°55’24”N, 19°24’38”E, 150 m n.p.m. - Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ, gmina Zgierz, 25 km na północ od centrum Łodzi, posesja Ciosny 7 (rys. 3.9 i 3.10),

3) Kraków - 50°05’27”N, 19°53’26”E, 231 m n.p.m. - teren Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN), ul. Radzikowskiego 152, północno-zachodnia część miasta, dzielnica Bronowice (rys. 3.12 i 3.13).



a. b. c. d.

Rys. 3.8. a. Lokalizacja i otoczenie stacji pomiarowej stężenia Rn-222 w centrum Łodzi, k/dworca kolejowego Łódź-Fabryczna, u zbiegu ulic: Kilińskiego i Składowej (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*); b. Miejska Stacja Meteorologiczna Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ; c-d. Klatka meteorologiczna z komorą jonizacyjną AlphaGUARD® PQ2000PRO (fot. A. Podstawczyńska)

Fig. 3.8. a. Location and surroundings of radon (Rn-222) concentration measuring stations in the centre of Łódź, near Łódź-Fabryczna raylway station, at the intersection of Kilińskiego and Skladowa streets (based on: *www.geoportal.gov.pl*); b. Municipal Meteorological Station of Department of Meteorology and Climatology, University of Łódź; c-d. Meteorological box with automatic ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO (photo by A. Podstawczyńska)

Stacja MSM w Łodzi jest w pełni reprezentatywna dla miejskich warunków klimatycznych. Stacja ta położona jest blisko geometrycznego środka miasta, na śródmiejskim placu przy dworu kolejowym. Udział powierzchni sztucznych wokół stacji to ok. 80%, a przeciętna wysokość budynków wynosi ok. 20 m (Fortuniak i in. 2006), rys. 3.8.

Stacja w Ciosnach reprezentuje warunki typowe dla obszarów zamiejskich. Jest położona na terenie rolniczym, w bezpośrednim sąsiedztwie pola uprawnego. Posesja nr 7, przy której zlokalizowana jest Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ w Ciosnach, położona jest w odległości ok. 500 m od autostrady A2, w otoczeniu pól uprawnych i z niewielkim udziałem kompleksów leśnych (rys. 3.9).

Stanowisko do pomiarów stężenia Rn-222 w Krakowie jest położone w północnej części terenu zajmowanego przez IFJ PAN, na nieosłoniętym przez budynki obszarze zielonym (rys. 3.12 i 3.13). Dzielnica Bronowice, gdzie zlokalizowany jest IFJ PAN cechuje się luźną zabudową miejską z dużym udziałem terenów zielonych, zatem można przyjąć, że teren stacji reprezentuje warunki klimatyczne typowe dla obszarów podmiejskich.

Przed rozpoczęciem synchronicznego monitoringu stężenia Rn-222 na wymienionych stanowiskach dokonano pomiarów porównawczych z wykorzystaniem 3 mierników AlphaGUARD® PQ2000PRO przeznaczonych do pracy na tych stanowiskach. W zarejestrowanych wynikach nie odnotowano różnic między wskazaniami mierników.

a.

b.

Rys. 3.9. a-b. Lokalizacja i otoczenie stacji pomiarowej stężenia Rn-222 w Ciosnach, posesja nr 7 (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*)

Fig. 3.9. a-b. Location and surroundings of radon (Rn-222) concentration measuring stations in Ciosny, premises No. 7 (based on: *www.geoportal.gov.pl*)

a.

b.

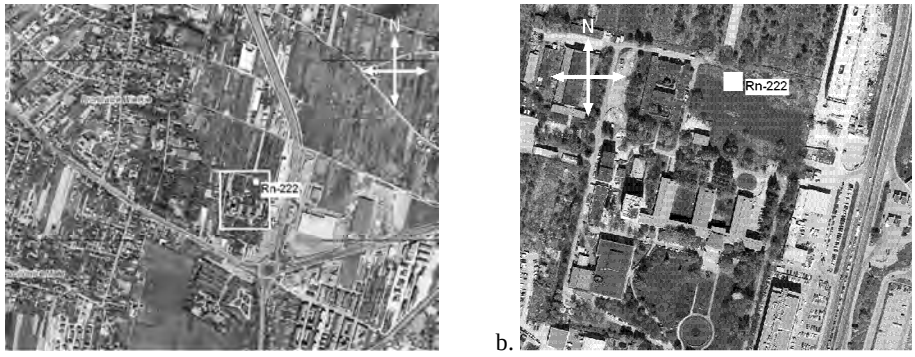
c.

Rys. 3.10. a. Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej Uniwersytetu Łódzkiego w Ciosnach, gm. Zgierz; b. Komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO; c. System do rejestracji danych meteorologicznych na stacji w Ciosnach – Data Logger CR10X firmy Campbell Scientific, Inc. (fot. A. Podstawczyńska)

Fig. 3.10. a. Hydrological and Meteorological Station of Department of Hydrology and Water Management, University of Łódź in Ciosny, Zgierz community; b. Ionizatiom chamber Alpha-GUARD® PQ2000PRO; c. Meteorological data recording system at the station in Ciosnach - Data Logger CR10X Campbell Scientific, Inc. (photo by A. Podstawczyńska)

Rys. 3.11. Lokalizacja stacji pomiarowej stężenia radonu (Rn-222) w Krakowie (teren IFJ PAN). IFJ PAN – Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, ul. Radzikowskiego 152, dzielnica Bronowice (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*)

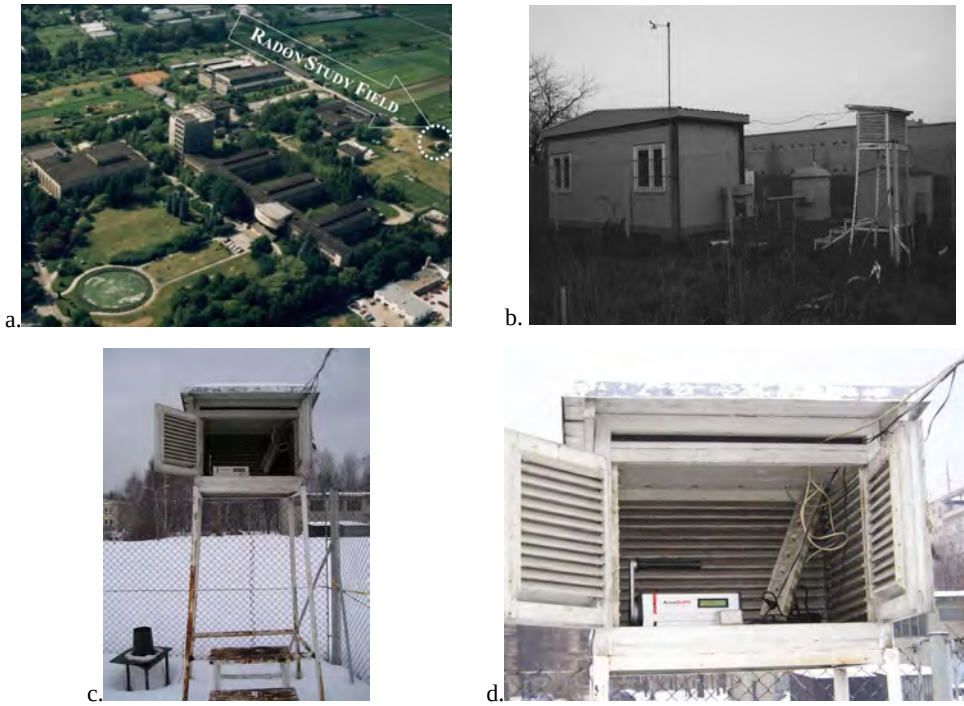
Fig. 3.11. Location of radon (Rn-222) concentration measuring stations in Kraków (area of IFJ PAN). IFJ PAN - Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences), 152 Radzikowskiego Avenue, Bronowice district (based on: *www.geoportal.gov.pl*)



a. b.

Rys. 3.12. Lokalizacja i otoczenie stacji pomiarowej stężenia Rn-222 w Krakowie, teren Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, przy ul. Radzikowskiego 152 (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*)

Fig. 3.12. Location and surroundings of radon (Rn-222) concentration measuring stations in Kraków, area of Henryk Niewodniczański Institite of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences, 152 Radzikowskiego Avenue (based on: *www.geoportal.gov.pl*)



Rys. 3.13. a. Położenie stacji pomiarów stężenia Rn-222 (Radon Study Field) na terenie IFJ PAN w Krakowie; b. Fotografia stacji do pomiarów stężenia Rn-222 w IFJ PAN; c-d. Komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO w klatce meteorologicznej na terenie Radon Study Field (fotografie udostępnione przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN)

Fig. 3.13. a. Location of radon (Rn-222) concentration measuring stations (Radon Study Field) within area of Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences in Kraków; b. Photo of the radon (Rn-222) concentration measuring stations in the IFJ PAN c-d. Ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO in the meteorological box within Radon Field Study (photographs provided by the Laboratory of Radiometric Expertise IFJ PAN)

3.3. Cechy środowiskowe emisji Rn-222 na badanych stacjach

Głównym źródłem radonu w atmosferze jest grunt, skąd gaz ten wydobywa się w procesie ekshalacji. W ramach prowadzonych badań nad stężeniem Rn-222 w powietrzu rozpoznano typ podłoża na analizowanych stacjach oraz pobrano próbki gleby do analizy spektrometrycznej w celu określenia zawartości radu (Ra-226) - prekursora radonu, a także toru (Th-228,) i potasu (K-40). Założono, że w stanie nienaruszonym w glebie stężenie Ra-226 jest takie samo jak U-238, a stężenie Th-228 identyczne jak Th-232.

Podłoże na stacji w centrum Łodzi stanowi glina z fragmentami materiałów budowlanych (głównie cegły). Stacja Ciosny położona jest na obszarze zlodowacenia Warty (234 000–127 000 lat temu), a osadami dominującymi na tym terenie są piaski i piaski ze żwirami wodnolodowcowymi, o miąższości około 20 m, zalegające na glinach zwałowych (Klatkowa i in. 1991). Podłoże na stacji w Krakowie ma charakter jednorodny, bez uskoków tektonicznych, z warstwą gliny o miąższości nie przekraczającej 8 m, zalegającej na warstwie lessów o grubości ok. 10 m. Pod nimi zalegają iły mioceńskie na warstwie wapieni jurajskich (Mazur 2008).

Tabela 3.1

Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w glebie na stacjach w Łodzi, Ciosnach i Krakowie

Table 3.1

Content of natural radioactive isotopes in soil on Łódź, Ciosny and Kraków stations

Lp.	**Lokalizacja punktów pomiarowych**	**Punkt pomiarowy**	**Stężenie K-40 [Bq/kg]**	**Stężenie Ra-226 [Bq/kg]**	**Stężenie Th-228 [Bq/kg]**
Średnia i zakres wahań w Polsce *			408,0 (60 ÷ 1028)	25,0 (4,2 ÷ 116)	23,4** (3,6 ÷ 82,3)
Średnia dla woj. łódzkiego*			278,0	13,1	12,7
1	51°46’10”N 19°27’55”E	Łódź	317,0 ± 15,0	13,0 ± 1,0	15,0 ± 1,0
2	51°55’24”N 19°24’38”E	Ciosny	162,0 ± 7,0	4,0 ± 1,0	6,0 ± 1,0
Średnia dla woj. małopolskiego*			504,0	35,7	34,5
3	50°05’27”N 19°53’26”E	Kraków	340,0 ± 20,0	22,0 ± 3,0	30,0 ± 3,0

* dane z *Radiologicznego Atlasu Polski* 2005

** w Atlasie nie jest podawana wartość dla Th-228, ale dla Ac-228, radionuklidu pochodnego Th-232

Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w glebie wyznaczono w Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN w Krakowie metodą trójoknową spektrometrii promieniowania gamma (Kozak i in. 2004). Próbki gleby pobrano z głębokości od 50 cm do 1 m. Wyniki promieniotwórczości gleby na badanych stacjach prezentuje tabela 3.1. Generalnie zawartość Ra-226 na badanych stacjach nie przekraczała średniej dla Polski, która wynosi 25 Bq/kg. Najniższą zawartością prekursora radonu w glebie cechowała się stacja w Ciosnach, 4 Bq/kg, podczas gdy na stacji w Łodzi zawartość radu w glebie była ok. 3 razy wyższa. Ogólnie stacja w Ciosnach charakteryzuje się

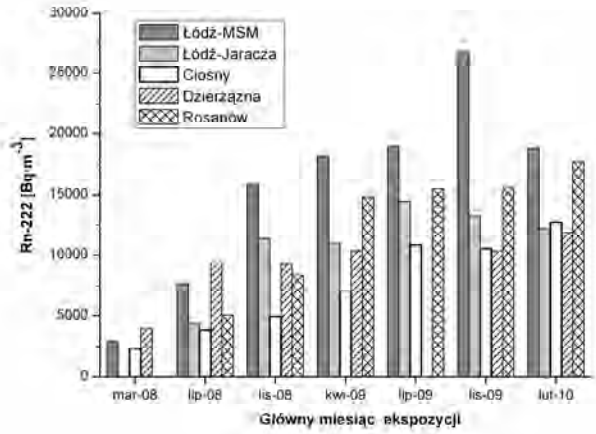
małą radioaktywnością gleby, opisywaną udziałem wyżej wymienionych izotopów promieniotwórczych. Największym udziałem radu, potasu K-40 i toru w podłożu wyróżniało się stanowisko pomiarowe w Krakowie (tab. 3.1).

Chwilowy pomiar stężenia Rn-222 w glebie na głębokości 1 m wykazał maksymalne stężenie tego radionuklidu o wartościach 16 000 $Bq \cdot m^{-3}$ w Łodzi, 2 000 $Bq \cdot m^{-3}$ w Ciosnach i 58 000 $Bq \cdot m^{-3}$ w Krakowie. Średnie stężenie Rn-222 w glebie dla Polski wynosi 40 000–80 000 $Bq \cdot m^{-3}$ (średnia z wyłączeniem Dolnego Śląska).

Stężenie radonu w glebie podlega zmianom wynikającym ze zmian współczynnika emanacji Rn-222, na który mają wpływ wilgotność i temperatura gleby, a także cechy petrofizyczne danej skały, tj. uziarnienie, porowatość, zawartość radu i jego ułożenie w strukturach mineralnych (Nazaroff i Nero 1988). Emanacja to zjawisko wydostawania się atomów radonu (powstałych z rozpadu radu) z ziaren mineralnych do przestrzeni międzyziarnowych, a współczynnik emanacji radonu definiuje się jako stosunek liczby jąder radonu uwolnionych z ziaren mineralnych do całkowitej liczby jąder radonu powstałych w ziarnie. W przyrodzie współczynnik emanacji rzadko przekracza 20% (Nazaroff i Nero 1988).

Różnice między średnimi sezonowymi wartościami stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym mogą osiągać nawet jeden rząd wielkości (Mazur 2008). Na stacji w Łodzi i Ciosnach oraz na trzech dodatkowych stanowiskach w okolicach stacji w latach 2008–2010, w siedmiu 3–miesięcznych sezonach, wykonano pomiary średniego stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym. Tabela 3.2 i rys. 3.14 przedstawiają wyniki sezonowych pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym na 5 stanowiskach - 2 stanowiska w Łodzi (stacja MSM i stanowisko nr 2 oddalone od stacji o 1 km) i 3 stanowiska na terenie gminy Zgierz (stacja Ciosny i stanowiska nr 4 i nr 5 oddalone od tej stacji odpowiednio o ok. 1,2 i 1,5 km), rys. 3.7. W tabeli 3.2 przedstawiono także średnie i maksymalne wartości stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza w badanych sezonach. Generalnie wyższe średnie wartości stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym zarejestrowano na wszystkich stanowiskach w 2009 r. w porównaniu z 2008 r. Nazwy sezonów badawczych przyjęto od miesiąca, w którym najdłużej trwała ekspozycja detektora CR-39. Najwyższą wartością stężenia Rn-222 w glebie cechowała się stacja w Łodzi, 26 770 $Bq \cdot m^{-3}$ w sezonie „listopad 2009”, a najniższą stacja Ciosny w sezonie „marzec 2008”, 2 330 $Bq \cdot m^{-3}$ (tab. 3.2). Niskie wartości notowane wiosną w 2008 r., znacznie odbiegające od wartośći notowanych w następnym roku, mogły wynikać z wysokiego poziomu wód gruntowych po roztopach. Lipiec 2009 w stosunku do poprzedniego roku charakteryzował się blisko dwukrotnym wzrostem stężenia Rn-222 na 4 spośród 5 badanych stanowisk. Podobnie wysokim wzrostem ba-

danego parametru cechował się listopad 2009 w stosunku do listopada 2008. Zimowy sezon 2010 zaznaczył się wysokimi stężeniami Rn-222 w glebie, podobnymi do wartości jesiennych (tab. 3.2). Największą zmiennością międzysezonową stężenia Rn-222 w glebie cechują się stanowiska pomiarowe w Łodzi, a najmniejszą stanowiska w Dzierżąznej i Rosanowie. W 2009 r. w ciągu 3 sezonów badawczych poziom stężenia Rn-222 w glebie w Dzierżąznej i Rosanowie nie wykazuje istotnych zmian sezonowych. Zmienność międzysezonową stężenia Rn-222 na 5 wymienianych stanowiskach pomiarowych przedstawia rysunek 3.14.



Rys. 3.14. Średnie sezonowe stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym na głębokości 1 m zmierzone metodą detektorów śladowych CR-39 na 5 wybranych stanowiskach pomiarowych w latach 2008–2010

Fig. 3.14. Average seasonal concentration of Rn-222 in soil at a depth of 1 m measured by trace detectors CR-39 for 5 selected measuring stations in 2008–2010

W Krakowie na stanowisku pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu w latach 2008–2010 nie monitorowano stężenia Rn-222 w glebie. Dane o zawartości tego radionuklidu w powietrzu glebowym na tym stanowisku uzyskane metodą detektorów CR-39 pochodzą z 7 serii pomiarowych sezonów badawczych w latach 2003–2004 (Kozak i in. 2004). Średnie stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym na głębokości 1 m zmieniało się w Krakowie od 30 600 $Bq \cdot m^{-3}$ w okresie 27.02.–15.04.2004 r. do 41 900 $Bq \cdot m^{-3}$ w okresie 17.12.2003–26.01.2004 r.

Tabela 3.2

Średnie sezonowe stężenie radonu (Rn-222, Bqm^{-3}) w powietrzu glebowym i w atmosferze 2 m nad gruntem w Łodzi i na terenie gminy Zgierz w latach 2008–2010

Table 3.2

Average seasonal concentration of radon (Rn-222, Bqm^{-3}) in the soil air and in the atmosphere of 2 m above the ground in Łódź and in the area of Zgierz community in 2008–2010

Lp	**Współrzędne geograficzne**	**Punkt pomiarowy**	**Gleba; atmosfera***						
			Okres ekspozycji						
			1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
			II dekada lutego –I dekada kwietnia **Sezon "marzec" 2008**	**Lipiec** **Sezon „lipiec" 2008**	**Listopad –I dekada grudnia** **Sezon „listopad" 2008**	**II dekada kwietnia –II dekada maja** **Sezon „kwiecień" 2009**	**II dekada czerwca –III dekada lipca** **Sezon "lipiec" 2009**	**III dekada października –I dekada grudnia** **Sezon „listopad" 2009**	**II dekada stycznia –III dekada lutego** **Sezon „luty" 2010**
		Średnie stężenie w Polsce**	*Powietrze glebowe: 40 000 – 80 000 Bqm^{-3} (bez Dolnego Śląska)*						
1	51°46'10"N 19°27'55"E	Łódź–Śródmieście, Miejska Stacja Meteorologiczna	2930 ± 19 3,7* (10)	7 660 ± 290 4,2* (12)	15 870 ± 330 5.4* (20)	18 210 ± 395 3.9* (12)	18 960 ± 450 4.1* (12)	26 770 ± 450 6,2*(16)	18 841 ± 420 5.0* (20)
2	51°46'29"N 19°28'37"E	Łodź–Śródmieście, ul. Jaracza 82	-	4 360 ± 210	11 350 ± 280	11 040 ± 300	14 455 ± 360	13 260 ± 300	12 200 ± 330
3	51°55'24"N 19°24'38"E	Ciosny 7, stacja hydro-meteorologiczna	2330 ± 18 4,3* (17)	3 870 ± 200 6,4* (35)	4 940 ± 180 5,8* (23)	7 000 ± 230 6.4* (28)	10 835 ± 300 7.5* (25)	10 520 ± 270 6.8* (24)	12 760 ± 320 5.3* (18)
4	51°66'30"N 19°25'27"E	Dzierżązna 8b	3980 ± 23	9 380 ± 320	9 320 ± 250	10 340 ± 280	-	10 300 ± 270	11 880 ± 310
5	51°54'36"N 19° 22'45"E	Rosanów, ul. Działkowa 13	-	5 050 ± 220	8 350 ± 250	14 810 ± 370	15 490 ± 390	15 555 ± 340	17 770 ± 400

± błąd pomiaru; * średnie stężenie w atmosferze; ( ) wartości w nawiasach oznaczają najwyższe stężenie radonu 2 m nad gruntem zarejestrowane w analizowanym okresie; ** dane z *Radiologicznego Atlasu Polski* 2005

Stężenie radonu w powietrzu glebowym jest tylko jednym z wielu parametrów opisujących środowisko emisji tego gazu do atmosfery i ma pośredni związek z zawartością tego radionuklidu w powietrzu atmosferycznym. O wiele bardziej istotnym dla wartości stężenia Rn-222 w atmosferze jest zjawisko ekshalacji, czyli wydostawania się tego gazu z podłoża do przygruntowej warstwy powietrza. Szybkość ekshalacji jest definiowana jako aktywność radonu uwalnianego z jednostkowej powierzchni w jednostce czasu i wyrażana w $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Pomiar ekshalacji radonu nie był wykonywany w ramach prezentowanych badań nad radonem, ale w celu opisu cech środowiska emisji tego gazu do atmosfery wykorzystano w niniejszej pracy pomiary ekshalacji wykonane przez J. Mazur (2008) w latach 2003–2006 na stanowisku pomiarów stężenia Rn-222 w IFJ PAN w Krakowie.

Generalną prawidłowością jest wzrost szybkości ekshalacji z podłoża wraz ze wzrostem stężenia radonu w powietrzu glebowym, jednak jak wynika z badań J. Mazur warunki meteorologiczne pełnią znaczącą rolę nad tempem wydostawania się tego gazu do atmosfery. Intensywne opady i związana z nimi duża wilgotność gleby, pokrywa śnieżna to istotne czynniki blokujące transport radonu w glebie ku powierzchni gruntu. Szybkość ekshalacji uwarunkowana jest także parametrami przypowierzchniowej warstwy gleby, m.in. jej porowatością, składem mineralnym, co determinuje przepuszczalność gleby. Maksymalna wartość ekshalacji na stacji IFJ PAN w Krakowie w poszczególnych latach wynosiła 386 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2004 r.), 128 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2005 r.) i 120 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2006 r.). W przebiegu rocznym zima cechuje się najmniejszą dynamiką zmienności ekshalacji i najniższymi wartościami, tj. ekshalacja do 20 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ stanowi 90% rejestrowanych wartości w latach 2003–2006. Największym zakresem wahań w roku cechuje się wiosna i jesień, a wyniki ekshalacji uzyskane w kolejnych latach różnią się. Wiosna w 2004 r. charakteryzowała się największym zakresem wahań: 90% wartości mieści się w przedziale do 150 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. W pozostałych latach 90% rejestrowanych wartości ekshalacji wiosną nie przekraczało 50 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2005 r.) i 20 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2006 r.). Bardzo podobnym zróżnicowaniem wartości cechowała się ekshalacja jesienią – 90% obserwacji nie przekraczało 100 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2004 r.), 50 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2003 r.) i 20 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2005 r.). Latem 90% obserwacji mieściło się w przedziale do 50 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2005 r., 2006 r.) i 100 $mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (2004 r.).

Według badań J. Mazur (2008) dobowa zmienność szybkości ekshalacji radonu z podłoża jest niewielka, generalnie z maksimum w czasie występowania maksimum dobowego temperatury powietrza, tj. w godz. 14.00–15.00. Autorka argumentuje przyczyny zmienności tempa ekshalacji w ciągu roku

m.in. zmianami temperatury gleby oraz zmianami wilgotności gruntu (niska temperatura gruntu i opady atmosferyczne blokują ekshalację Rn-222).

Przedstawione wybrane wyniki badań nad ekshalacją radonu w Krakowie przeprowadzone przez J. Mazur w latach 2003–2006 są unikatowe w Polsce i stanowią niezwykle cenne źródło wiedzy dla podjętych w dalszej części niniejszej pracy prób interpretacji uzyskanych wyników zmienności stężenia radonu w przygruntowej warstwie powietrza w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010.

3.4. Baza danych i metody badawcze wykorzystane w opracowaniu

Zasadniczą część bazy danych doświadczalnych wykorzystanej w niniejszym opracowaniu stanowią wyniki synchronicznych pomiarów stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu na wysokości 2 m n.p.g. z godzinnym krokiem czasowym na stacjach w Łodzi i w Ciosnach w latach 2008–2010 oraz w Krakowie w okresie od 1 stycznia 2008 r. do 30 marca 2010 r.

Bazę danych oprócz wyników ciągłego monitoringu stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza uzupełniają wyniki dodatkowych pomiarów takich parametrów jak:

- promieniotwórczość podłoża na stacji w centrum Łodzi, Ciosnach i Krakowie określona poprzez laboratoryjne oznaczenie stężenia radu Ra-226, potasu K-40 i toru Th-228 w próbkach gleby,
- stężenie Rn-222 w budynku dwukondygnacyjnym w Łodzi w okresie 06.09.–09.10.2007 r. (parter) i 11–28.10.2007 r. (piętro) oraz 13–19.09. 2007 r. (przed budynkiem),
- średnie sezonowe stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym na głębokości 1 m zmierzone za pomocą detektorów śladowych CR-39 (metoda pasywna) w okresie od marca 2008 do lutego 2010 r. na 5 stanowiskach w Łodzi i terenie zamiejskim,
- chwilowe stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym zmierzone metodą aktywną spektrometrii promieniowania alfa z wykorzystaniem komory jonizacyjnej AlphaGUARD® PQ2000PRO.

W niniejszej pracy oprócz wyników pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu nad gruntem drugą, zasadniczą część bazy danych stanowią wartości elementów meteorologicznych powietrza i gleby rejestrowane synchronicznie do stężenia Rn-222. Z bazy danych meteorologicznych w opracowaniu wykorzystano m.in.:

- wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m i 0,2 m nad gruntem,
- ciśnienie atmosferyczne,
- prędkość wiatru,
- strumień ciepła glebowego (pomiar tylko w środkowej Polsce),
- wilgotność gruntu (pomiar tylko w środkowej Polsce).

Stację Łódź cechuje ciągłość danych w latach 2008–2010, natomiast stacja zamiejska Ciosny ma niepełną serię danych w 2009 r. – brak pomiarów z uwagi na przerwy w dostawie prądu wystąpił w czerwcu i lipcu. Zasadnicza część analiz prezentowanych w opracowaniu była dokonana w oparciu o średnie godzinne wartości stężenia Rn-222 i odpowiadające im czasowo wartości elementów meteorologicznych. Przedstawiono cechy zmienności rocznej stężenia Rn-222, ze szczególnym uwzględnieniem rytmu dobowego w poszczególnych miesiącach w środkowej Polsce i Krakowie. Dokonano analizy przebiegu czasowego stężenia Rn-222 na tle elementów meteorologicznych (rozdz. 5). Stężenie Rn-222 opisano w funkcji temperatury powietrza, gradientu temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m, prędkości wiatru i strumienia ciepła glebowego analizując wartości współczynników korelacji rang Spearmana dla poszczególnych miesięcy.

Zależność funkcyjną stężenia Rn-222 i temperatury powietrza na wysokości 2 m oraz stężenia Rn-222 i strumienia ciepła glebowego *QG* wykorzystano do stworzenia dwóch modeli statystycznych, które mogą być wykorzystane do prognozowania koncentracji tego radionuklidu w przygruntowej warstwie powietrza (podrozdział 5.4). W modelu I stężenia Rn-222 estymowano funkcją eksponencjalną, a w modelu II zastosowano funkcję eksponencjalną z dodatkową zmienną, tj. pochodną po czasie. Wprowadzenie pochodnej w modelu II wynikało z faktu wystąpienia zjawiska histerezy w szeregach danych pomiarowych – przesunięcia czasowego wartości ekstremalnych stężenia Rn-222 w stosunku do wartości temperatury powietrza i *QG*. Zastosowane formuły modeli statystycznych stężenia Rn-222 to:

Model I (t_{2m}): $Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot t_{2m}) + a_3$,

Model I (QG): $Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot Q_G) + a_3$,

Model II (t_{2m}): $Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \dfrac{\partial t_{2m}}{\partial t}$,

Model II (QG): $Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \dfrac{\partial Q_G}{\partial t}$,

gdzie: *Rn* - wartości stężenia radonu [Bq·m^{-3}], a_1, a_2 *i* a_3 - współczynniki modeli, Q_G - strumień ciepła w gruncie [W·m^{-2}], t_{2m} - temperatura powietrza na wysokości 2 m nad gruntem [°C], ∂t - pochodna po czasie zmiennych Q_G, t_{2m}.

Dopasowanie modeli do wartości empirycznych sprawdzono stosując następujące statystyki (Willmott 1981, 1982):

1) błąd systematyczny $MBE = N^{-1}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - O_i\right) = \frac{\sum P_i}{N_i} - \frac{\sum O_i}{N_i} = \overline{P_i} - \overline{O_i}$,

2) średni błąd kwadratowy pomiaru $RMSE = \left[N^{-1}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - O_i\right)^2\right]^{0.5}$,

3) średni błąd bezwzględny $MAE = N^{-1}\sum_{i-1}^{N}\left|P_i - O_i\right|$,

4) indeks zgodności Willmotta $d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - O_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\left|P_i^{'}\right| + \left|O_i^{'}\right|\right)^2}\right], 0 \le d \le 1$,

gdzie: *N* - liczna przypadków, *O* - wartości obserwowane, a *P* - wartości modelowane. $P' = P_i - \overline{O}$, $O' = O_i - \overline{O}$, gdzie $\overline{O}$ to wartość średnia. Wyrażenie w mianowniku określane jest jako błąd potencjalny (PE), a wyrażenie w liczniku to średni błąd kwadratowy pomiarów (MSE) (Willmott 1982). Indeks dopasowania Willmotta *d* jest dokładniejszą miarą dopasowania modelu do danych empirycznych od miar powszechnie stosowanych, tj. współczynnika korelacji *r* czy współczynnika determinacji r^2, które sprawdzają się dla modeli liniowych.

Parametry modeli dobrano metodą najmniejszych kwadratów, a ich wartości oraz wartości statystyk dopasowania zestawiono w tabelach.

W podrozdziale 5.5 zastosowano metodę analizy wieloparametrycznej w oparciu o estymację funkcją eksponencjalną. Wykorzystując procedurę analizy krokowej regresji poszukiwano kompleksu współoddziałujących czynników meteorologicznych, który najbardziej determinuje stężenie Rn-222 w powietrzu.

W podrozdziale 5.6 porównano wartości stężenia Rn-222 rejestrowane na stacji w centrum Łodzi i stacji zamiejskiej. Różnice stężenia Rn-222 między miastem a obszarem zamiejskim scharakteryzowano na tle różnic lokalnych warunków meteorologicznych ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska miejskiej wyspy ciepła. Wyznaczono sytuacje pogodowe sprzyjające największym

ujemnym różnicom stężenia Rn-222 między centrum Łodzi a stacją w Ciosnach.

W niniejszej pracy dokonano także oceny oddziaływania makroskalowego czynnika transportu atmosferycznego na wartości stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza (rozdz. 6). Do tego celu wykorzystano m.in.:

- mapy synoptyczne z obszaru Europy (UKMO, Bracknell, *http://www.wetterzentrale.de*),
- wskaźniki cyrkulacji atmosferycznej w postaci kierunku wiatru geostroficznego oraz wirowości wiatru geostroficznego związanej ze zmianami prędkości wiatru w określonym kierunku (w języku angielskim określanej jako „shear vorticity”),
- model trajektorii wstecznych mas powietrza HYSPLIT 4.1.

Wymienione wskaźniki cyrkulacji wybrane do oceny warunków cyrkulacyjnych środkowej Polski i Krakowa były wykorzystywane m.in. do automatyzacji wyznaczania typów cyrkulacji atmosferycznej wydzielonych przez Lamba dla Wysp Brytyjskich (Jones i in. 1992) oraz przez Osuchowską-Klein dla obszaru Polski (Piotrowski 2009). Według Kożuchowskiego (2004) wektor wiatru geostroficznego „spełnia rolę wskaźnika cyrkulacji” i ”reprezentuje dominującą składową rzeczywistego ruchu powietrza i może być wartościową charakterystyką cyrkulacji atmosferycznej – kierunku i intensywności adwekcji”. Kożuchowski (2004) uważa, że „składowa geostroficzna lepiej wyraża rzeczywisty kierunek adwekcji niż „zniekształcony” wskutek oddziaływań podłoża atmosfery wektor obserwowanego wiatru przyziemnego”.

W niniejszym opracowaniu kierunek wiatru geostroficznego wykorzystano do wyznaczenia kierunku napływu mas powietrza nad stacje pomiaru radonu. Do określenia charakteru cyrkulacji w okresie dobowym zastosowano drugi z wyżej wymienionych wskaźników – wirowość wiatru geostroficznego („shear vorticity”). Wskaźniki cyrkulacji atmosferycznej w okresie 2008–2010 obliczono na podstawie średnich dobowych wartości ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza z 32 punktów węzłowych dwóch regularnych siatek o równoleżnikach środkowych 50°00’N i 52°30’N oraz południku środkowym 20°00’E (za Piotrowskim 2009). Dane gridowe ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza pochodzą z bazy danych z reanaliz NCEP/NCAR (Narodowego Centrum Prognoz Środowiskowych Stanów Zjednoczonych/Narodowego Centrum Badań Atmosfery Stanów Zjednoczonych) pochodzących z Boulder, Colorado, USA (*http://www.esrl.noaa.gov*). Szczegółowy opis danych z tej bazy i ich stopnia przetransformowania za pomocą modeli można znaleźć w opracowaniu Kalnay i innych współautorów (1996). Wskaźniki cyrkulacji atmosferycznej

obliczono przy użyciu następujących równań, według metody Jenkinsona i Collisona (1977):

- składowa strefowa wiatru geostroficznego

$$W = 0{,}25\cdot(p23 + p24 + p25 + p26) - 0{,}25\cdot(p7 + p8 + p9 + p10)$$

- składowa południkowa wiatru geostroficznego

$$S = \underline{1{,}64}\cdot[0{,}125\cdot(p10 + (2\cdot p18) + p26 + p9 + (2\cdot p17) + p25) -$$

$$- 0{,}125\cdot(p7 + (2\cdot p15) + p23 + p8 + (2\cdot p16) + p24)$$

- prędkość wypadkowa wiatru geostroficznego

$$Vgeo = (S^2 + W^2)^{1/2}$$

- składowa strefowa wirowości wiatru geostroficznego

$$VW = \underline{1{,}08}\cdot[0{,}25\cdot(p29 + p30 + p31 + p32) - 0{,}25\cdot(p15 + p16 + p17 + p18)] -$$

$$- \underline{0{,}94}\cdot[0{,}25\cdot(p15 + p16 + p17 + p18) - 0{,}25\cdot(p1 + p2 + p3 + p4)]$$

- składowa południkowa wirowości wiatru geostroficznego

$$VS = \underline{1{,}35}\cdot[0{,}125\cdot(p12 + (2\cdot p20) + p28 + p11 + (2\cdot p19) + p27) -$$

$$- 0{,}125\cdot(p10 + (2\cdot p18) + p26 + p9 + (2\cdot p17) + p25)] -$$

$$- \underline{1{,}35}\cdot[0{,}125\cdot(p8 + (2\cdot p16) + p24 + p7 + (2\cdot p15) + p23) -$$

$$- 0{,}125\cdot(p6 + (2\cdot p14) + p22 + p5 + (2\cdot p13) + p21)]$$

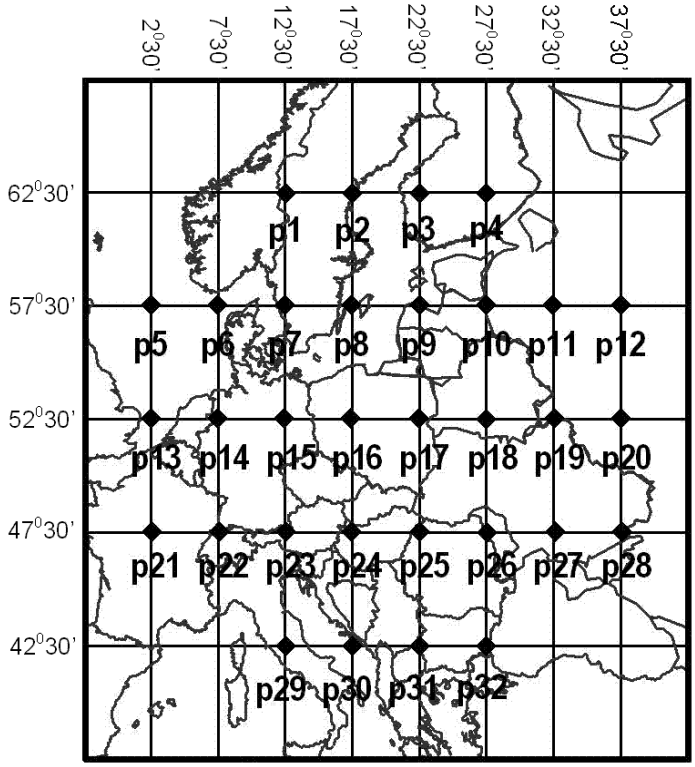
- wypadkowa wirowości wiatru geostroficznego

$$V = VW + VS$$

Podkreślone liczby w powyższych formułach to współczynniki korygujące relatywne różnice odległości między punktami gridowymi w kierunku południkowym i strefowym. Oznaczenia od p1 do p32 odnoszą się do wartości ciśnienia na poziomie morza w kolejnych punktach węzłowych siatki (rys. 3.15). Wypadkowa wirowość wiatru geostroficznego pozwala określić charakter cyrkulacji. W przypadku ujemnych wartości wypadkowej wirowości cyrkulacja ma charakter antycyklonalny, a przy dodatnich wartościach - cyklonalny. Wykorzystując składowe, strefową i południkową wiatru geostroficznego, można wyznaczyć kierunek wiatru geostroficznego:

$$dir = \arctan(W/S)\ (+180°,\ \text{jeśli } W > 0 \text{ lub } S > 0)$$

Prezentowane w równaniach współczynniki korygujące i punkty węzłowe na rysunku 3.15 odnoszą się do siatki punktów o południku środkowym 20°00'E i równoleżniku środkowym 52°30'N. Dla równoleżnika środkowego 50°00'N wartości współczynników korygujących dla S, VS i VW wynoszą odpowiednio: 1,56, 1,21 i 1,21 oraz 1,08 i 0,94. Wykorzystanie dwóch siatek o różnych równoleżnikach środkowych wiąże się z różnicą w położeniu stacji Ciosny i stacji Kraków. Zastosowane skróty ośmiu wydzielonych sektorów wiatru geostroficznego nawiązują do oznaczeń powszechnie stosowanych do określania kierunków wiatru. Dodatkowe litery po wymienionych skrótach określają charakter cyrkulacji: a - cyrkulacja antycyklonalna, c - cyrkulacja cyklonalna.



Rys. 3.15. Rozmieszczenie punktów gridowych i odpowiadających im wartości ciśnienia na poziomie morza użytych do obliczenia wskaźników cyrkulacji atmosferycznej według Piotrowskiego (Piotrowski 2009)

Fig. 3.15. Location of grid points and corresponding air pressure values at sea level used to calculate the indicators of the atmospheric circulation by Piotrowski (Piotrowski 2009)

W pracy oceniono związek cyrkulacji atmosferycznej ze średnimi i ekstremalnymi wartościami stężenia Rn-222. Przedstawiono średni dobowy przebieg stężenia Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji. Wydzielono kierunki adwekcji i charakter cyrkulacji sprzyjające największym różnicom stężenia Rn-222 między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach.

W literaturze naukowej dotyczącej czynników determinujących stężenie Rn-222 w powietrzu atmosferycznym prezentowane są rozważania na temat istotnej roli adwekcji mas powietrza dla aktywności promieniotwórczej radonu rejestrowanej w dolnej troposferze w danym miejscu (np. Sakashita i in. 1994, Dueñas i in. 1996, Morizumi i in. 1996, Omori i in. 2009, Arnold i in. 2009, 2010). Hipoteza ta oparta jest na stwierdzeniu większej zawartości tego radionuklidu w kontynentalnych niż w morskich masach powietrza w związku z 1000 razy większą ekshalacją tego gazu do atmosfery z powierzchni lądowej niż z wodnej. W niniejszej pracy podjęto próbę zweryfikowania hipotezy o istotnej roli składowej transportu atmosferycznego dla wartości stężenia Rn-222 rejestrowanego przy powierzchni ziemi. W tym celu zastosowano model HYSPLIT 4.1 - model transportu atmosferycznego i dyspersji związków zawartych w atmosferze, umożliwiający wyznaczanie obszaru źródłowego mas powietrza na podstawie trajektorii wstecznych, określających geograficzne położenia masy powietrza napływającej nad dany obszar (Draxler, Rolph 2010). Model HYSPLIT 4.1 jest udostępniony online przez NOAA Air Resources Laboratory (ARL), USA (*http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php*). Model wyznacza trajektorie mas powietrza na podstawie danych gridowych parametrów meteorologicznych pochodzących z bazy danych z reanaliz NCEP/NCAR (NOAA, Boulder, USA). W niniejszej pracy, dla wybranych dni okresu badawczego 2008–2010, m.in. dni z ekstremalnymi wartościami stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie, wyznaczono obszar genetyczny mas powietrza napływających nad obszar stacji. Okres 72 godzin przyjęto jako „wsteczny" przedział czasowy do analizy położenia masy powietrza przed czasem rejestracji danej wartości stężenia Rn-222. Czas przyjęty do obliczenia wstecznej trajektorii ruchu powietrza nawiązuje do okresu połowicznego rozpadu radonu, który wynosi 3,8 dnia. Trajektorie wykreślono dla wysokości poziomu gruntu. Rezultaty obliczeń trajektorii wstecznych mas powietrza z zastosowaniem modelu HYSPLIT 4.1 zaprezentowano w formie graficznej - map przedstawiających położenie trajektorii masy powietrza od obszaru źródłowego do danej stacji.

W podrozdziale 6.4 na podstawie przeglądu literatury zaprezentowano ogólne informacje na temat stężenia radonu w budynkach na świecie i w Polsce oraz sposobu migracji tego gazu do budynku. W dalszej części przedstawiono

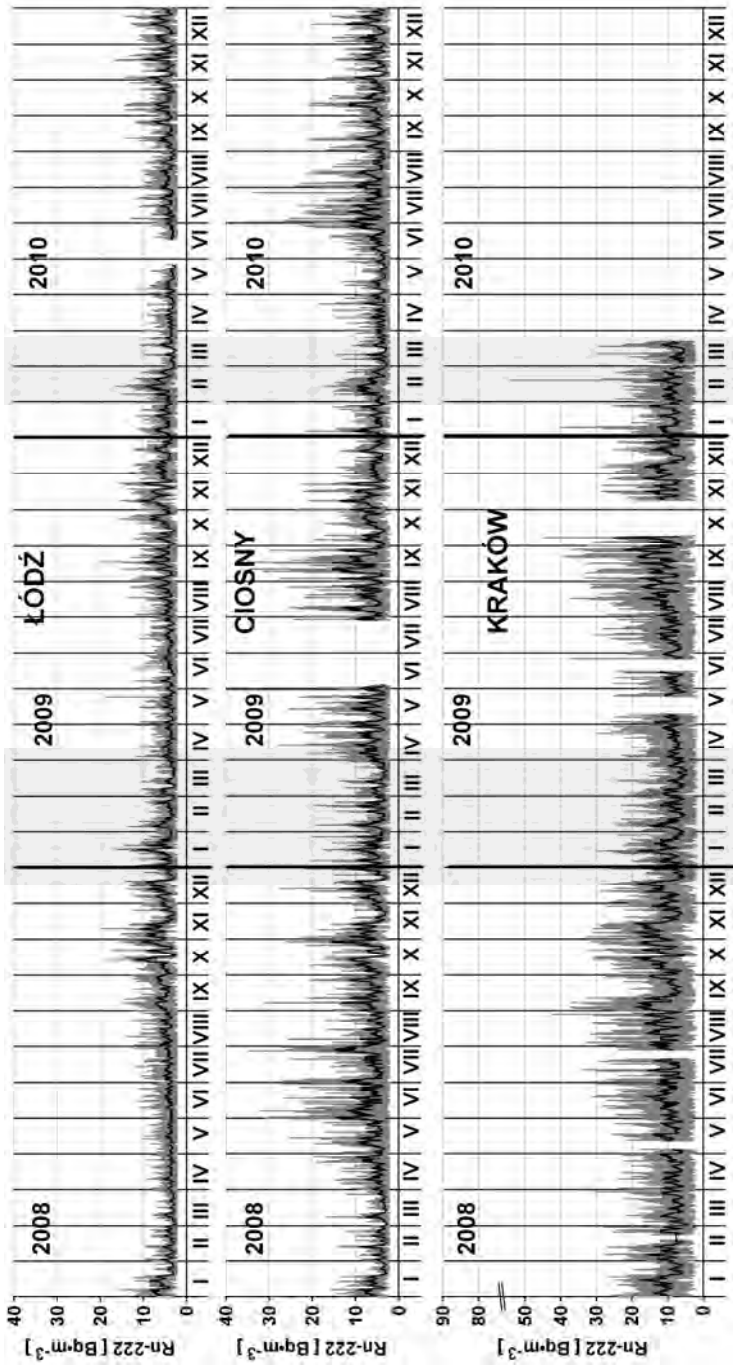
wyniki eksperymentu w Łodzi, dotyczącego analizy wpływu ogólnej sytuacji synoptycznej na obszarze Polski (typ pogody kształtowanej przez ośrodek wysokiego i niskiego ciśnienia) na poziom stężenia Rn-222 w domu dwukondygnacyjnym. Dysponowano ciągłą, ponad miesięczną serią pomiarów stężenia Rn-222 (10–minutowy krok czasowy) w domu dwukondygnacyjnym w Łodzi.

4. ROCZNA I DOBOWA ZMIENNOŚĆ STĘŻENIA RADONU W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA

4.1. Cechy rocznej zmienności stężenia Rn-222

Średnie stężenie Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010 nie przekroczyło wartości przeciętnej dla obszarów kontynentalnych kuli ziemskiej, tj. 10 $Bq \cdot m^{-3}$, i wynosiło odpowiednio 4,6 $Bq \cdot m^{-3}$, 5,8 $Bq \cdot m^{-3}$ i 10,0 $Bq \cdot m^{-3}$ (tab. 4.1).

Stężenie Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza zmieniało się na badanych stacjach od wartości niemierzalnych, tj. poniżej 2 $Bq \cdot m^{-3}$ do około 90 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 4.1–4.5). Maksymalne wartości stężenia w latach 2008–2010 w Łodzi nie przekroczyły 20 $Bq \cdot m^{-3}$ (09.11.2008, godz. 10.00), w Ciosnach 40 $Bq \cdot m^{-3}$ (31.05.2009, godz. 08.00), a w Krakowie 86 $Bq \cdot m^{-3}$ (08.10.2009, godz. 09.00). Rozkłady częstości stężenia Rn-222 na stacjach w środkowej Polsce cechuje duże podobieństwo. Największy udział wśród wyników pomiarów, tj. 98% (Łódź) i 88% (Ciosny), mają stężenia poniżej 10 $Bq \cdot m^{-3}$. W Krakowie największą frekwencją, 63%, cechują się wartości z przedziału 5–15 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 4.3). Rozkład częstości stężenia Rn-222 w powietrzu cechuje się dolnym ograniczeniem zero i dodatnią asymetrią (rys. 4.3). Podstawowe charakterystyki rozkładu godzinnych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu prezentuje tabela 4.1. W analizowanych szeregach danych górny kwartyl przypada na wartość 6 $Bq \cdot m^{-3}$ w Łodzi, 7 $Bq \cdot m^{-3}$ w Ciosnach i 13 $Bq \cdot m^{-3}$ w Krakowie, co oznacza, że powyżej tych wartości znajduje się 25% wyników pomiarów (tab. 4.1, rys. 4.2). W centralnej Polsce, podobnie jak w Krakowie rzadko rejestrowano stężenia Rn-222 o wartościach powyżej 20 $Bq \cdot m^{-3}$. W Ciosnach wartości 20–40 $Bq \cdot m^{-3}$ stanowiły tylko 1,3% przypadków, a w Krakowie stężenia o wartości 20–86 $Bq \cdot m^{-3}$ to 6% wyników pomiarów. Opisywane stężenia powyżej 20 $Bq \cdot m^{-3}$ pojawiają się na stacjach zamiejskich najczęściej w miesiącach letnich i jesiennych (rys. 4.1, 4.5).



Rys. 4.1. Przebieg stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010. Linia czarna - średnia ruchoma 24–godzinna

Fig. 4.1. Course of radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above the ground in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010. Black line - moving average 24–hour

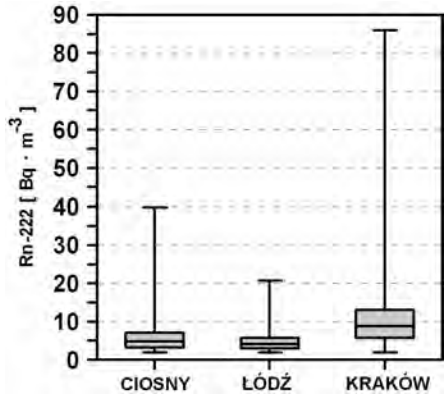
Tabela 4.1

Charakterystyki statystyczne rozkładów stężenia radonu (Rn-222) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie; x_a - średnia arytmetyczna w Bq·m^{-3}, m - mediana w Bq·m^{-3}, x_{max} - wartość maksymalna w Bq·m^{-3}, δ - odchylenie standardowe w Bq·m^{-3}, s_k - współczynnik skośności, p - wartości percentyli w Bq·m^{-3}

Table 4.1

Statistical characterization of radon (Rn-222) concentration distributions in Łódź, Ciosny and Kraków; x_a - arithmetic mean in Bq·m^{-3}, m - median in Bq·m^{-3}, x_{max} - the maximal value in Bq·m^{-3}, δ - standard deviation in Bq·m^{-3}, s_k - coefficient of skewness, p - values of percentiles in Bq·m^{-3}

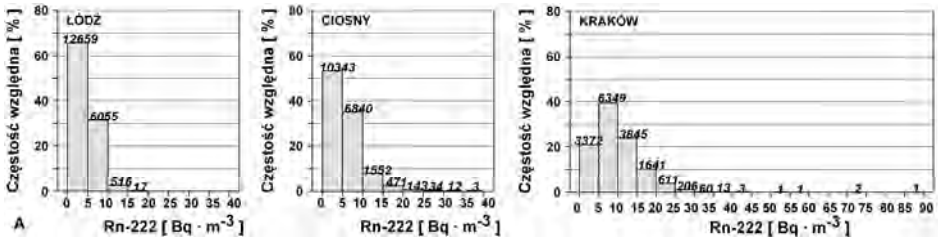
	Łódź	**Ciosny**	**Kraków**
x_a	4,6	5,8	10,0
m	4,1	4,8	8,9
x_{max}	20,0	40,0	86,0
δ	2,2	3,7	5,7
s_k	1,4	2,1	1,5
$p_{10\%}$	3,0	3,0	4,0
$p_{25\%}$	3,0	3,0	6,0
$p_{75\%}$	6,0	7,0	13,0
$p_{90\%}$	8,0	11,0	17,0



Rys. 4.2. Wykres pudełkowy dla wartości stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Ciosnach, Łodzi i Krakowie w latach 2008–2010: mediana, wartość minimalna, maksymalna, dolny i górny kwartyl

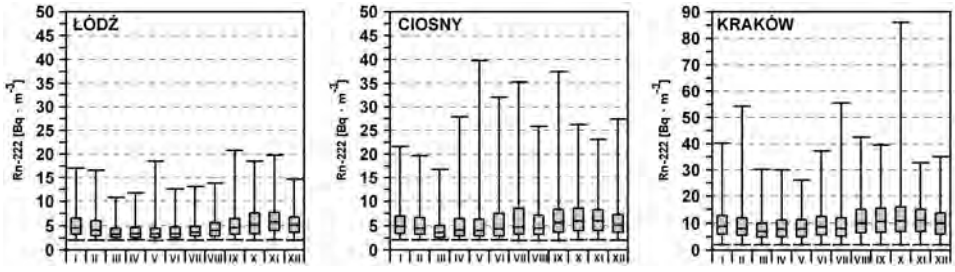
Fig. 4.2. Chart box of Rn-222 concentration values in the air 2 m above ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010: median, minimum, maximum, lower and upper quartile

W przebiegu rocznym najniższe średnie stężenie Rn-222 w latach 2008–2010 było notowane na wszystkich stacjach w marcu, podczas gdy najwyższe przeciętne stężenia wystąpiły w różnych miesiącach (rys. 4.4, tab. 4.1). W Łodzi średnie najwyższe stężenie tego radionuklidu zarejestrowano w listopadzie, w Ciosnach we wrześniu, a w Krakowie we wrześniu i październiku. Analiza przebiegu średniego miesięcznego stężenia Rn-222 w poszczególnych latach badanego okresu wskazuje, że stacje zamiejskie, tj. Ciosny i Kraków odróżniają się od centrum Łodzi cechami zmian sezonowych rejestrowanych wartości. W Łodzi występuje powolny wzrost średniej miesięcznej wartości stężenia Rn-222 od marca do listopada, odpowiednio od 3,5 $Bq \cdot m^{-3}$ do 6,2 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 4.4 i 4.5). Na stacjach zamiejskich obserwuje się wyraźny wzrost stężenia radonu w dwóch porach roku – latem i jesienią (rys. 4.1, 4.5).



Rys. 4.3. Histogram częstości stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010

Fig. 4.3. Distribution of Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010



Rys. 4.4. Przebieg roczny stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem w Ciosnach, Łodzi i Krakowie w latach 2008–2010. Wykres pudełkowy: mediana, wartość minimalna, maksymalna, dolny i górny kwartyl

Fig. 4.4. Annual course of radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010. Chart box: median, minimum, maximum, lower and upper quartile

W Ciosnach latem przeciętnie najwyższe stężenie było notowane w lipcu (6,8 Bq·m^{-3}), podczas gdy w Krakowie w sierpniu (11,6 Bq·m^{-3}). Drugie, wyższe maksimum roczne wśród średnich miesięcznych przypada na wymienionych stacjach we wrześniu (odpowiednio 7,1 Bq·m^{-3} i 12 Bq·m^{-3}), a w Krakowie tę samą wartość notuje się także w październiku (tab. 4.2, rys. 4.4).

Analiza ekstremalnych wartości stężenia Rn-222 na 3 stacjach w latach 2008–2010 wykazała występowanie w każdym miesiącu skrajnie niskich, niemierzalnych wartości, tj. poniżej 2 Bq·m^{-3}. W szeregach danych wartości poniżej progu detekcji zastąpiono cyfrą 0. Stężenia 2 Bq·m^{-3} zostały odnotowane na każdej stacji, w każdym miesiącu badanego okresu (rys. 4.1). Ekstremalnie najwyższe wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych miesiącach w Łodzi zmieniają się od 11 Bq·m^{-3} w marcu do 20 Bq·m^{-3} w listopadzie, w Ciosnach od 17 Bq·m^{-3} w marcu do 40 Bq·m^{-3} w maju, a w Krakowie od 26 Bq·m^{-3} w maju do 86 Bq·m^{-3} w październiku (tab. 4.2, rys. 4.4 i 4.5). W Łodzi poza listopadem także wrzesień na tle pozostałych miesięcy wyróżnia się pod względem rejestrowanych stężeń Rn-222, tj. 20 Bq·m^{-3}. W Ciosnach obok maja, także czerwiec i lipiec charakteryzuje się występowaniem najwyższych stężeń Rn-222 (wartości z przedziału 32–39 Bq·m^{-3}). W Krakowie wysokie stężenie Rn-222, powyżej 40 Bq·m^{-3}, notowano w lutym, lipcu, sierpniu i październiku (tab. 4.2, rys. 4.1, 4.4, 4.5).

Tabela 4.2

Średnie miesięczne i średnie roczne oraz absolutnie najwyższe (Max) stężenie radonu (Rn-222) w Bq·m^{-3} w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010

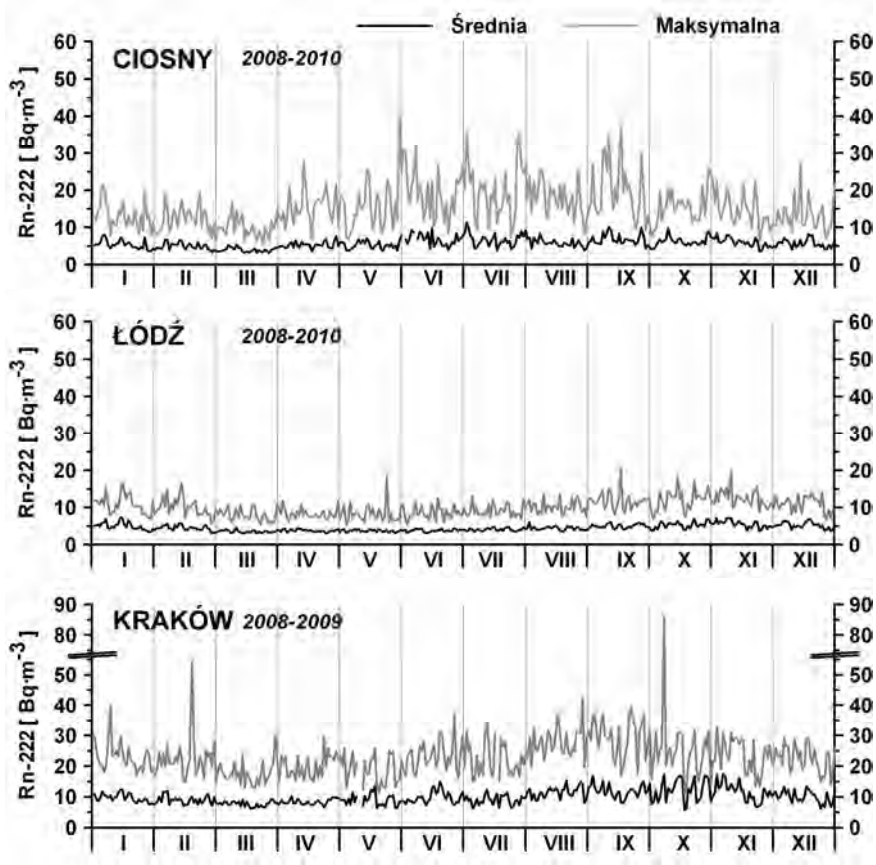
Table 4.2

Monthly and annual average, and absolute maximal (Max) radon (Rn-222) concentration in Bq·m^{-3} in the air 2 m above the ground in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010

	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**	**Rok**
Łódź													
Średnia	5,0	4,7	3,5	3,9	3,9	3,8	3,9	4,7	5,3	5,2	5,7	5,5	4,6
Max.	17,0	17,0	11,0	12,0	19,0	13,0	13,0	14,0	21,0	19,0	20,0	14,0	20,0
Ciosny													
Średnia	5,5	5,2	4,2	5,3	5,4	6,3	6,8	5,8	7,1	6,1	5,9	6,0	5,8
Max.	22,0	20,0	17,0	28,0	40,0	32,0	35,0	26,0	38,0	26,0	23,0	27,0	40,0
Kraków													
Średnia	9,7	9,1	7,5	8,3	8,9	9,4	9,3	11,6	12,0	12,0	11,4	10,5	10,0
Max.	40,0	54,0	30,0	30,0	26,0	37,0	56,0	43,0	40,0	86,0	33,0	35,0	86,0

Istnienie sezonowej zmienności stężenia Rn-222 na stacjach w centralnej Polsce i Krakowie w latach 2008–2010 pozostaje w zgodności z wynikami badań innych autorów prezentowanych w krajowej i zagranicznej literaturze dotyczą-

cej długoterminowych pomiarów stężenia tego radionuklidu oraz izotopów pochodnych od radonu, tj. Bi-210, Bi-214, Pb-210, Pb-214, Po-210. W opracowaniach Kopcewicza (1968, 1974) dla Warszawy opisywany jest wyraźny bieg roczny naturalnej aktywności promieniotwórczej radonu i jego pochodnych w przygruntowej warstwie powietrza, z minimum w miesiącach marzec–maj i maksimum w okresie październik–listopad. Kilkuletnie pomiary stężenia Rn-222 (metoda pośrednia - pomiar aktywności pochodnych radonu Po-214 i Po-218) na wysokości 20 m nad gruntem prowadzone przez AGH w Krakowie potwierdziły wyżej opisywaną zmienność roczną z minimum w marcu lub kwietniu i maksimum w październiku (Wach i in. 2009).

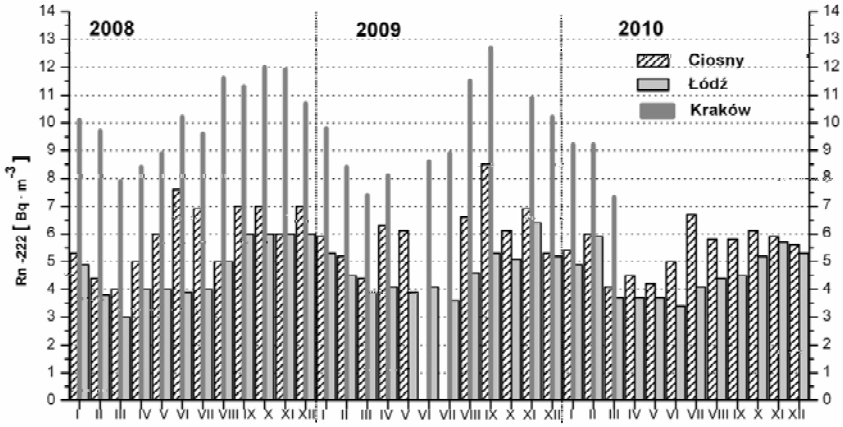


Rys. 4.5. Przebieg roczny średnich i najwyższych dobowych wartości stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem w Ciosnach, Łodzi i Krakowie w latach 2008–2010

Fig. 4.5. Annual course of average and the highest daily radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above the ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010

Wśród zagranicznych autorów Hötzl i Winkler (1994) opisują sezonową zmienność stężenia Rn-222 i jego pochodnych w powietrzu na podstawie 10–letniej serii pomiarów prowadzonych w Monachium (Niemcy). Na tej stacji minimum rocznego stężenia Rn-222 przypadało w czerwcu, a maksimum w październiku, średnio dwukrotnie przewyższając wartość minimalną. Autorzy japońscy wykazali wyraźną sezonowość stężenia Rn-222 w powietrzu silnie skorelowaną z kierunkiem wiatru. Roczne maksimum stężenia Rn-222 w Osace przypadało na sezon zimowy, w czasie monsunu wiejącego znad kontynentu Azji, a minimum w czasie lata (wiatr znad morza) (Megumi 1992). Podobny rytm zmian rocznych, uwarunkowanych cyrkulacją monsunową występuje w Hong Kongu, z minimum w lipcu i maksimum w styczniu (Chan i in. 2010). Na obszarze Europy zmienność roczna stężenia Rn-222, podobna jak w Polsce, z minimum rocznym wiosną i maksimum latem lub jesienią, była opisywana na stacjach w Rumunii (Baciu 2005, Florea i Duliu 2012). Podobny jak na opisywanych stacjach europejskich rytm roczny zmian stężenia Rn-222 i jego pochodnych występuje także w Pekinie - minimum w okresie kwiecień–maj, a maksimum w okresie październik–listopad (Zhang i in. 2009). Odwrotny rytm roczny z minimum latem i maksimum zimą wykazano w Mediolanie (Sesana i in., 2003). Podobna jak we Włoszech sezonowość stężenia pochodnych Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza cechuje stacje w Egipcie, gdzie wiosną i latem zarejestrowano najniższe wartości, a najwyższe wystąpiły w okresie listopad–styczeń (El-Hussein i in. 2001). Autorzy wiążą taki rytm roczny stężenia naturalnych radionuklidów w Egipcie z wyraźną sezonową zmianą warunków meteorologicznych. Spadek stężenia pochodnych Rn-222 przy gruncie w miesiącach wiosennych tłumaczony jest wzrostem frekwencji układów niskiego ciśnienia z silnym wiatrem o tej porze roku, natomiast letnie minimum może być wg autorów tego opracowania spowodowane silną konwekcją termiczną (wynik silnej insolacji), która przenosi radionuklidy do wyższych warstw atmosfery. Maksimum roczne stężenia pochodnych Rn-222 w Egipcie przypada na okres silnych inwersji przygruntowych temperatury powietrza (El-Hussein i in. 2001). Sezonowość stężenia Rn-222 i jego pochodnych, odmienna od rytmu obserwowanego w Polsce, występuje w Brazylii, gdzie minimum przypada na okres letni (pora deszczowa) oraz maksimum na okres zimowy (pora sucha) (Magalhães i in. 2003). Autorzy opracowania dotyczącego Brazylii wykazali silną ujemną korelację stężenia Rn-222 z opadami deszczu, podkreślając istotność czynnika klimatycznego dla zmienności koncentracji naturalnych radionuklidów w dolnej troposferze (Magalhães i in. 2003).

Wszyscy wymienieni autorzy przypisują warunkom meteorologicznym (m.in. turbulencyjności) nadrzędną rolę w kształtowaniu rocznej zmienności stężenia naturalnych radionuklidów w dolnej troposferze.

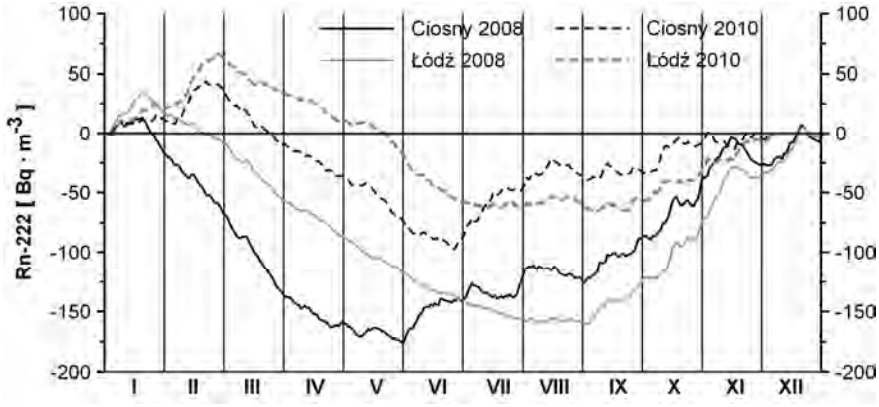


Rys. 4.6. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010

Fig. 4.6. Average monthly Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010

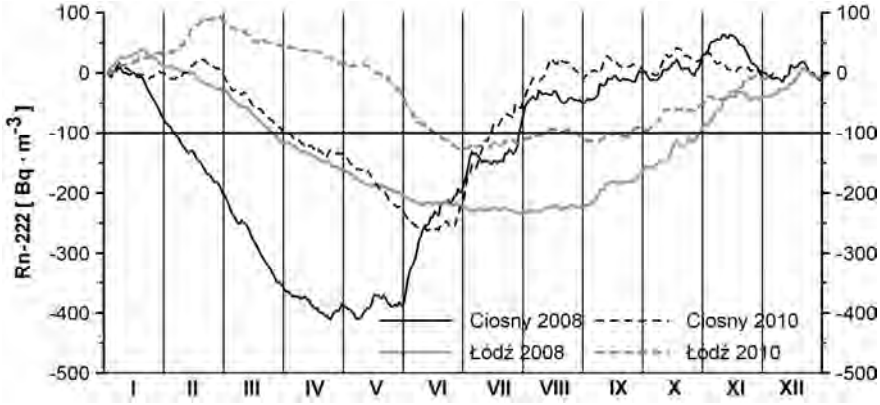
W dalszym etapie analizy dokonano charakterystyki porównawczej przebiegu rocznego stężenia Rn-222 na stacjach w środkowej Polsce na podstawie skumulowanych odchyleń średniego i maksymalnego dobowego stężenia Rn-222 od średniej rocznej. Do opracowania wykorzystano dane z roku 2008 i 2010. Rok 2009 pominięto w uwagi na nieciągłość danych. Wartości skumulowane odchyleń stężenia Rn-222 od średniej wskazują na okresy wzrostu lub spadku aktywności promieniotwórczej tego radionuklidu w powietrzu. Przebieg krzywych na rysunku 4.7 wskazuje na wyraźne różnice w rocznej zmienności średnich dobowych wartości stężenia Rn-222 między stacją w Łodzi a stacją w Ciosnach. Krzywe te ujawniają także różnice odchyleń między 2008 a 2010, tj. rok 2008 cechuje się większymi spadkami i wzrostami średniego stężenia Rn-222 w przebiegu rocznym. W rocznym przebiegu średniego dobowego stężenia Rn-222 w Ciosnach w 2008 r., wyraźna zmiana tendencji na wzrostową wystąpiła od początku czerwca, podczas gdy w Łodzi wzrostowa tendencja ujawnia się dopiero od września (rys. 4.7). Brak tendencji wzrostowej stężenia Rn-222 w centrum miasta w okresie letnim może być konsekwencją silnie rozwiniętej turbulencji termicznej przeciwdziałającej koncentracji tego gazu w przygruntowej warstwie powietrza. W 2010 r. w przeciwieństwie do 2008 r. wyraźna tendencja wzrostowa zaznacza się w lutym na obu stacjach z niewielkim opóźnieniem w Łodzi w stosunku do Ciosen. Z początkiem marca wystąpił spadek średniego dobowego stężenia Rn-222 na obu stacjach równo-

cześnie i trwał do końca czerwca w Ciosnach, podczas gdy w Łodzi tendencja spadkowa trwała do połowy lipca.



Rys. 4.7. Skumulowane odchylenia średnich dobowych wartości stężenia Rn-222 od średniej rocznej w Ciosnach i w Łodzi w 2008 r. i 2010 r.

Fig. 4.7. Cumulative deviation of average daily Rn-222 concentration from average annual Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008 and 2010



Rys. 4.8. Skumulowane odchylenia maksymalnych dobowych wartości stężenia Rn-222 od średniej rocznej w Ciosnach i w Łodzi w 2008 r. i 2010 r.

Fig. 4.8. Cumulative deviation of maximal daily Rn-222 concentration from average annual Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008 and 2010

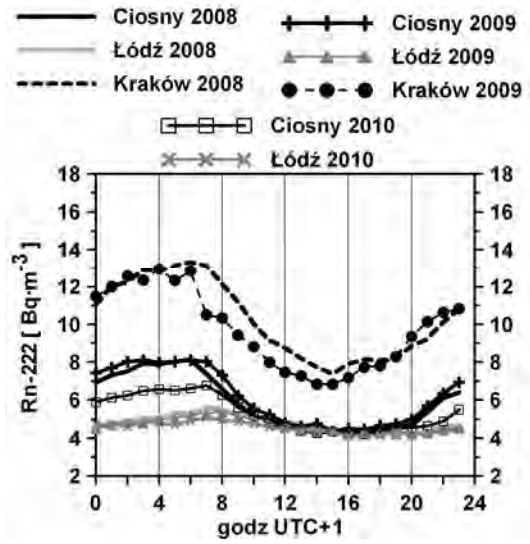
Następnie wartości odchyleń utrzymywały się w centrum miasta na podobnym poziomie aż do pierwszej dekady października i od tego czasu wyraźnie rosły do końca badanego okresu w 2010 r. W Ciosnach od końca czerwca 2010 r. ujawnia się wyraźny wzrost stężenia Rn-222, a wzrostowa tendencja na tej stacji trwa do początku listopada (rys. 4.7). Opisane wyżej tendencje znajdują potwierdzenie na rysunku 4.8, gdzie przedstawiono odchylenia maksymalnych dobowych wartości stężenia Rn-222 od średniej rocznej. Podobnie jak w przypadku średniego dobowego stężenia Rn-222 występują różnice między stacją miejską i zamiejską w zakresie i charakterze zmienności rocznej. Generalnie stacja Ciosny cechuje się większym zakresem zmian dobowych i wcześniejszym wystąpieniem zmian kierunku tendencji w przebiegu rocznym stężenia Rn-222 niż centrum Łodzi (rys. 4.8).

4.2. Średnie roczne, sezonowe i miesięczne przebiegi dobowe stężenia Rn-222

Analiza czasowego przebiegu stężenia radonu wykazała obok rytmu rocznego także dobowy cykl zmian stężenia tego gazu. Rysunek 4.9 przedstawia średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w poszczególnych latach badanego okresu. Największa aktywność promieniotwórcza radonu na 3 analizowanych stacjach przypada na godziny poranne od 03.00 do 08.00, a najmniejsza jest notowana w godzinach popołudniowych i przedwieczornych, tj. od 14.00 do 19.00.

Stacje Ciosny i Kraków cechują się podobieństwem średniego zakresu zmian dobowych stężenia Rn-222 w latach 2008–2010, o wartościach odpowiednio 4 $Bq \cdot m^{-3}$ i 5 $Bq \cdot m^{-3}$. Stację w centrum Łodzi wyróżnia słabo zaznaczony rytm zmian dobowych o amplitudzie rzędu 1–2 $Bq \cdot m^{-3}$. Wśród prezentowanych stacji, Kraków wyróżnia się najszybszym przyrostem stężenia Rn-222 po wystąpieniu wartości minimalnej w ciągu doby, która średnio przypada na godz. 14.00 (2009 r.) i 15.00 (2008 r.). W Krakowie okres wzrostu stężenia Rn-222 w ciągu doby przypada średnio od godz. 15.00 do 06.00 rano. W Ciosnach minimalne stężenie rejestrowano średnio o godz. 15.00 (2009 r.), 16.00 (2008 r.) i 17.00 (2010 r.), podczas gdy w Łodzi najniższa aktywność promieniotwórcza Rn-222 występowała z opóźnieniem w stosunku do stacji zamiejskiej, tj. o godz. 17.00 w 2008 r. i 19.00 w 2009 r. W 2010 r. w Łodzi najniższe średnie godzinne stężenie w ciągu doby występowało o godz. 16.00. W godzinach wieczornych widoczny jest przyrost aktywności promieniotwórczej radonu, zdecydowanie wyższy na stacji w Ciosnach niż w centrum miasta. Opisywana zmienność dobowa stężenia Rn-222 w środkowej Polsce znajduje

potwierdzenie m.in. w badaniach Krajny i Ośródki (2005), prowadzonych nad dynamiką dobową Po-218 na terenie Krakowa i Katowic.

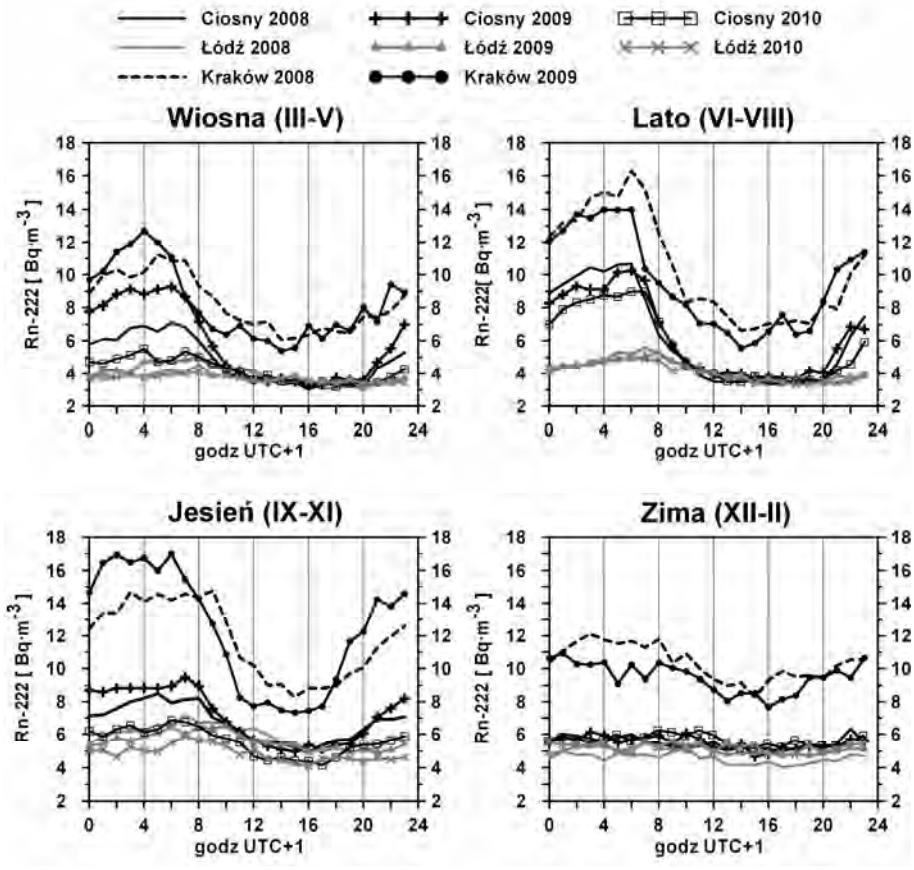


Rys. 4.9. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010

Fig. 4.9. Average course of daily Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010

Cechy przebiegu dobowego stężenia Rn-222 są dobrze udokumentowane w wielu publikacjach. Charakter dobowych zmian stężenia tego radionuklidu jest taki sam na wszystkich opisywanych stacjach położonych w różnych regionach kuli ziemskiej - Europie (np. Porstendörfer i in. 1991, Butterweck i in. 1994, Hötzl i Winkler 1994, Dueñas i in. 1996a, Sesana i in. 1998, 2003, Winkler i in. 2001, Perrino i in. 2001, Baciu 2005, Krajny i Ośródka 2005, Florea i Duliu 2012), Azji (np. Kataoka i in. 1992, 1998, Morizumi i in. 1996, Singh i in. 2005, Zhang i in. 2009, Chan i in. 2010, Ameryce Północnej (Hosler 1966), Ameryce Południowej (np. Magalhães i in. 2003), Afryce (np. El-Hussein i in. 2001), Australii (np. Martin i in. 2004). Wszyscy autorzy wymienionych publikacji są zgodni co do tego, że zjawisko zwiększania się stężenia Rn-222 w dolnej troposferze w godzinach nocnych i zmniejszanie w ciągu dnia nawiązuje do procesów zachodzących w warstwie granicznej atmosfery w cy-

klu dobowym, tj. rozwoju oraz zaniku turbulencji i procesów mieszania powietrza.



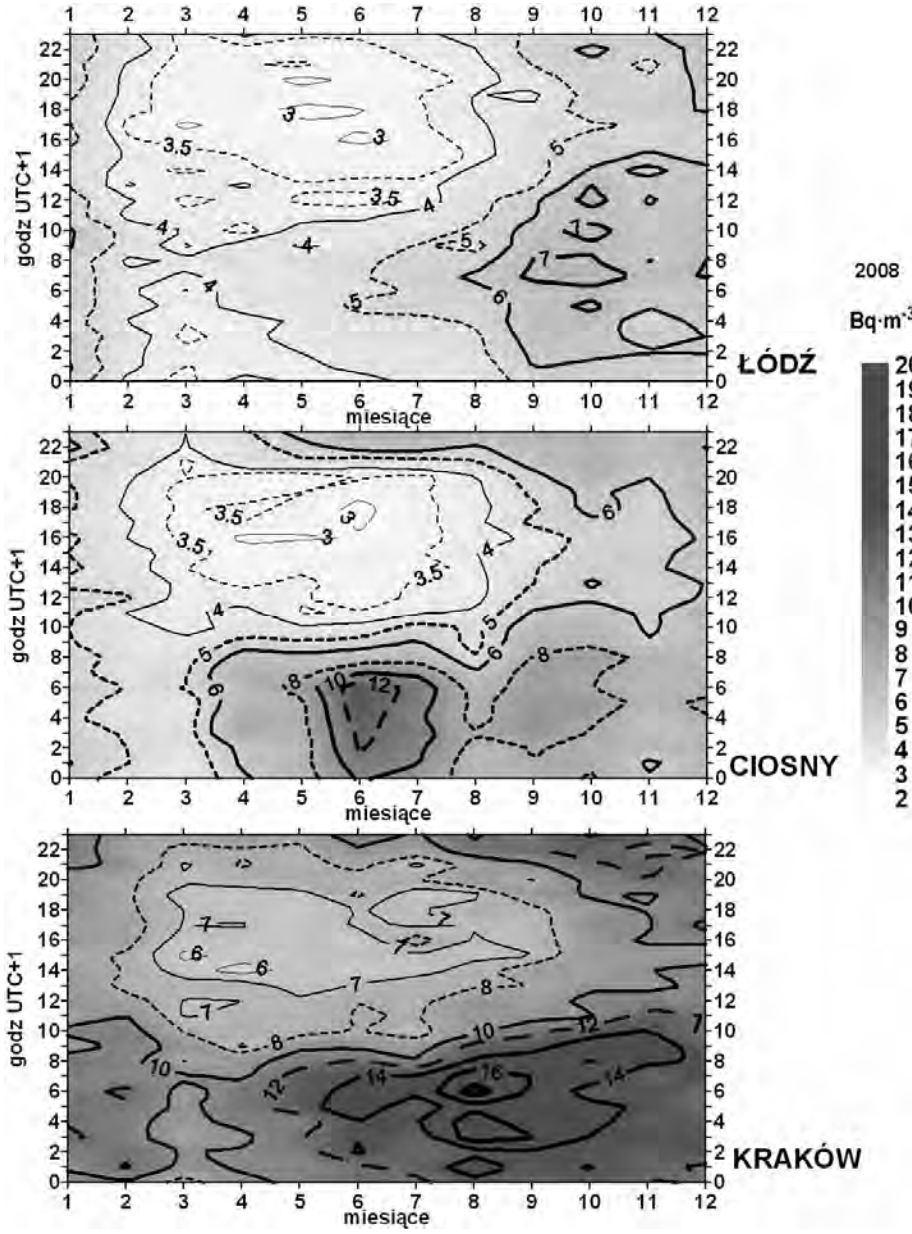
Rys. 4.10. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w poszczególnych porach roku w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010

Fig. 4.10. Average course of daily Rn-222 concentration in different seasons of the year in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010

Średnie wartości stężenia Rn-222 obliczone dla poszczególnych pór roku i miesięcy wskazują na zmienność roczną zakresu wahań dobowych (tab. 4.3, rys. 4.10–4.13). Generalną prawidłowością na wszystkich stacjach jest zanik cyklu dobowego stężenia radonu w miesiącach zimowych, kiedy to przeciętny zakres wahań w centralnej Polsce nie przekracza 1 $Bq \cdot m^{-3}$, a w Krakowie 4 $Bq \cdot m^{-3}$. W pozostałych porach roku rytm zmian dobowych ujawnia się wy-

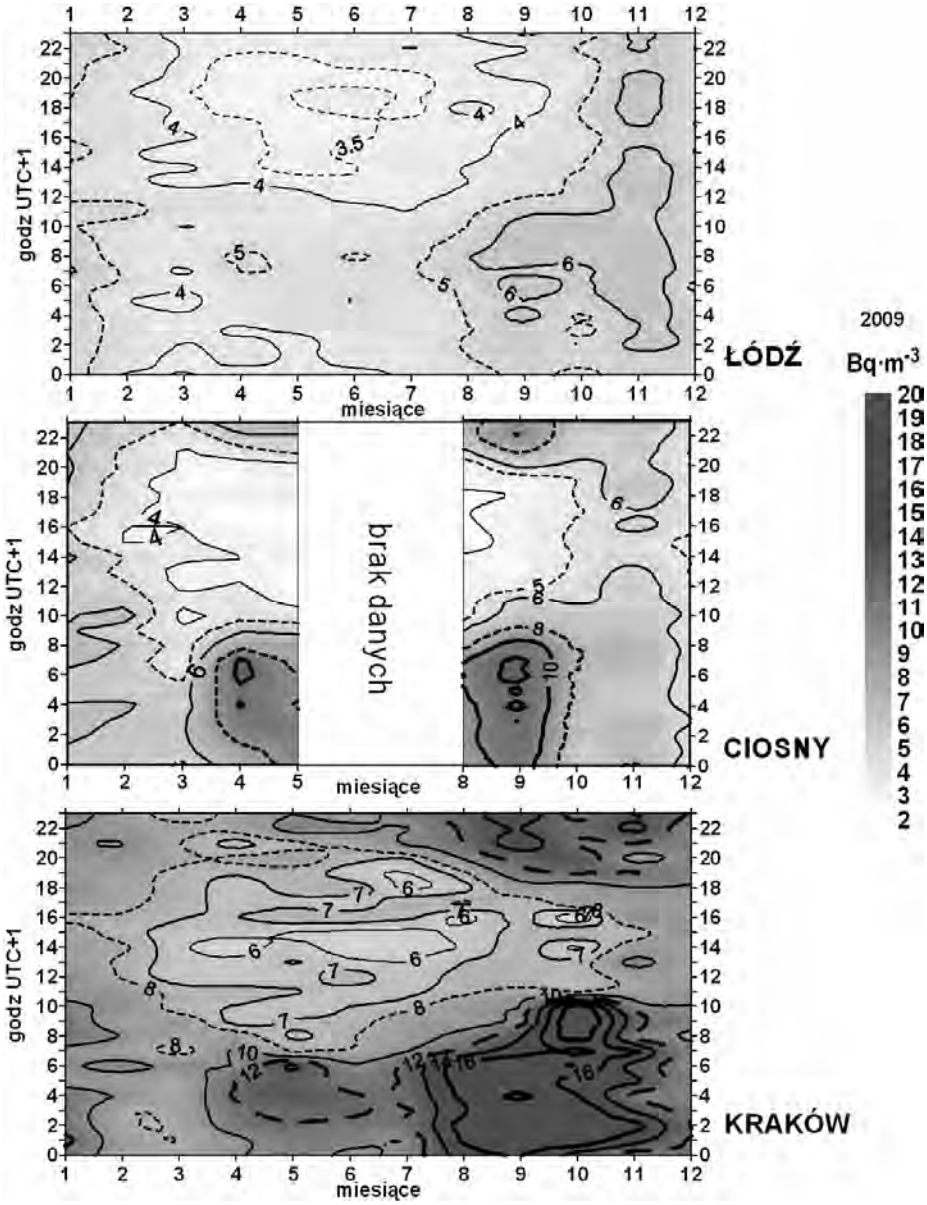
raźnie na stacjach zamiejskich, podczas gdy w Łodzi przeciętny zakres zmian dobowych stężenia nie przekracza 2 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 4.10). Wśród analizowanych stacji Kraków cechuje się największymi dobowymi wahaniami stężenia Rn-222 we wszystkich porach roku. Średnio największe amplitudy dobowe stężenia Rn-222, tj. 10 $Bq \cdot m^{-3}$ notowano na tej stacji latem 2008 r. i jesienią 2009 r. Amplitudy dobowe stężenia Rn-222 w Krakowie są najniższe zimą i wynoszą przeciętnie 4 $Bq \cdot m^{-3}$ (2008) i 3 $Bq \cdot m^{-3}$ (2009) - rys. 4.10–4.13. W Ciosnach największy średni zakres wahań dobowych wystąpił latem 2008 r. i 2009 r., 7 $Bq \cdot m^{-3}$. Podobny średni zakres wahań dobowych stężenia Rn-222 był rejestrowany na tej stacji wiosną 2009 r., 6 $Bq \cdot m^{-3}$. W pozostałych latach średnie godzinne wartości stężenia Rn-222 wiosną w Ciosnach były wyraźnie niższe, z minimum w 2010 r. (rys. 4.10). W Łodzi zmienność sezonowa średniego dobowego przebiegu stężenia Rn-222 jest najsłabiej zaznaczona - średnie amplitudy dobowe nie przekraczają 2 $Bq \cdot m^{-3}$. W Łodzi jesień wyróżnia się na tle pozostałych pór roku - jesienią rejestrowano najwyższe w ciągu doby minimalne wartości stężenia Rn-222 (rys. 4.10). Na rysunkach 4.11–4.13 zaprezentowano czasową zmienność stężenia Rn-222 w ujęciu dobowym i rocznym. Na wszystkich stacjach charakter zmienności dobowej i rocznej stężenia Rn-222 nie wykazuje istotnych różnic między kolejnymi latami badanego okresu. Średnie przebiegi dobowe stężenia radonu w poszczególnych miesiącach wskazują, że od stycznia do marca brak jest rytmu dobowego stężeń w Łodzi i Ciosnach, podczas gdy w Krakowie jest mało wyraźny. Od kwietnia zaznacza się wzrost średniej amplitudy dobowej stężenia Rn-222 na wszystkich stacjach z maksimum w czerwcu w Ciosnach (11 $Bq \cdot m^{-3}$), w sierpniu w Krakowie (12 $Bq \cdot m^{-3}$) i we wrześniu w Łodzi (3 $Bq \cdot m^{-3}$) (rys. 4.11–4.13).

Przedstawiona charakterystyka zmian dobowych stężenia Rn-222 w przebiegu rocznym jest zgodna z wynikami uzyskanymi przez Kopcewicza (1968, 1974) dla Warszawy, gdzie wykazał on małą zmienność dobową stężenia Rn-222 w miesiącach od listopada do lutego, a największą w okresie letnim i wczesnej jesieni. Hötzl i Winkler (1994) porównując średni bieg dobowy stężenia Rn-222 w poszczególnych porach roku w Monachium stwierdzili podobną tendencję zmian jak w Polsce - najmniejszy zakres wahań, opisany stosunkiem maksimum dobowego do minimum, cechował zimę (1,5), a największy lato (3,5).



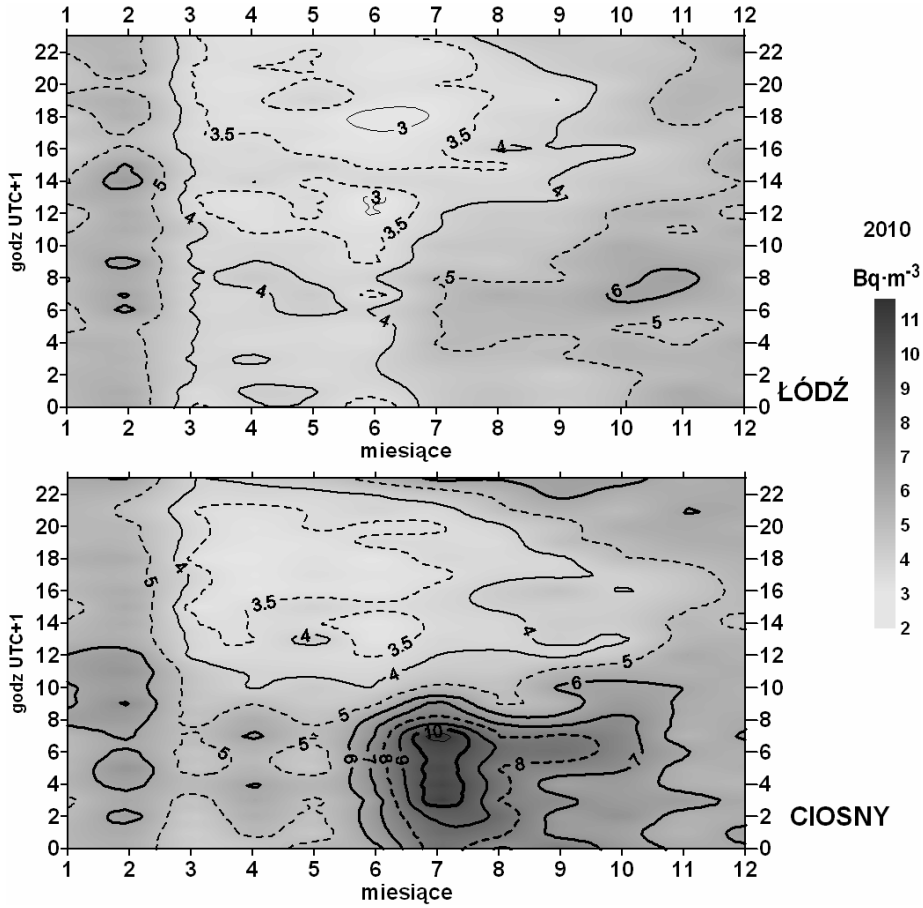
Rys. 4.11. Przebieg roczny zmienności dobowej średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w 2008 r.

Fig. 4.11. Annual course of daily variability of mean hourly Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008



Rys. 4.12. Przebieg roczny zmienności dobowej średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w 2009 r.

Fig. 4.12. Annual course of daily variability of mean hourly Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2009



Rys. 4.13. Przebieg roczny zmienności dobowej średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w Łodzi i Ciosnach w 2010 r.

Fig. 4.13. Annual course of daily variability of mean hourly Rn-222 concentration in Łódź and Ciosny in 2010

Wśród cech przebiegu dobowego stężenia Rn-222 w poszczególnych porach roku i miesiącach można zauważyć, oprócz wyraźnych zmian średnich wartości maksymalnych, także zmiany minimalnego poziomu rejestrowanego stężenia w ciągu doby. Średnio najniższe stężenia były rejestrowane na wszystkich stacjach wiosną i latem (tab. 4.3, rys. 4.10–4.13).

Tabela 4.3

Średnie maksymalne i minimalne wartości stężenia radonu (Rn-222) oraz średni dobowy zakres wahań (ampl.) stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi (Ł), Ciosnach (C) i Krakowie (K) w poszczególnych porach roku w latach 2008–2010

Table 4.3

Average maximum and minimum values of radon (Rn-222) concentration and average of daily fluctuation range (ampl.) of Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground in Łódź (Ł), Ciosny (C) and Kraków (K) in different seasons of the year in 2008–2010

Bq·m^{-3}	**Wiosna (III-V)**			**Lato (VI-VIII)**			**Jesień (IX-XI)**			**Zima (XII-II)**			**Rok**		
	Ł	**C**	**K**	**Ł**	**C**	**K**	**Ł**	**C**	**K**	**Ł**	**C**	**K**	**Ł**	**C**	**K**
Max.	5	7	12	5	10	15	7	9	16	6	6	12	6	8	13
Min.	3	3	6	3	4	6	4	4	8	5	5	8	4	4	7
Ampl.	2	4	6	2	6	9	3	5	8	1	1	4	2	4	6

Wśród cech przebiegu dobowego stężenia Rn-222 w poszczególnych porach roku i miesiącach można zauważyć, oprócz wyraźnych zmian średnich wartości maksymalnych, także zmiany minimalnego poziomu rejestrowanego stężenia w ciągu doby. Średnio najniższe stężenia były rejestrowane na wszystkich stacjach wiosną i latem (tab. 4.3, rys. 4.10–4.13).

Wzrost minimalnych dobowych wartości stężenia Rn-222 zaobserwowano jesienią i zimą - w centralnej Polsce najniższa notowana średnia wartość w tych porach roku na obu stacjach to 5 Bq·m^{-3}, a w Krakowie to 8 Bq·m^{-3}. Analiza wartości ekstremalnych średniego godzinnego stężenia Rn-222 w poszczególnych miesiącach wykazała, że najniższe stężenia rejestrowano w centralnej Polsce w czerwcu o godz. 18.00 (2,8 Bq·m^{-3} w Ciosnach w 2008 r. i 2,7 Bq·m^{-3} w Łodzi w 2010 r.). W Krakowie najniższe średnie stężenie Rn-222, 4,5 Bqm^{-3}, zarejestrowano w październiku 2009 r. o godz. 16.00 (rys. 4.12). Najwyższe średnie godzinne stężenie Rn-222 wystąpiło w Ciosnach w czerwcu 2008 r. o godz. 06.00, 13,5 Bq·m^{-3}. W Łodzi średnie godzinne maksimum w latach 2008–2010 zanotowano w październiku 2008 r. o godz. 07.00, 7,6 Bq·m^{-3}. W Krakowie w latach 2008–2009 najwyższa wartość średnia godzinna stężenia Rn-222 wyniosła 18,8 Bq·m^{-3} i wystąpiła w sierpniu 2008 r. o godz. 06.00 (rys. 4.11).

Wnioski

Główne cechy czasowego przebiegu stężenia Rn-222 w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem stwierdzone dla centrum Łodzi to m.in.:

- mały zakres wahań dobowych i rocznych średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222,
- późniejsze występowanie wartości ekstremalnych w ciągu doby w stosunku do stacji zamiejskich - maksimum najczęściej notowano w przedziale czasowym od godz. 07.00 do godz. 09.00, a minimum od godz. 17.00 do godz. 19.00,
- występowanie w marcu rocznego minimum średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222,
- wzrost stężenia radonu jesienią i zimą z maksimum rocznym w październiku w 2008 r., listopadzie w 2009 r. i lutym 2010 r.

Generalne prawidłowości przebiegu dobowego i rocznego stężenia Rn-222 wykazane dla stacji w Ciosnach to m.in.:

- występowanie latem rocznego maksimum stężenia Rn-222 w okresie od godz. 02.00 do godz. 06.00,
- występowanie jesienią (w 2008 r. i 2009 r.) i zimą (2010 r.) drugorzędnego maksimum rocznego, o niższej wartości stężenia Rn-222 niż latem,
- występowanie w marcu rocznego minimum średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222,
- największy zakres zmian dobowych średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w okresie od kwietnia do sierpnia.

Cechy czasowej zmienności stężenia Rn-222 uzyskane dla stacji w Krakowie to m. in.:

- występowanie w marcu rocznego minimum średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222,
- wyraźny rytm zmian dobowych w okres od kwietnia do listopada,
- najwyższe średnie godzinne stężenie Rn-222 przypadające na miesiące jesienne - wrzesień i październik,
- wydłużenie jesienią przedziału czasu w ciągu doby z wysokim stężeniem Rn-222 (wyraźny wzrost stężenia Rn-222 pojawiający się już od ok. godz. 01.00 i trwający do ok. godz. 08.00).

Analiza średniego rocznego stosunku wartości dobowego maksimum stężenia Rn-222 do minimum rejestrowanego na wysokości 2 m nad gruntem na stacjach w Łodzi, Ciosnach i Krakowie wynosił odpowiednio 1,3, 1,8 i 1,8.

Największe wartości stosunku maksimum dobowego stężenia Rn-222 do minimum na wszystkich stacjach występowały latem i wynosiły 1,6 (Łódź), 2,8 (Ciosny) i 2,5 (Kraków). Zimą maksymalne wartości dobowe przekraczały wartości minimalne średnio o 1,2 w Łodzi i Ciosnach oraz 1,4 w Krakowie.

Wyniki analizy czasowej zmienności stężenia Rn-222 na opisywanych stacjach pozostają w zgodności z wynikami badań innych autorów m.in. dla obszaru Polski (np. Kopcewicz 1968, 1974, Wach i in. 2009, Krajny i Ośródka 2005), Niemiec (np. Porstendörfer i in. 1991, Hötzl i Winkler 1994, Winkler i in. 2001), Rumunii (Baciu 2005, Florea i Duliu 2012).

5. ZMIENNOŚĆ STĘŻENIA RADONU W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA NA TLE LOKALNYCH WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH

5.1. Zmienność stężenia Rn-222 i temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem

Jak wykazała analiza przedstawiona w rozdziale 4, zmienność czasową stężenia Rn-222 cechują wahania okresowe – roczne i dobowe, podobne do niektórych elementów meteorologicznych, tj. temperatury powietrza, wiatru, strumienia ciepła gruntowego. Jest to jedna z przesłanek do poszukiwań związków między warunkami meteorologicznymi a stężeniem tego radionuklidu w powietrzu. W niniejszym rozdziale scharakteryzowano ogólne warunki termiczne panujące w okresie pomiarów koncentracji radonu, a także zilustrowano zmienność stężenia Rn-222 na tle przebiegu temperatury powietrza rejestrowanej na wysokości 2 m nad gruntem orz na tle zmian godzinnych wartości różnicy temperatury powietrza w warstwie przygruntowej 2,0 m–0,2 m.

Warunki termiczne panujące na analizowanych stacjach w centralnej Polsce różniły się w kolejnych latach badanego okresu 2008–2010 (tab. 5.1). Rok 2008 był najcieplejszym pod względem średniej rocznej temperatury powietrza wynoszącej 10,3°C w Ciosnach i 10,7°C w Łodzi oraz średniej temperatury powietrza w miesiącach zimowych (tab. 5.1). Zakres wahań średniej dobowej temperatury powietrza w 2008 r. wynosił od –8,3°C do 24,7°C w Ciosnach, i od –8,1°C do 24,9°C w Łodzi (rys. 5.1). Cechą przebiegu rocznego temperatury powietrza w 2008 r. były małe różnice w średniej miesięcznej między styczniem, lutym i marcem oraz gwałtowne ochłodzenie w połowie września (rys. 5.1 i 5.2).

Przebieg roczny średniej miesięcznej temperatury powietrza w 2009 r. wyróżnia się na tle pozostałych lat niską wartością w marcu i gwałtownym wzrostem temperatury w kwietniu, kiedy to średnia miesięczna przewyższała prawie dwukrotnie średnią wieloletnią (rys. 5.1, 5.2). Ponadto wrzesień 2009 r. cechował się temperaturą powietrza wyższą ponad przeciętną, tj. 16,9°C (Łódź) i 15,3°C (Ciosny) (tab. 5.1). Natomiast warunki termiczne miesięcy zimowych w 2009 r. są najbardziej zbliżone do średniej wieloletniej. Zakres wahań średniej dobowej temperatury powietrza w 2009 r. wynosił od –15,3°C do 25,3°C w Ciosnach, i od –12,6°C do 26,0°C w Łodzi.

Tabela 5.1

Średnia temperatura powietrza i średnie stężenie Rn-222 [Bq·m^{-3}] na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010

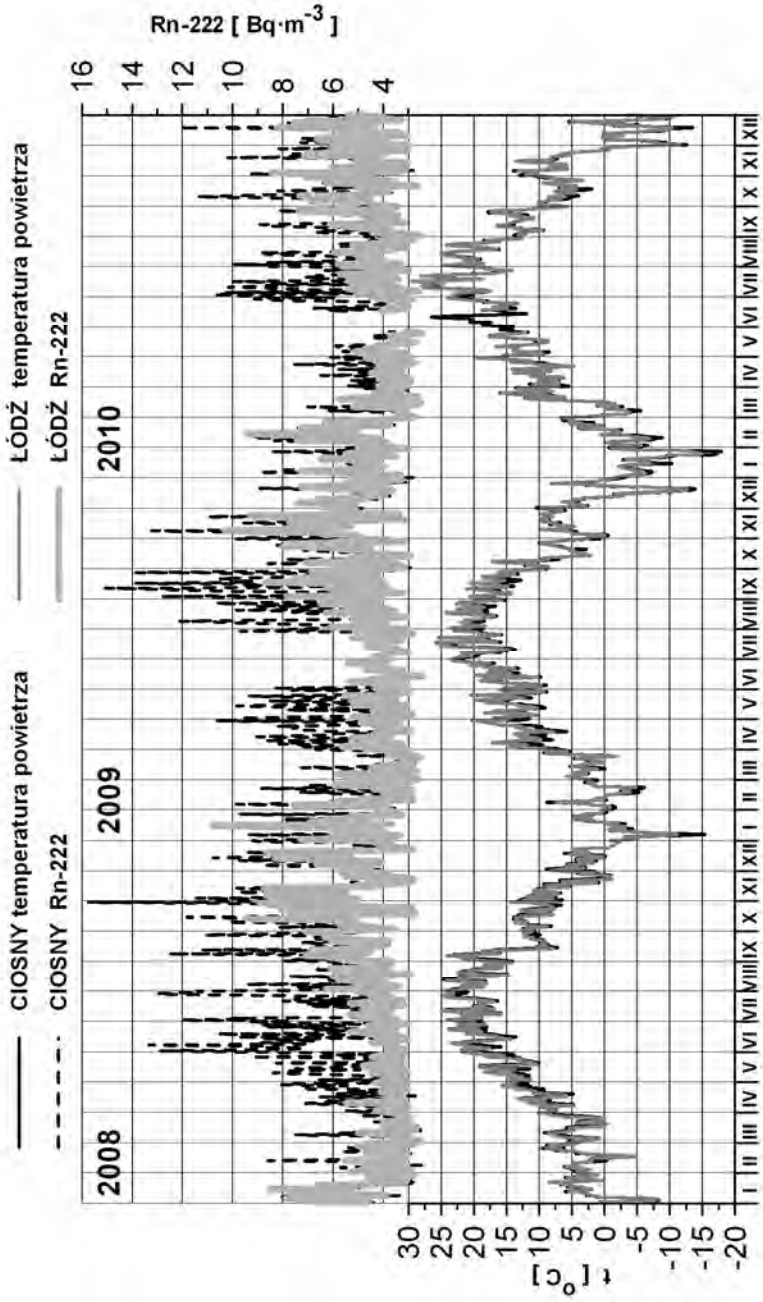
Table 5.1

Average air temperature and average Rn-222 concentration at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008–2010

t °C ***Rn-222***	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**	**Rok**
2008													
Ciosny	2,0	4,2	4,7	8,9	13,4	17,9	19,5	19,3	13,4	10,8	6,3	3,7	10,3
	5,3	*4,4*	*4,0*	*5,0*	*6,0*	*7,6*	*6,9*	*5,0*	*7,0*	*7,0*	*6,0*	*7,0*	*5,9*
Łódź	1,8	4,1	4,6	9,9	14,4	19,6	20,4	19,7	13,8	11,1	6,3	2,3	10,7
	4,9	*3,8*	*3,0*	*4,0*	*4,0*	*3,9*	*4,0*	*5,0*	*6,0*	*6,0*	*6,0*	*6,0*	*4,7*
2009													
Ciosny	-1,9	-0,2	2,7	11,3	13,4	12,4	19,5	19,3	15,3	7,2	6,5	-0,2	8,8
	5,9	*5,2*	*4,4*	*6,3*	*6,1*	-	-	*6,6*	*8,5*	*6,1*	*6,9*	*5,3*	*6,1*
Łódź	-1,6	0,1	3,7	13,2	14,6	16,8	21,4	20,1	16,9	7,8	6,8	0,1	10,0
	5,3	*4,5*	*3,9*	*4,1*	*3,9*	*4,1*	*3,6*	*4,6*	*5,3*	*5,1*	*6,4*	*5,2*	*4,7*
2010													
Ciosny	-8,2	-1,5	4,2	9,3	12,9	17,7	21,6	19,4	12,3	5,9	5,7	-5,5	7,8
	5,4	*6,0*	*4,1*	*4,5*	*4,2*	*5,0*	*6,7*	*5,8*	*5,8*	*5,3*	*4,9*	*5,6*	*5,3*
Łódź	-7,7	-1,2	4,3	9,5	12,1	16,3	21,1	19,2	12,2	6,3	6,0	-6,0	7,9
	4,9	*5,9*	*3,7*	*3,7*	*3,7*	*3,4*	*4,1*	*4,4*	*4,5*	*4,6*	*4,7*	*5,3*	*4,4*
Łódź*	**-2,9**	**-1,9**	**2,1**	**7,6**	**13,1**	**16,0**	**18,0**	**17,4**	**13,5**	**8,4**	**3,0**	**-0,9**	**7,8**

*średnia wieloletnia temperatura powietrza z okresu 1904–2006, opracowanie własne

Rok 2010 na tle pozostałych lat charakteryzował się najwyższymi ekstremalnymi wartościami średniej dobowej temperatury powietrza, które wynosiły w Łodzi –15,0°C i 29,6°C, a w Ciosnach –17,8°C i 28,5°C (rys. 5.1). W 2010 roku bardzo mroźny był styczeń i grudzień za sprawą m.in. długotrwałych układów wyżowych znad Rosji blokujących napływ cieplejszego powietrza znad Atlantyku (rys. 5.2). W tym roku także największy udział mają dni gorące ze średnią dobową temperaturą powietrza powyżej 25°C. W Łodzi takich dni zanotowano 10, a w Ciosnach 12, podczas gdy w 2008 r. nie wystąpiły, a w 2009 r. zarejestrowano 1 dzień gorący w Łodzi i 3 dni gorące w Ciosnach. Niska temperatura powietrza w zimie w Łodzi i Ciosnach w 2010 r. głównie wpłynęła na najwyższą w analizowanych 3 latach amplitudę roczną, tj. 28,8°C i 29,8°C.



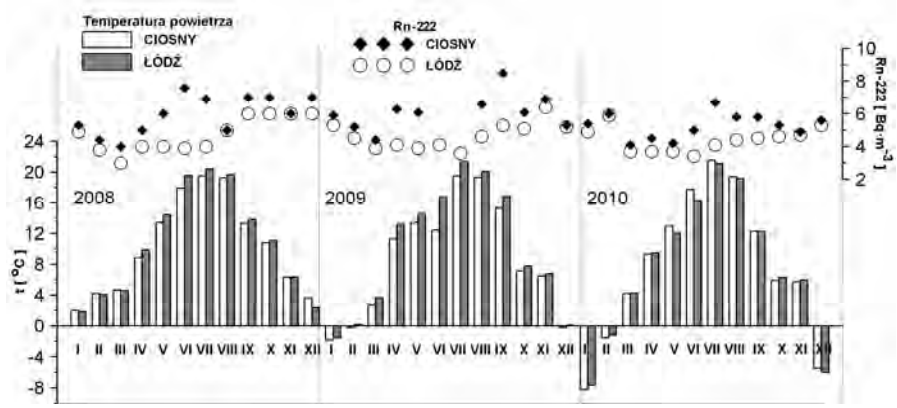
Rys. 5.1. Przebieg roczny średniej dobowej temperatury powietrza i średniego dobowego stężenia Rn-222 w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.1. Annual course of average daily air temperature and average daily Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008–2010

Cechy zmienności rocznej stężenia Rn-222 nie są synchroniczne do zmian rocznych temperatury powietrza rejestrowanej na wysokości 2 m i różnią się na analizowanych stacjach (rys. 5.1). Związek badanych zmiennych jest silniejszy na stacji zamiejskiej, gdzie wzrostowi temperatury powietrza w okresie wiosny i lata towarzyszy znaczny wzrost koncentracji radonu. W Łodzi taka tendencja nie jest obserwowana. Na tej stacji charakterystyczną cechą rocznego przebiegu stężenia radonu jest powolny, systematyczny wzrost od wiosny do jesieni, kiedy to występuje maksimum. W Ciosnach jesienią obserwowane jest drugorzędne maksimum roczne stężenia Rn-222, a w obszarze miejskim wyraźny wzrost koncentracji Rn-222 w powietrzu przypada na chłodną porę roku (rys. 5.1 i 5.2). Analiza korelacyjna dla średnich miesięcznych wartości stężenia Rn-222 i temperatury powietrza potwierdziła występujące między stacjami różnice w charakterze związku badanych zmiennych (rys. 5.3). W mieście współczynnik korelacji rang Spearmana był ujemny i przyjmował niską wartość, tj. $r_s = -0{,}22$, natomiast w obszarze zamiejskim charakter związku był dodatni, a wartość współczynnika korelacji wynosiła 0,54.

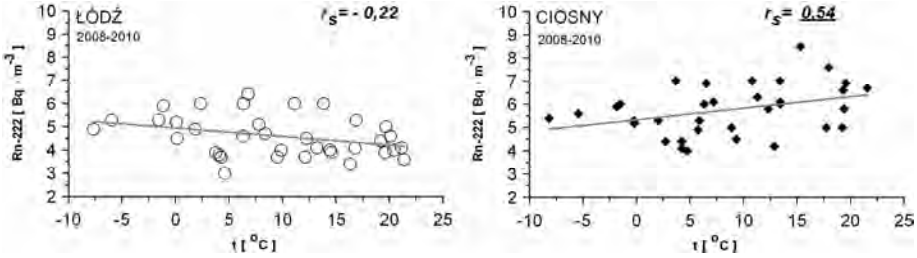
W dalszej części analizy poszukiwano odzwierciedlenia specyfiki warunków termicznych panujących w poszczególnych latach badanego okresu w zmienności czasowej stężenia radonu. Należy podkreślić, że średnia miesięczna temperatura powietrza w kontekście badań nad radonem jest rozpatrywana jako wskaźnik makroskalowych warunków pogodowych panujących w danej porze roku, stanowiących tło do szczegółowych badań uwarunkowań stężenia tego radionuklidu w powietrzu. Przykładem ilustrującym związek średnich wartości badanych zmiennych może być I kwartał 2008 r., kiedy to zarejestrowano najniższe w ciągu 3 lat średnie miesięczne wartości stężenia Rn-222 równocześnie z najwyższą w latach 2008–2010 średnią temperaturą badanych miesięcy (tab. 5.1). Wysoka, jak na tę porę roku, temperatura powietrza w Polsce była konsekwencją dominacji cyrkulacji zachodniej, z dużą frekwencją układów niskiego ciśnienia, z którymi związany był napływ ciepłego i wilgotnego powietrza znad Atlantyku. Warunki „ciepłej” zimy wraz z silnym wiatrem panujące od stycznia do marca 2008 r. nie sprzyjały koncentracji radonu przy gruncie, czego wyrazem są niskie średnie miesięczne stężenia tego gazu (tab. 5.1). W 2009 r. miesiącem wyróżniającym się na tle wielolecia wysoką średnią temperaturą powietrza był wrzesień. W tym miesiącu na stacji w Ciosnach zanotowano najwyższą w ciągu 3–letniej serii pomiarowej średnią miesięczną wartość stężenia Rn-222, tj. 8,5 $Bq \cdot m^{-3}$. W tym miesiącu dominował typ pogody słonecznej ze słabym wiatrem, kształtowanej przez ośrodki wysokiego ciśnienia położone nad północną i środkową Europą. Taka pogoda sprzyjała gwałtownym wzrostom stężenia Rn-222 w godzinach nocnych na stacji zamiejskiej. W 2010 r. szczególnie mroźny styczeń i grudzień nie miał odzwierciedlenia w odchyleniu średnich wartości stężenia radonu. Spośród

miesięcy zimowych 2010 r. wzrost stężenia Rn-222 w stosunku do pozostałych lat był natomiast obserwowany w lutym, który podobnie jak styczeń i grudzień był najchłodniejszy w latach 2008–2010 (tab. 5.1, rys. 5.2). Wyższe średnie stężenie Rn-222 w lutym 2010 na tle wcześniejszych lat było konsekwencją oddziaływania w Europie wyżu rosyjskiego z typem pogody słonecznej, bez aktywnej wymiany powietrza. To sprzyjało wzrostom stężenia radonu w dolnej troposferze. Luty w 2008 r. i 2009 r. w odróżnieniu do 2010 r. cechował się większą frekwencją nad Polską układów niskiego ciśnienia z frontami atmosferycznymi i silnym wiatrem.



Rys. 5.2. Średnia miesięczna temperatura powietrza na tle średniego stężenia Rn-222 w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.2. Average monthly air temperature on the background of avarage Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008–2010

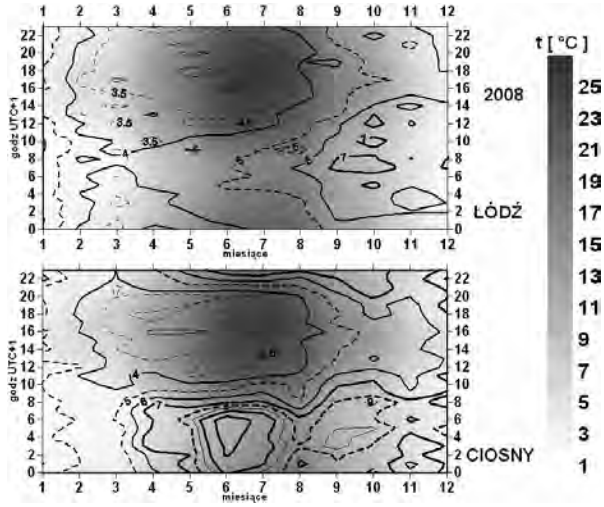


Rys. 5.3. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniej miesięcznej temperatury powietrza w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Współczynnik korelacji rang Spearmana - r_s

Fig. 5.3. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly air temperature in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Spearman's rank correlation coefficient - r_s

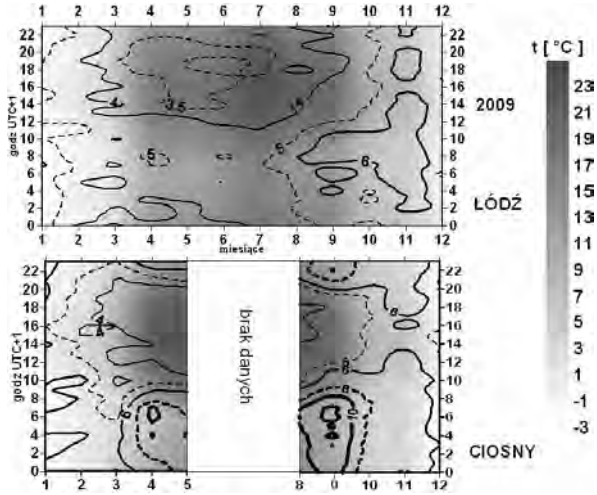
Komentarz dotyczący makroskalowych warunków pogodowych opracowano na podstawie Numerycznej Prognozy Pogody ICM (*http://new.meteo.pl*).

Rysunki 5.4–5.7 przedstawiają roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle temperatury powietrza. Generalną prawidłowością występującą w ciągu całego roku na obu stacjach jest odwrotny do przebiegu temperatury dobowy przebieg stężenia Rn-222. Zmniejszanie stężenia Rn-222 w ciągu dnia następuje wraz ze wzrostem temperatury powietrza. Prawdopodobnie jest to konsekwencją rozwoju konwekcyjnych prądów powietrza wynoszących radon od podłoża do wyższych warstw atmosfery. Wzrost stężenia Rn-222 w powietrzu zaczyna się w godzinach wieczornych wraz z wychładzaniem podłoża i spadkiem temperatury powietrza. Na tę porę doby przypada zanik ruchów turbulencyjnych powietrza, sprzyjający koncentracji radonu przy gruncie do maksimum jego stężenia w godzinach porannych. W Ciosnach obserwowano prawie dwukrotnie wyższy maksymalny dobowy poziom stężenia tego gazu w stosunku do centrum Łodzi (rys. 5.7).



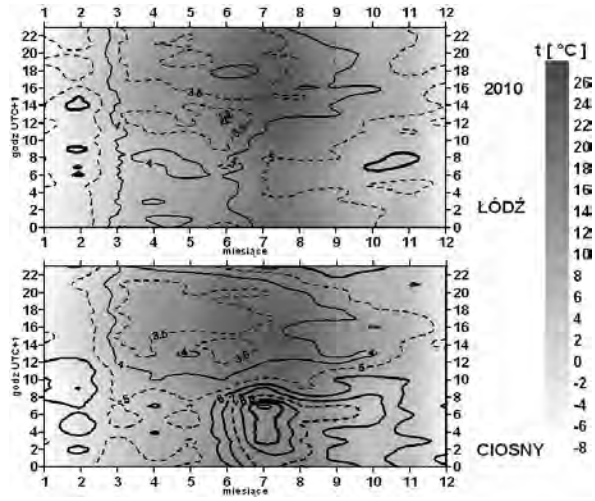
Rys. 5.4. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 (izolinie) na tle średnich godzinnych wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w 2008 r.

Fig. 5.4. Annual course of average hourly Rn-222 concentration (isolines) on the background of the average hourly air temperature at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008



Rys. 5.5. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 (izolinie) na tle średnich godzinnych wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w 2009 r.

Fig. 5.5. Annual course of average hourly Rn-222 concentration (isolines) on the background of the average hourly air temperature at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2009



Rys. 5.6. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 (izolinie) na tle średnich godzinnych wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach 2010 r.

Fig. 5.6. Annual course of average hourly Rn-222 concentration (isolines) on the background of the average hourly air temperature at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2010

W świetle miesięcznych wartości współczynnika korelacji rang Spearmena siła związku stężenia Rn-222 z temperaturą powietrza jest większa na stacji zamiejskiej we wszystkich miesiącach z wyjątkiem stycznia (tab. 5.2). W Ciosnach, w każdym roku kwiecień i wrzesień wyróżnia się na tle innych miesięcy najwyższą wartością współczynnika korelacji. W Łodzi największa siła związku badanych zmiennych wystąpiła w lipcu, sierpniu i wrześniu (tab. 5.2).

Charakter czasowej zmienności stężenia Rn-222 na tle temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach jest także szczegółowo zilustrowany w postaci wykresów korelacyjnych opracowanych na podstawie średnich przebiegów dobowych badanych zmiennych (rys. 5.8). Generalnie ekstremalne wartości stężenia Rn-222 występują z opóźnieniem w stosunku do minimum i maksimum dobowego temperatury powietrza. Na wykresach korelacyjnych stężenia Rn-222 w funkcji temperatury powietrza „efekt opóźnienia" (histerezy) ujawnia się w postaci pętli. Efekt ten jest bardzo wyraźny np. w czerwcu i lipcu (rys. 5.8). W ciągu całego roku dla wartości minimalnych stężenia Rn-222, przypadającego w godzinach popołudniowych, obserwuje się regularne przesunięcie czasowe w stosunku do maksimum temperatury powietrza. Opóźnienie średniego maksimum stężenia Rn-222 w stosunku do minimum temperatury powietrza nie jest obserwowane w każdym miesiącu, najczęściej występuje wiosną i latem (rys. 5.8).

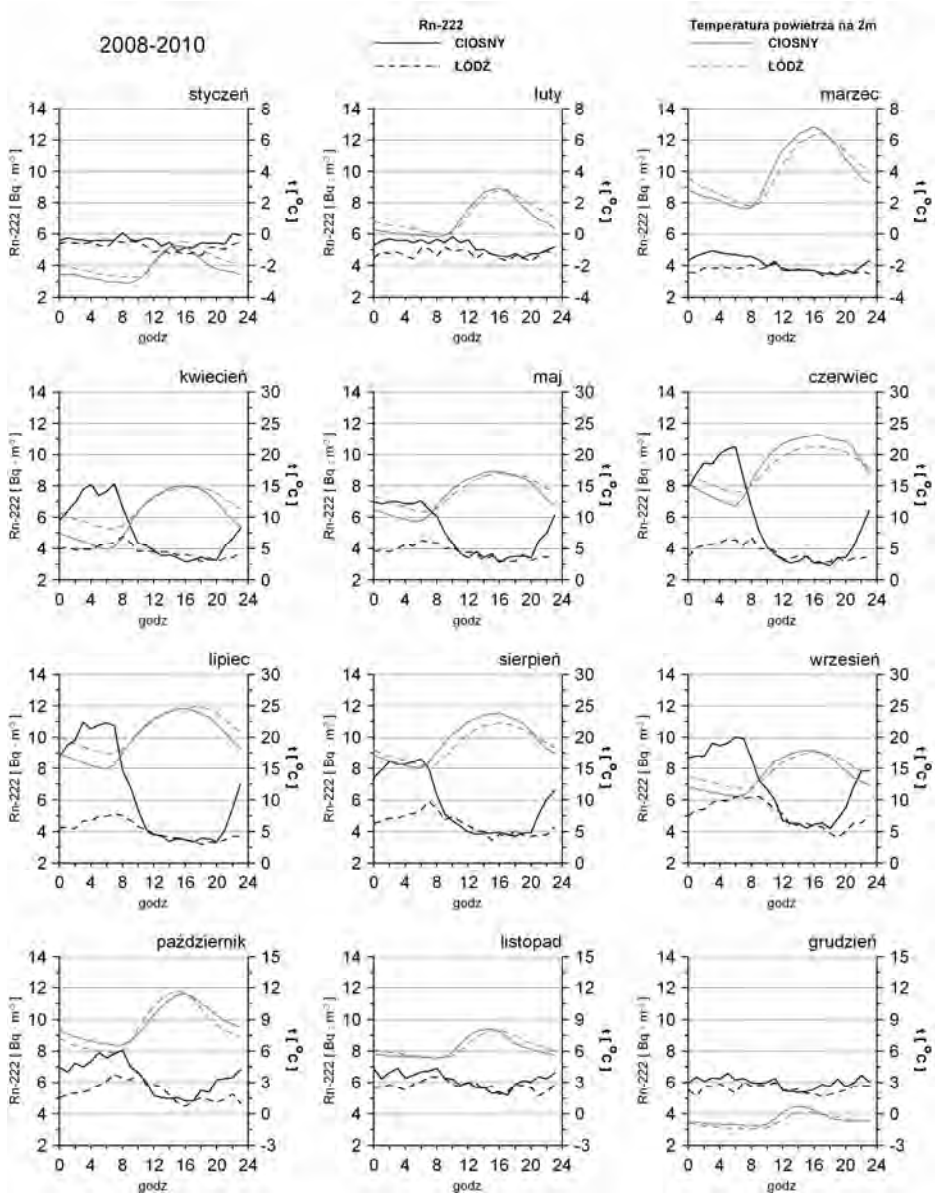
Tabela 5.2

Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji temperatury powietrza 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05

Table 5.2

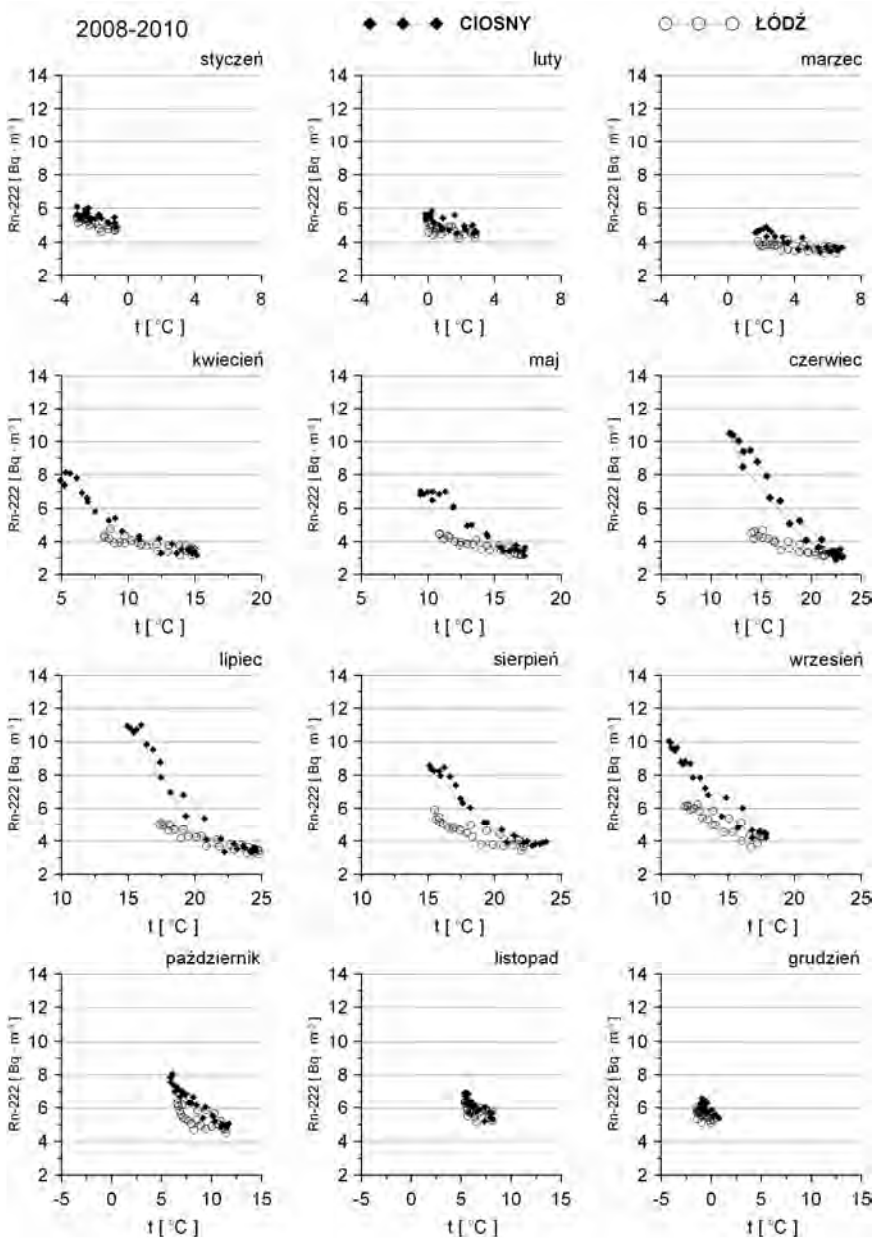
Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for average hourly Rn-222 concentrations as a function of the air temperature 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łódź 2008												
r_s	-0,559	-0,366	-0,307	-0,541	-0,675	-0,684	-0,705	-0,676	-0,719	-0,587	-0,328	-0,470
Ciosny 2008												
r_s	-0,261	-0,221	-0,684	-0,703	-0,734	-0,730	-0,720	-0,665	-0,735	-0,681	-0,535	-0,292
Łódź 2009												
r_s	-0,366	-0,040	-0,070	-0,464	-0,642	-0,626	-0,622	-0,627	-0,622	0,651	-0,590	-0,317
Ciosny 2009												
r_s	-0,285	-0,485	-0,465	-0,710	-0,698	brak	brak	-0,727	-0,718	-0,612	-0,470	-0,179
Łódź 2010												
r_s	-0,308	-0,109	-0,326	-0,381	-0,354	-0,454	-0,630	-0,613	-0,587	-0,485	-0,287	0,22
Ciosny 2010												
r_s	-0,198	-0,429	-0,617	-0,714	-0,602	-0,704	-0,613	-0,661	-0,672	-0,722	-0,265	-0,371



Rys. 5.7. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

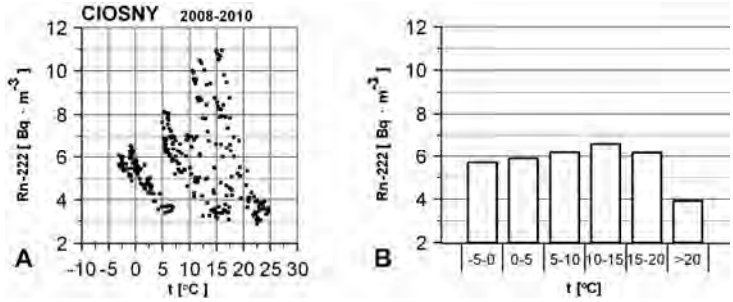
Fig. 5.7. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature at a height of 2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010



Rys. 5.8. Stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza w Łodzi i w Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.7)

Fig. 5.8. Rn-222 concentration as a function of the air temperature in Łódź and Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.7)

Analiza średniego stężenia Rn-222 dla wybranych przedziałów temperatury powietrza wykazała, że w Łodzi największa przeciętna koncentracja radionuklidu występuje w przedziale temperatury od –5°C do 0°C (5,4 Bq·m^{-3}), a w Ciosnach w przedziale 10°C–15°C (6,6 Bq·m^{-3}) - rys. 5.9 i 5.10. Minimalne średnie godzinne stężenie Rn-222 w Łodzi notowane jest w przedziale 5°C–10°C (3,1 Bq·m^{-3}), a maksimum występuje w zakresie temperatury 20°C–25°C (6,6 Bq·m^{-3}). W Ciosnach minimum średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 przypada na przedział 15°C–20°C (2,9 Bq·m^{-3}), a maksimum stężenia Rn-222 przypada na ten sam zakresie temperatury powietrza co w Łodzi, tj. 20°C–25°C (11,0 Bq·m^{-3}) - rys. 5.9 i 5.10.



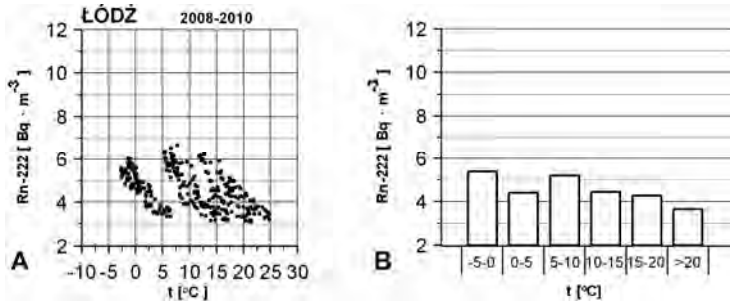
Rys. 5.9. A. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych w poszczególnych miesiącach - rys. 5.7); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości temperatury powietrza

Fig. 5.9. A. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature at a height of 2 m above the ground in Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.7); B. Average Rn-222 concentration for the selected air temperature range values

Warunki termiczne powietrza scharakteryzowano także na podstawie różnicy temperatury w przygruntowej warstwie powietrza o grubości 1,8 m. Celem tej analizy było poszukiwanie związku między poziomem koncentracji tego gazu a wartością i charakterem pionowych zmian temperatury powietrza. Zmienność temperatury w profilu pionowym jest wskaźnikiem stanu równowagi pionowej atmosfery, istotnej dla procesu dyfuzji turbulencyjnej. Dyfuzja turbulencyjna to proces rozprzestrzenianie się unoszonej substancji pasywnej (do której zalicza się m.in. radon) w całej objętości powietrza, uwarunkowany ruchem turbulencyjnym. Dla turbulencji najważniejszymi parametrami meteorologicznymi są warunki termiczne i prędkość wiatru (Sorbjan 1983).

Pionowe ruchy porcji powietrza w określonej warstwie troposfery rozwijają się pod wpływem stratyfikacji termicznej oraz zróżnicowania prędkości

wiatru. Trzy podstawowe stany równowagi termicznej atmosfery to: stan równowagi chwiejnej (rozwój ruchów pionowych), stan równowagi stałej (tłumienie ruchów pionowych), stan równowagi obojętnej (neutralnej, bez wyżej wymienionych tendencji ruchu). W warunkach równowagi chwiejnej, proces dyfuzji turbulencyjnej jest bardzo intensywny i w konsekwencji doprowadza do szybkiego rozcieńczenia pasywnych substancji w powietrzu. W warunkach stałej równowagi termicznej dyfuzja turbulencyjna jest znikoma, a substancje zawarte w powietrzu, prawie nierozcieńczone, są transportowane głównie przez wiatr (Sorbjan 1983).



Rys. 5.10. A. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w latach 2008–2010 w Łodzi (zależność dla średnich przebiegów dobowych w poszczególnych miesiącach - rys. 5.7); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości temperatury powietrza

Fig. 5.10. A. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature at a height of 2 m above the ground in Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.7); B. Average Rn-222 concentration for the selected air temperature range values

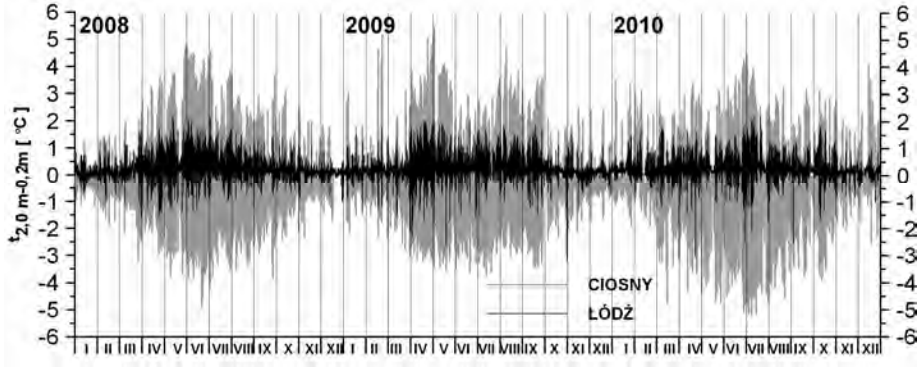
Zmiany gęstości powietrza wraz z wysokością będące funkcją zmian temperatury determinują ruch wznoszący lub opadający powietrza. Wartość adiabatycznej zmiany temperatury w nienasyconym parą wodną powietrzu po wzniesieniu się o 100 m (tzw. suchoadiabatyczny gradient temperatury, γ_a) wynosi w przybliżeniu –1,0°C, czyli dla warstwy powietrza o grubości 1 m γ_a = –0,01°C. Pionowy profil temperatury powietrza charakteryzuje się określonym pionowym gradientem temperatury γ, który może być większy, mniejszy lub równy wartości gradientu suchoadiabatycznego γ_a. W przypadku gdy $\gamma_a < \gamma$ (np. γ = 0,1°C/1 m) występuje stała równowaga w warstwie powietrza i zanikają ruchy pionowe, a powietrze ma tendencję do osiadania. W przypadku odwrotnym, tj. $\gamma_a > \gamma$ (np. γ = –2,0°C/1 m) możemy mówić o równowadze chwiejnej i porcja powietrza podlega przyspieszeniu wznoszącemu, rozwija

się konwekcja. W sytuacji gdy $\gamma_a = \gamma$ - występuje równowaga neutralna i brak wymienionych wyżej tendencji ruchu.

Dla warstwy przypowierzchniowej powietrza o grubości 1,8 m wartość pionowego gradientu temperatury γ_a w przypadku równowagi neutralnej (obojętnej) wynosi w przybliżeniu –0,018°C. Pionowy gradient temperatury powietrza w badanej warstwie, przyjmujący wartości poniżej i powyżej wymienionej wartości „neutralnej", wskazuje odpowiednio na równowagę chwiejną i równowagę stałą. W przypadku wystąpienia zjawiska inwersji przygruntowej temperatury powietrza badana warstwa będzie cechować się wybitnie stałą równowagą pionową, silnie hamującą ruchy wznoszące porcji powietrza.

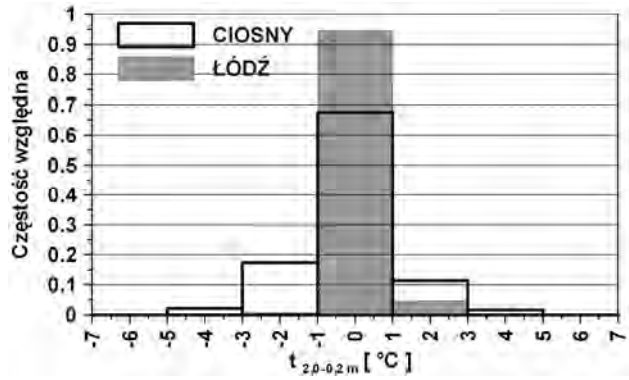
Stan równowagi powietrza zmienia się w cyklu dobowym, co jest typową cechą warstwy granicznej atmosfery na obszarach lądowych (Stull 1988). Po wschodzie Słońca przygruntowa warstwa powietrza nagrzewa się intensywnie od powierzchni gruntu, a gradienty pionowe temperatury mogą o kilka rzędów przewyższać gradient suchoadiabatyczny. W tym czasie formuje się tzw. dzienna warstwa mieszania powietrza o intensywnych ruchach pionowych. Chwiejna równowaga atmosfery i konwekcja najsilniej rozwijają się przed południem i w godzinach popołudniowych. Po zachodzie Słońca wychładzanie gruntu przynosi zmniejszenie gradientu pionowego temperatury powietrza i wystąpienie równowagi stałej w atmosferze. W wyniku silnego radiacyjnego wychłodzenia podłoża podczas bezchmurnych nocy ze słabym wiatrem powstają silne przygruntowe inwersje temperatury powietrza, umacniające stałą równowagę pionową. Jest to okres tzw. stabilnej warstwy granicznej atmosfery przy powierzchni ziemi. Grubość warstwy inwersyjnej powietrza uzależniona jest od czasu wychładzania powietrza oraz intensywności ruchów turbulencyjnych rozprzestrzeniających chłodne powietrze w profilu pionowym. Zbyt silna turbulencja przeciwdziała wykształceniu się inwersyjnego profilu pionowego temperatury, przyczyniając się do szybkiego rozpraszania oziębionego powietrza. Inwersje przygruntowe zanikają po wschodzie Słońca, wraz z ogrzewaniem powierzchni gruntu. Nad miastem rozwój tzw. stabilnej warstwy granicznej atmosfery jest utrudniony w wyniku nadwyżki ciepła na obszarach zurbanizowanych. W powietrzu nad miastem dominuje proces intensywnego mieszania uwarunkowanego istnieniem lekko chwiejnej lub obojętnej pionowej równowagi termicznej w ciągu całej doby (Oke 1995, Fortuniak 2010).

W literaturze dotyczącej stężenia radonu w powietrzu atmosferycznym stan równowagi termicznej powietrza jest wymieniany jako istotny dla koncentracji tego radionuklidu w dolnej troposferze (np. Kopcewicz, 1968, 1974, Porstendörfer i in. 1991, Winkler i in. 2001, Sesana i in. 1998).



Rys. 5.11. Przebieg roczny średniej godzinnej różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m –0,2 m w Ciosnach (szary kolor) i Łodzi (czarny kolor) w latach 2008–2009

Fig. 5.11. Annual course of average hourly air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny (gray color) and Łódź (black color) in 2008–2009



Rys. 5.12. Histogram częstości średniej godzinnej różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2009

Fig. 5.12. Distribution of average hourly air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny and Łódź in 2008–2009

Na obu stacjach generalną cechą rocznego przebiegu pionowej różnicy temperatury w badanej przygruntowej warstwie powietrza o grubości 1,8 m jest niski zakres wahań w miesiącach zimowych i wysoka dobowa zmienność w okresie lata (rys. 5.11). Stację zamiejską cechuje prawie dwukrotnie większa amplituda różnicy temperatury w warstwie przygruntowej powietrza niż centrum Łodzi. W Ciosnach w latach 2008–2010 najwyższa dodatnia średnia i absolutna godzinna różnica temperatury między poziomem 2,0 m a 0,2 m

(inwersja temperatury) wynosiła odpowiednio 2,3°C i 5,4°C, podczas gdy w Łodzi osiągnęła tylko 0,07°C i 2,2°C. Największa ujemna średnia i absolutna różnica temperatury powietrza w warstwie 1,8 m na badanych stacjach wynosiła odpowiednio –3,03°C i –5,2°C (Ciosny) oraz –1,3°C i –3,2°C (Łódź), tab. 5.3. W Łodzi w warstwie powietrza 1,8 m wartości różnicy temperatury w przedziale od –1°C do 1°C stanowią 96% obserwacji, a w Ciosnach frekwencja tych wartości wynosi 68% (rys. 5.12). Na rysunkach 5.13–5.15 przedstawiono roczny przebieg średniej zmienności dobowej różnicy temperatury powietrza w warstwie 1,8 m na tle stężenia Rn-222.

Tabela 5.3

Wartości ekstremalne średniej godzinnej i absolutnej różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010

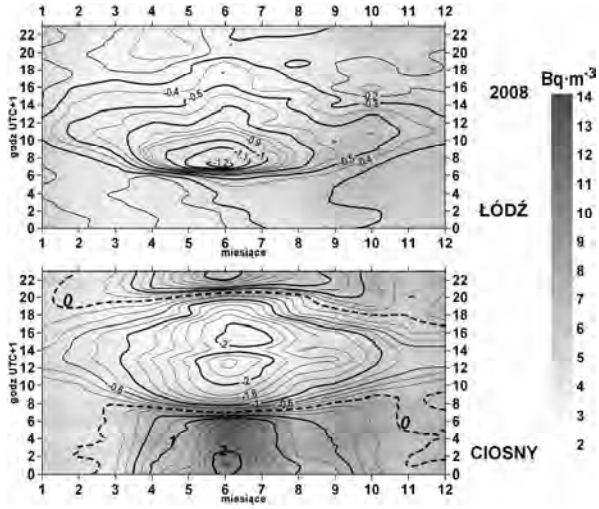
Table 5.3

Extreme values of average hourly difference and absolute difference of the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008–2010

	Łódź		**Ciosny**	
	min., °C	**max., °C**	**min., °C**	**max., °C**
rok	**2008**			
średnie	–1,25	–0,03	–2,45	2,31
absolutne	–1,64	2,19	–4,88	4,76
rok	**2009**			
średnie	–1,22	-0,01	–2,31	2,17
absolutne	–3,17	2,06	–3,75	5,42
rok	**2010**			
średnie	–0,99	0,07	–3,03	1,72
absolutne	–3,03	2,16	–5,22	4,43

Wzrost stężenia Rn-222 następuje w okresie zmniejszania się ujemnych pionowych różnic temperatury powietrza, osiągając maksimum dobowe w czasie nocnej inwersji temperatury powietrza. Okres dodatnich pionowych różnic temperatury powietrza między poziomem 2,0 m a 0,2 m w ciągu doby występuje tylko na stacji zamiejskiej. W centrum Łodzi średnie godzinne różnice temperatury w większości przypadków zbliżają się jedynie do zera, zatem przy gruncie nie obserwuje się trwałych nocnych inwersji temperatury (rys. 5.16). Okresowi doby z ujemnymi pionowymi różnicami temperatury powietrza, tj. po wschodzie Słońca do godzin wieczornych odpowiada okres niskich stężeń Rn-222. W Łodzi najwyższe ujemne pionowe różnice temperatury po-

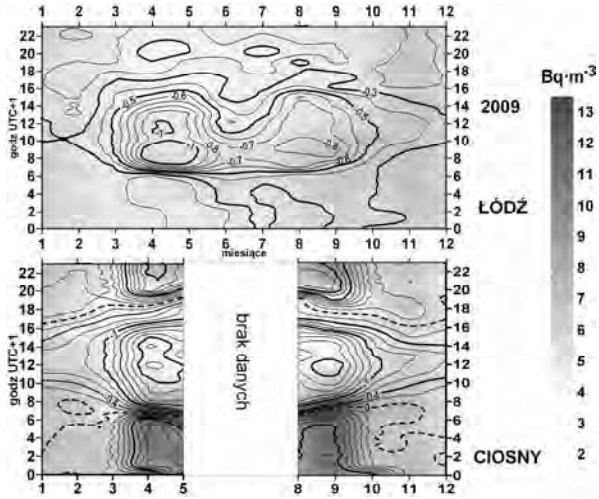
wietrza w ciągu doby występują wcześniej i trwają krócej niż za miastem. Skrócenie czasu trwania wysokich ujemnych różnic temperatury w wartwie powietrza 1,8 m w Łodzi ma związek z natężeniem insolacji, która jest osłabiana w mieście przez szybki rozwój zachmurzenia konwekcyjnego w godzinach przedpołudniowych (rys. 5.14–5.16).



Rys. 5.13. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem (izolinie) w Łodzi i Ciosnach w 2008 r.

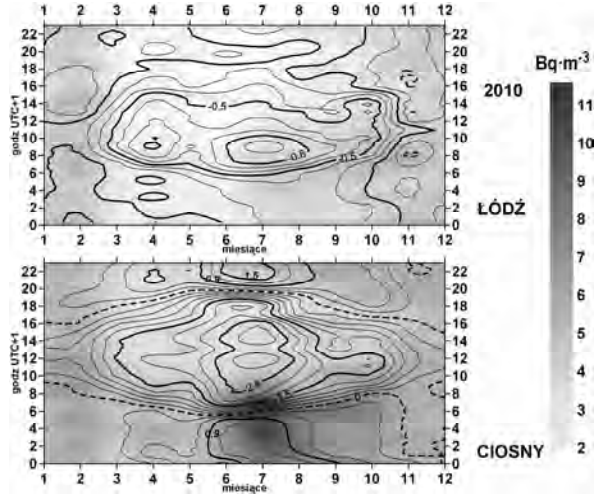
Fig. 5.13. Annual course of average hourly Rn-222 concentration on the background of difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground (isolines) in Łódź and Ciosny in 2008

W Łodzi wszystkie miesiące cechują się małym zakresem zmian dobowych temperatury powietrza w warstwie 1,8 m, średnio z przewagą ujemnych różnic pionowych. Wartości badanych różnic temperatury w profilu pionowym w centrum miasta wskazują na dominację w ciągu całego roku chwiejnej i słabo chwiejnej pionowej równowagi termicznej powietrza (rys. 5.16–5.17). Ten stan termiczny sprzyja intensywnej wymianie turbulencyjnej w przypowierzchniowej warstwie powietrza i jest konsekwencją istnienia dodatkowego, antropogenicznego strumienia ciepła na obszarach zurbanizowanych, osłabiającego nocne wychładzanie powierzchni miasta. Ta specyficzna cecha klimatu miasta może być główną przyczyną prawie dwukrotnie niższych wartości maksymalnych stężenia Rn-222 w Łodzi, nie przekraczających 20 $Bq \cdot m^{-3}$, w stosunku do stacji zamiejskiej.



Rys. 5.14. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem (izolinie) w Łodzi i Ciosnach w 2009 r.

Fig. 5.14. Annual course of average hourly Rn-222 concentration on the background of difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground (isolines) in Łódź and Ciosny in 2009



Rys. 5.15. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem (izolinie) w Łodzi i Ciosnach w 2010 r.

Fig. 5.15. Annual course of average hourly Rn-222 concentration on the background of difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground (isolines) in Łódź and Ciosny in 2010

W Ciosnach w ciągu całego roku zaznacza się zmienność stratyfikacji termicznej powietrza w cyklu dobowym, z maksimum amplitudy różnic temperatury w miesiącach letnich. W ciągu dnia występuje, podobnie jak w Łodzi, okres intensywnej chwiejnej równowagi termicznej sprzyjającej rozwojowi turbulencji. Za miastem, w godzinach nocnych, wychładzanie powierzchni gruntu jest większe niż w Łodzi. W tym czasie w Ciosnach formuje się przygruntowa inwersja temperatury i następuje wzrost stabilności atmosfery, co hamuje pionową wymianę powietrza oraz powoduje zanikanie turbulencji. Zanik turbulencji stwarza warunki do wzrostu koncentracji Rn-222 przy gruncie. Silne inwersje przygruntowe w Ciosnach cechowała największa frekwencja w miesiącach od kwietnia do września z maksimum w miesiącach letnich (rys. 5.11, 5.13–5.15). Wybitnie stała równowaga termiczna przy gruncie pojawiała się za miastem także w miesiącach zimowych np. w lutym 2009 i grudniu 2010 r. (rys. 5.11, 5.13–5.15). W Ciosnach średnie stężenie Rn-222 odpowiadające okresowi dodatnich różnic temperatury powyżej 1°C/1,8 m wynosiło 8,0 $Bq \cdot m^{-3}$, a w okresie ujemnych różnic temperatury powietrza w profilu pionowym poniżej –2°C/1,8 m rejestrowano przeciętnie 5,6 $Bq \cdot m^{-3}$. Największe stężenie Rn-222, w przedziale 20–40 $Bq \cdot m^{-3}$, rejestrowano na stacji zamiejskiej w dniach, w których maksymalna dodatnia różnica pionowa temperatury powietrza wynosiła średnio 3°C/1,8 m. Takich dni ze stężeniem Rn-222 w Ciosnach odnotowano w badanym okresie 89, z czego 73 dni (82%) charakteryzowały się inwersją temperatury w zakresie 2°C–4,8°C/1,8 m. Absolutnie największe zarejestrowane stężenie Rn-222, 40 $Bq \cdot m^{-3}$, wystąpiło w dniu z różnicą temperatury powietrza nie przekraczającą 1,4°C/1,8 m. W dniach z maksymalnym dobowym stężeniem Rn-222 < 5 $Bq \cdot m^{-3}$ tak silne inwersje przygruntowe na stacji zamiejskiej nie wystąpiły, a największe dodatnie różnice temperatury powietrza w warstwie przygruntowej nie przekroczyły przeciętnie 0,8°C/1,8 m. Wśród 48 takich dni, 27 dni (56%) charakteryzowało się dodatnią różnicą temperatury powietrza poniżej 0,5°C/1,8 m. W Łodzi w dniach z maksymalną dobową wartością stężenia radonu w przedziale 10–20 $Bq \cdot m^{-3}$ i w dniach z niskim poziomem koncentracji radonu, tj. < 5 $Bq \cdot m^{-3}$ największe różnice temperatury powietrza nie różniły się i wynosiły przeciętnie 0,7°C/1,8 m. Zakres zmienności pionowych różnic temperatury powietrza przy gruncie w centrum miasta w wybranych dwóch grupach dni to 0,1°C–2,2°C/1,8 m. Absolutnie największe stężenie Rn-222 w centrum Łodzi, 20 $Bq \cdot m^{-3}$, zarejestrowano w dniu z maksymalną różnicą temperatury powietrza o wartości 0,9°C/1,8 m. W chwili pomiaru stężenia Rn-222 różnica temperatury powietrza w warstwie powietrza wynosiła 0,2°C/1,8 m.

W tabeli 5.4, w oparciu o dane co 1 godz., przedstawiono średnie stężenie Rn-222 w przedziałach różnicy temperatury powietrza w warstwie 1,8 m. Wyniki dla Łodzi potwierdzają opisywane relacje – brak jest statystycznego związku stężenia Rn-222 z wartością różnicy temperatury powietrza. W centrum miasta średnie stężenie Rn-222 w przedziałach różnic pionowych temperatury zmieniało się nieznacznie od 4,6 do 5,6 $Bq \cdot m^{-3}$. Za miastem wzrost średniego stężenia Rn-222 wystąpił dla przedziałów inwersji temperatury powietrza > 0,5°C/1,8 m, z maksimum 8,5 $Bq \cdot m^{-3}$ podczas najsilniejszych inwersji przygruntowych z przedziału > 2,1°C/1,8 m (tab. 5.4).

Tabela 5.4

Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie danych co 1 godz.)

Table 5.4

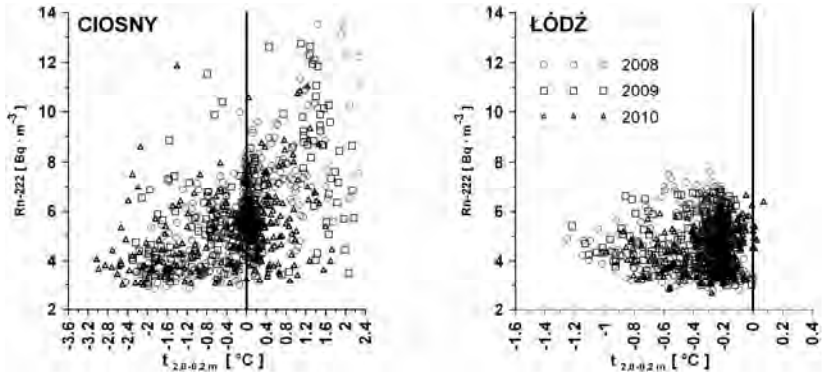
Mean and extreme values of Rn-222 concentration in different ranges of difference of the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (based on data at 1 hr.)

	< –2,1°C*	**–2,0 ÷ –0,6°C**	**–0,5 ÷ 0,0°C**	**0,0 ÷ 0,5°C**	**0,6 ÷ 2,0°C**	**> 2,1°C****
Rn-222 [$Bq \cdot m^{-3}$], Ciosny ; Łódź						
Średnia	5,6 ; 5,2	5,3 ; 4,6	5,2 ; 4,7	5,8 ; 4,7	7,5 ; 4,6	8,5 ; 3,5
Maksymalna	31,0 ; 11,0	35,0 ; 13,0	40,0 ; 15,0	27,0 ; 20,0	38,0 ; 17	32,0 ; 7,0
Minimalna	2,0 ; 2,0	2,0 ; 2,0	2,0 ; 2,0	2,0 ; 2,0	2,0 ; 2.0	2,0 ; 2,0

* 12 przypadków w Łodzi i 1 530 przypadków w Ciosnach;
** 5 przypadków w Łodzi i 1 180 przypadków w Ciosnach

Najmniejsze stężenia Rn-222 rejestrowane przez przyrząd, tj. 2 $Bq \cdot m^{-3}$ występowały w każdym przedziale różnic temperatury powietrza w warstwie 1,8 m, a absolutnie największy poziom stężenia radionuklidu na badanych stacjach nie był rejestrowany w dniach z najsilniejszą inwersją temperatury powietrza. Wartości stężenia > 30 $Bq \cdot m^{-3}$ były obserwowane zarówno w warunkach chwiejnej, jak i stabilnej równowagi termicznej przygruntowej warstwy powietrza.

Zaprezentowane wyniki świadczą o tym, że relacja stężenia Rn-222 w powietrzu i różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nie ma charakteru zależności prostoliniowej. Jednak niewątpliwie warunkiem sprzyjającym wzrostom stężenia radionuklidu w powietrzu jest zjawisko przygruntowej inwersji temperatury powietrza o intensywności > 0,5°C/1,8 m (stan stabilnej pionowej równowagi termicznej atmosfery), czego dowodem są wyniki pomiarów na stacji zamiejskiej.



Rys. 5.16. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (na podstawie średnich przebiegów dobowych - rys. 5.17 i 5.18)

Fig. 5.16. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (based on the average daily courses - Fig. 5.17 and 5.18)

Porównując krzywe dobowego przebiegu stężenia Rn-222 i różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach można stwierdzić quasi-synchroniczną zmienność badanych parametrów (rys. 5.17). Ekstrema dobowe koncentracji radonu występują z opóźnieniem w stosunku do minimum i maksimum różnic temperatury powietrza. Efekt „opóźnienia" jest wyraźnie widoczny na wykresach korelacyjnych badanych zmiennych w miesiącach od kwietnia do października (rys. 5.18). W Łodzi, z uwagi na fakt małej zmienności dobowej różnicy temperatury powietrza w badanej przygruntowej warstwie powietrza, oscylującej w przedziale od –1,0°C do 0,0°C, wyżej opisane zjawisko nie jest obserwowane.

Analiza korelacyjna zilustrowana na rysunkach 5.16 i 5.18 nie wskazuje na istnienie statystycznych zależności między stężeniem Rn-222 a różnicą temperatury powietrza w warstwie 1,8 m na stacji w Łodzi. Średnie stężenie Rn-222 dla wartości różnicy z przedziału < –0,5°C/1,8 m i –0,5–0,0°C/1,8 m jest podobne i wynosi odpowiednio 4,7 $Bq \cdot m^{-3}$ i 4,4 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 5.16). Wartość współczynnika korelacji rang Spearmana dla Łodzi obliczona dla poszczególnych miesięcy przyjmowała bardzo niskie wartości, w większości przypadków poniżej 0,3. Znak współczynnika korelacji dla większości miesięcy był ujemny, co oznaczałoby odwrotną, niezgodną z przewidywaniami teoretycznymi zależność stężenia Rn-222 i pionowej różnicy temperatury powietrza. Nie wykazanie zależności statystycznej na stacji w Łodzi nie oznacza jednak braku istnie-

nia związku między tymi zmiennymi w mieście. Intensywne całodobowe mieszanie powietrza nad miastem, wynikające z nadwyżki ciepła, o czym świadczy dominacja ujemnych pionowych różnic temperatury powietrza, nie stwarza warunków do dużej koncentracji radonu przy gruncie.

Na stacji w Ciosnach statystyczny związek między stężeniem Rn-222 a różnicą temperatury powietrza w warstwie 1,8 m był silniejszy niż w Łodzi. Na wykresie korelacyjnym 5.16 charakterystyczne jest wyraźne zwiększenie średniego stężenia Rn-222 przy dodatnich wartościach różnicy temperatury powietrza > 1°C/1,8 m i zmniejszenie stężenia podczas pionowych różnic temperatury < –1°C/1,8 m. Przeciętne stężenie Rn-222 odpowiadające wymienionym wartościom różnicy temperatury powietrza wynosiło odpowiednio 7,0 $Bq \cdot m^{-3}$ i 4,4 $Bq \cdot m^{-3}$. Współczynnik korelacji rang Spearmana w Ciosnach był we wszystkich analizowanych miesiącach dodatni z wyjątkiem lutego 2010 r. Największe wartości dla tej stacji współczynnik osiągnął w 2008 r., tj. 0,7–0,8 w miesiącach od maja do sierpnia. W pozostałych latach w większości miesięcy wartość współczynnika korelacji jest dość niska (tab. 5.5).

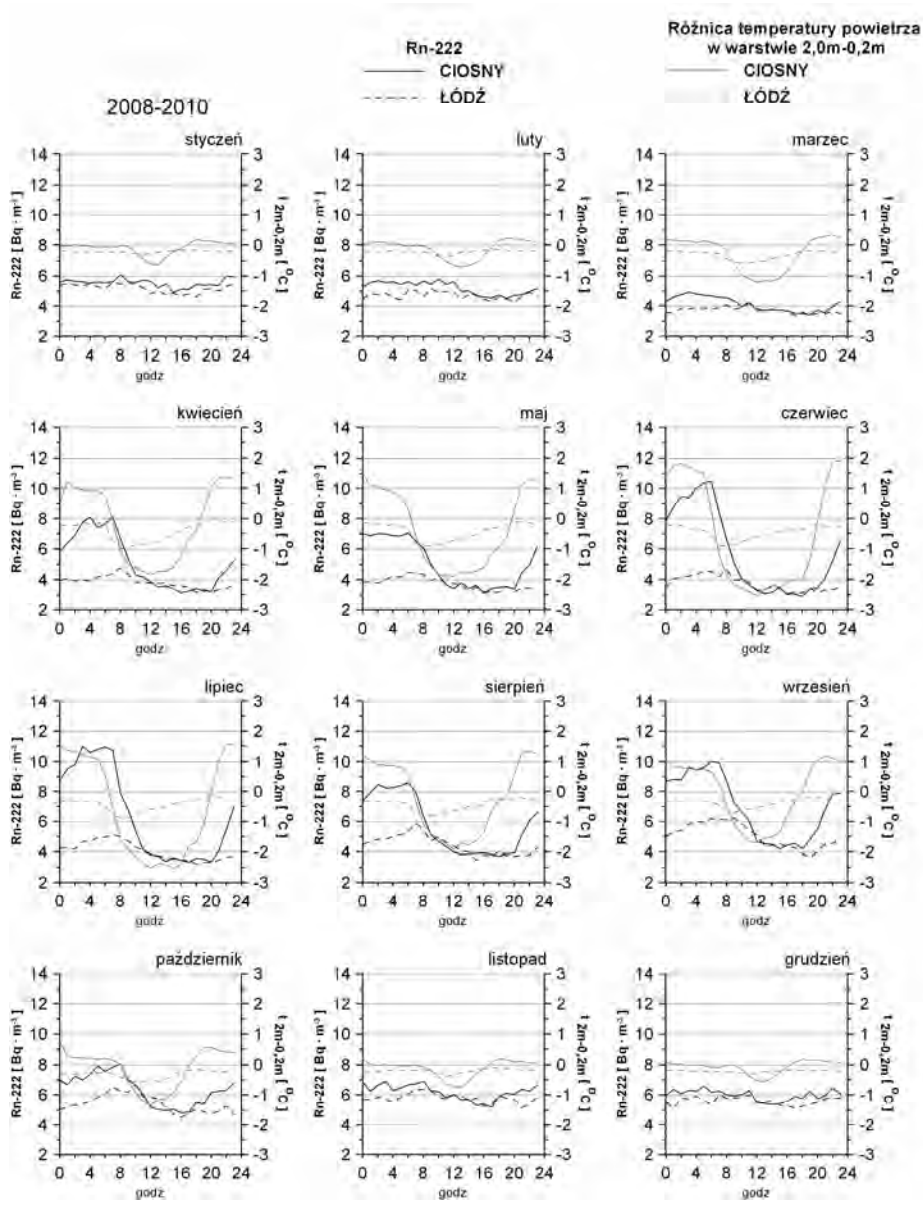
Tabela 5.5

Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s)
dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji różnicy temperatury powietrza
w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach w latach 2008–2010.
Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05

Table 5.5

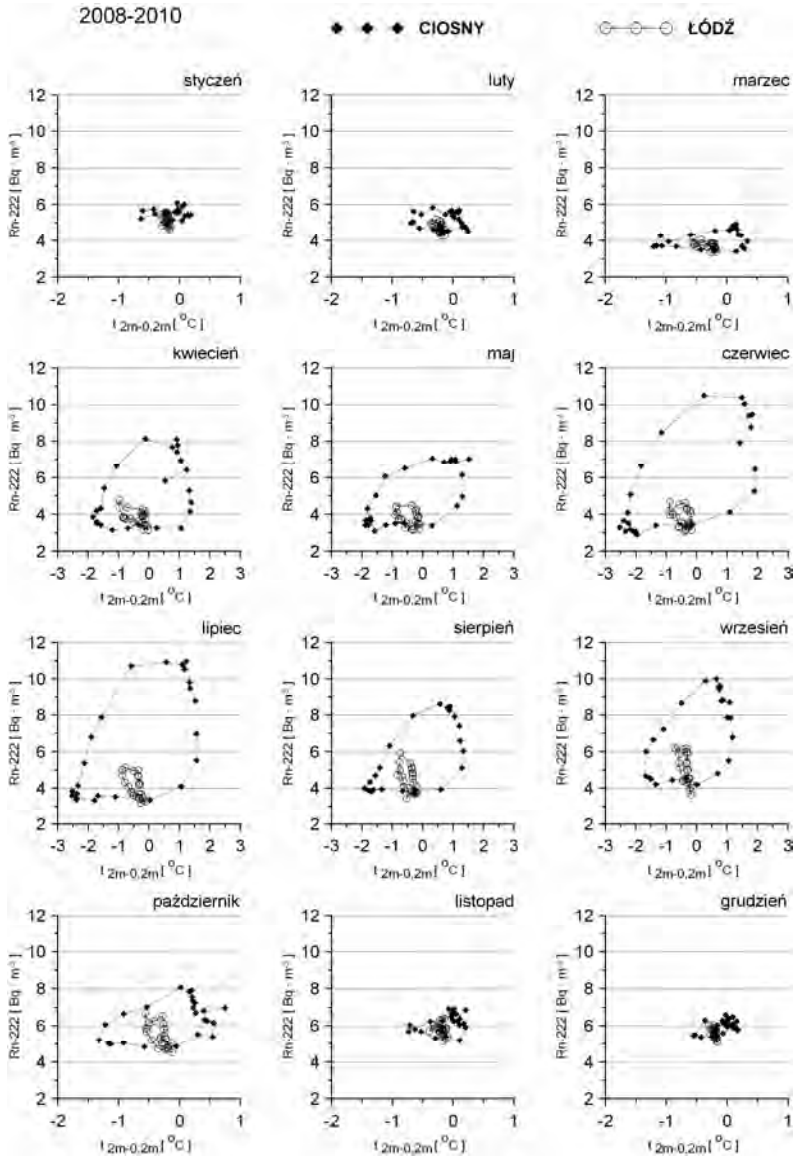
Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s)
for average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature difference
in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny in 2008–2010.
Underline - values statistically significant at 0.05 level

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ciosny 2008												
r_s	0,264	0,189	0,394	0,605	0,666	0,784	0,745	0,776	0,626	0,601	0,534	0,472
Ciosny 2009												
r_s	0,382	0,134	0,444	0,433	0,702	brak	brak	0,472	0,445	0,207	0,316	0,124
Ciosny 2010												
r_s	0,018	–0,294	0,116	0,254	0,494	0,495	0,415	0,573	0,520	0,285	0,240	0,084



Rys. 5.17. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.17. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010



Rys. 5.18. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.17)

Fig. 5.18. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.17)

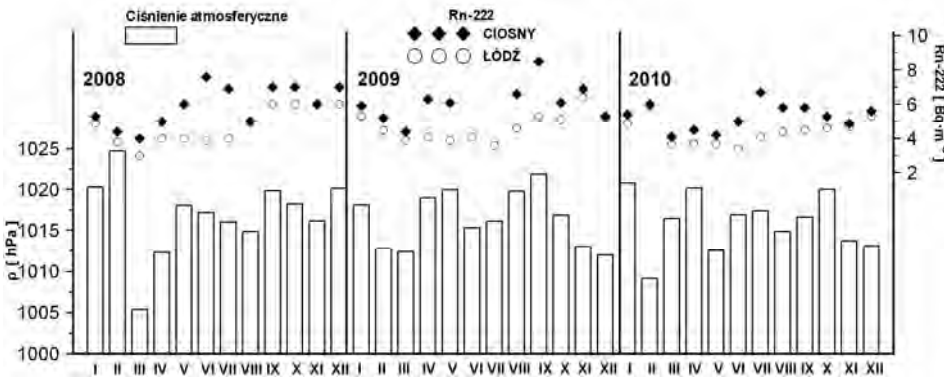
5.2. Zmienność stężenia Rn-222 i ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości wiatru

Ciśnienie atmosferyczne jest najczęściej przedstawiane w literaturze dotyczącej stężenia radonu w środowisku jako czynnik warunkujący szybkość ekshalacji tego gazu z gleby do atmosfery. W publikacjach prezentowane są dwa różne poglądy na ten temat, poparte wynikami badań eksperymentalnych. Według niektórych autorów istnieje odwrotna liniowa zależność między ciśnieniem powietrza a ekshalacją radonu, tj. wzrostowi ciśnienia towarzyszy spadek tempa uwalniania się radonu z gleby do atmosfery (Dueñas i in. 1997, Schery i in. 1984). Inni badacze nie potwierdzają zjawiska zwiększania się ekshalacji radonu wraz ze spadkiem ciśnienia atmosferycznego (Ferry i in. 2001, Mazur 2008). W świetle tych teorii zmiany w natężeniu ekshalacji mogą istotnie wpływać na stężenie radonu w przygruntowej warstwie powietrza.

W niniejszej pracy, w badaniach uwarunkowań meteorologicznych stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza, analizowano wartość ciśnienia atmosferycznego także w powiązaniu z prędkością wiatru, poszukując typu pogody sprzyjającej lub niesprzyjającej koncentracji radonu przy gruncie.

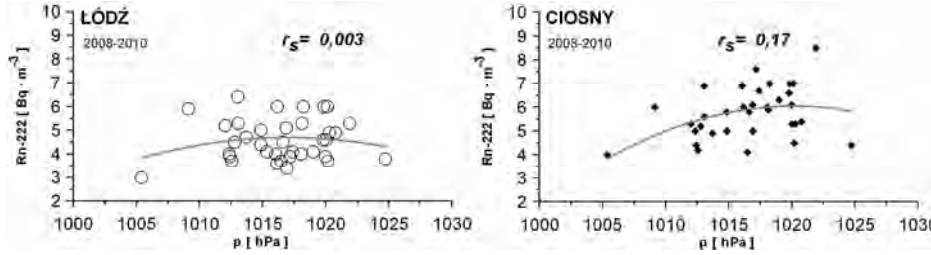
W przebiegu rocznym średniego miesięcznego stężenia Rn-222 na tle wartości ciśnienia atmosferycznego nie obserwuje się wyraźnego związku badanych zmiennych (rys. 5.19). Potwierdza to także wykres korelacyjny wartości miesięcznych stężenia Rn-222 i ciśnienia atmosferycznego, dla których współczynnik korelacji rang Spearmana w Łodzi jest prawie zerowy, a w Ciosnach wynosi 0,2 (rys. 5.20).

Przedstawienie stężenia Rn-222 oraz **prędkości wiatru** w funkcji ciśnienia atmosferycznego na podstawie danych godzinnych pozwala na zaobserwowanie pewnej prawidłowości na obu stacjach. Generalnie przy niskim i wysokim ciśnieniu atmosferycznym uwidacznia się spadek stężenia Rn-222, przy czym ta tendencja jest silniejsza na stacji w Ciosnach. Wartościom ciśnienia powietrza poniżej 1000 hPa odpowiadał wzrost prędkości wiatru, co mogło mieć istotne znaczenie dla spadku aktywności promieniotwórczej radonu. W przypadku ciśnienia powyżej 1030 hPa siła wiatru była wyraźnie mniejsza z wyjątkiem kilku przypadków w Ciosnach w 2008 r. (rys. 5.21, 5.22). W Ciosnach w dniach z najwyższym stężeniem Rn-222, tj. 20–40 $Bq \cdot m^{-3}$, rejestrowano ciśnienie atmosferyczne w przedziale 1005–1038 hPa, przy średniej jego wartości 1021 hPa. Absolutnie najwyższą aktywność promieniotwórczą radonu na stacji zamiejskiej, 40 $Bq \cdot m^{-3}$, odnotowano w dniu z ciśnieniem powietrza 1025 hPa. W dniach z niskim stężeniem Rn-222 < 5 $Bq \cdot m^{-3}$ średnie ciśnienie powietrza na tej stacji wynosiło 1016 hPa i zmieniało się od 992 hPa do 1032 hPa.



Rys. 5.19. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 i ciśnienie atmosferyczne w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2009

Fig. 5.19. Average monthly Rn-222 concentration and atmospheric pressure in Ciosny and Łódź in 2008–2009



Rys. 5.20. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniego miesięcznego ciśnienia atmosferycznego w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Linia - wielomian 2–stopnia; r_s - współczynnik korelacji rang Spearmana

Fig. 5.20. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly atmospheric pressure in Łódź and Ciosny in 2008-2010. Line - 2–degree polynomial, r_s - Spearman's rank correlation coefficient

W Łodzi w dwóch grupach dni, tj. w dniach z maksymalnym stężeniem Rn-222 o wartościach 10–20 Bq·m^{-3} i w dniach ze stężeniem < 5 Bq·m^{-3} notowano tę samą przeciętną wartość ciśnienia 1018 hPa. Zakres zmienności ciśnienia powietrza w pierwszej grupie dni wynosił 996–1040 hPa, a w drugiej 990–1045 hPa. Przeanalizowano średnie największe dobowe stężenie Rn-222 w 6 przedziałach ciśnienia atmosferycznego (tab. 5.6). W Ciosnach i Łodzi największe przeciętne stężenie tego gazu, odpowiednio 12 Bq·m^{-3} i 8 Bq·m^{-3}, było obserwowane podczas ciśnienia atmosferycznego z przedziałów odpowiednio

1020,1–1030 hPa i 1010,1–1020 hPa. Najmniejsze średnie stężenie Rn-222 notowano na stacji zamiejskiej przy najmniejszym ciśnieniu atmosferycznym, tj. 990–1000 hPa. W Łodzi najmniejsze średnie stężenie Rn-222, 6,7 $Bq \cdot m^{-3}$ i 6,8 $Bq \cdot m^{-3}$ rejestrowano podczas największych (> 1040 hPa) i najmniejszych wartości ciśnienia atmosferycznego. Na obu stacjach największy zakres wahań maksimów dobowych stężenia Rn-222 przypadał w dniach z ciśnieniem powietrza 1020,1–1030 hPa (tab. 5.6).

Tabela 5.6

Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach ciśnienia atmosferycznego w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie największych dobowych wartości stężenia radonu)

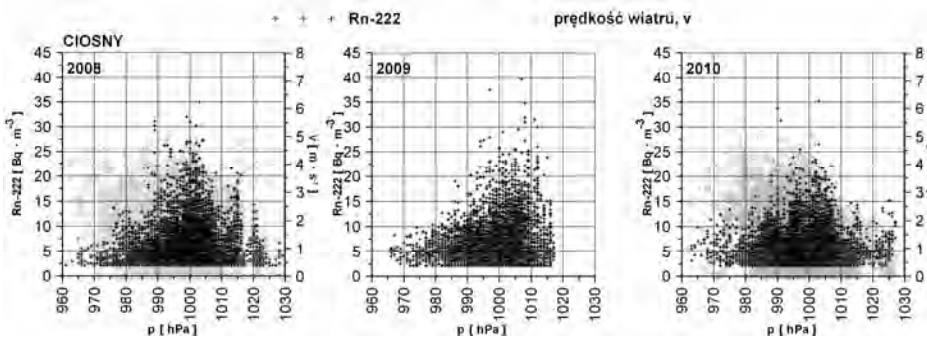
Table 5.6

Mean and extreme values of Rn-222 concentration in different ranges of atmospheric pressure in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (prepared on the basis of daily maximal radon concentration)

	990–1000 hPa	**1000,1–1010 hPa**	**1010,1–1020 hPa**	**1020,1–1030 hPa**	**1030,1–1040 hPa**	**≥ 1040,1 hPa**
Rn-222 [$Bq \cdot m^{-3}$], Ciosny ; Łódź						
Średnia	7,2 ; 6,8	9,6 ; 7,9	11,3 ; 8,1	12,0 ; 7,9	11,3 ; 7,9	10,2 ; 6,7
Maksymalna	12,0 ; 11,0	33,0 ; 15,0	32,0 ; 16,0	40,0 ; 20,0	32,0 ; 17,0	15,0 ; 10,6
Minimalna	4,0 ; 3,0	3,0 ; 3,0	3,0 ; 2,0	3,0 ; 3,0	3,0 ; 3,0	6,0 ; 4,0

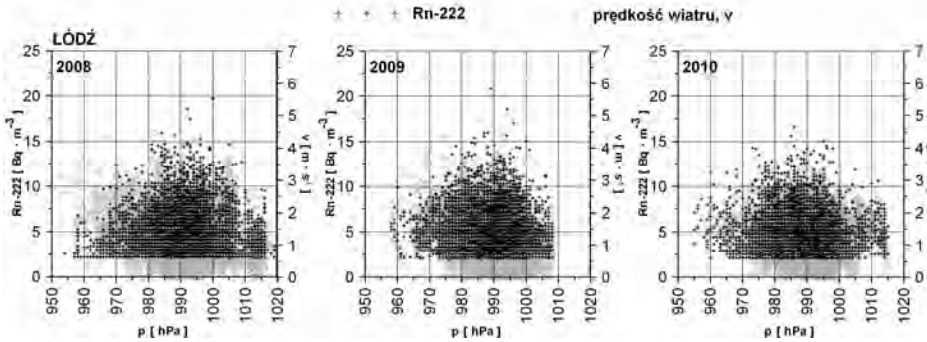
Roczny przebieg maksymalnych dobowych wartości stężenia Rn-222 oraz ciśnienia atmosferycznego i średniej dobowej prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach potwierdza opisywane wyżej tendencje (rys. 5.24 i 5.25). W rocznym przebiegu wymienionych zmiennych można zaobserwować kilkudniowe okresy ze spadkową tendencją ciśnienia i odpowiadający im malejący poziom stężenia Rn-222. Najczęściej ta tendencja występowała w pierwszym i ostatnim kwartale roku, kiedy to synchronicznie rejestrowano największe przeciętne prędkości wiatru w ciągu roku. W miesiącach letnich, które cechują się mniejszą międzydobową zmiennością ciśnienia i prędkości wiatru można zaobserwować wzrost stężenia Rn-222 w Ciosnach, czego nie obserwuje się w centrum miasta. Druga opisywana tendencja, tj. zmniejszanie się stężenia Rn-222 podczas wzrostu ciśnienia atmosferycznego, jaką prezentują wykresy korelacyjne 5.21 i 5.22 oraz wartości w tabeli 5.6, jest bardzo wyraźna na obu stacjach np. w styczniu i grudniu 2008 r. (rys. 5.24 i 5.25). Takich spektakularnych okresów zmniejszania stężenia Rn-222 przy silnej tendencji wzrostowej ciśnienia atmos-

ferycznego jest niewiele w porównaniu z okresami zmniejszania ciśnienia atmosferycznego z towarzyszącym zmniejszaniem się stężenia tego radionuklidu.



Rys. 5.21. Stężenie Rn-222 i prędkość wiatru w funkcji ciśnienia atmosferycznego w Ciosnach w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.). W 2009 r. brak danych o prędkości wiatru w Ciosnach

Fig. 5.21. Rn-222 concentration and wind speed as a function of atmospheric pressure in Ciosny in 2008–2010 (data at 1 hr.). In 2009, the lack of data on wind speed in Ciosny

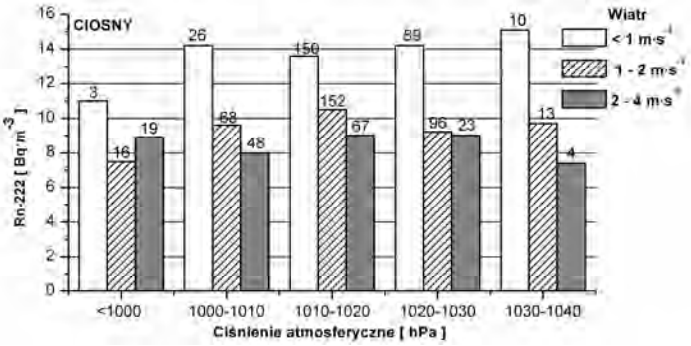


Rys. 5.22. Stężenie Rn-222 i prędkość wiatru w funkcji ciśnienia atmosferycznego w Łodzi w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.)

Fig. 5.22. Rn-222 concentration and wind speed as a function of atmospheric pressure in Łódź in 2008–2010 (data at 1 hr.)

W celu zbadania, który z elementów meteorologicznych, tj. ciśnienie atmosferyczne czy prędkość wiatru ma większy wpływ na stężenie Rn-222 w powietrzu dokonano podziału wartości ciśnienia na 5 przedziałów, dla których obliczono średnie maksymalne dobowe stężenia Rn-222 w 3 zakresach średniej dobowej prędkości wiatru (rys. 5.23). Każdy zakres ciśnienia atmosfe-

rycznego cechował się bardzo podobnymi stężeniami Rn-222, zaś istotne zróżnicowanie poziomu stężenia Rn-222 występowało dla wydzielonych zakresów prędkości wiatru przy danej wartości ciśnienia powietrza. Dla każdego przedziału ciśnienia największe stężenie Rn-222 było rejestrowane podczas prędkości wiatru < 1 $m \cdot s^{-1}$, a średnie wartości stężenia Rn-222 nie różniły się istotnie między przedziałami ciśnienia (rys. 5.23). Otrzymane rezultaty świadczą o nadrzędnej roli ruchu powietrza dla stężenia Rn-222 w stosunku do wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego. Analizę przeprowadzono tylko dla stacji zamiejskiej z uwagi na większy zakres wahań maksymalnych dobowych wartości stężenia Rn-222.



Rys. 5.23. Średnie najwyższe dobowe stężenie Rn-222 w przedziałach średniej dobowej prędkości wiatru w poszczególnych przedziałach średniego dobowego ciśnienia atmosferycznego w Ciosnach w latach 2008–2010. Liczby na wykresie oznaczają liczbę przypadków

Fig. 5.23. Average maximal daily Rn-222 concentration in intervals of average daily wind speed in each interval of average daily atmospheric pressure in Ciosny in 2008–2010. The numbers on the graph indicate the number of cases

Analiza średnich miesięcznych wartości stężenia Rn-222 w funkcji średnich miesięcznych prędkości wiatru dla stacji w Łodzi nie potwierdziła istnienia statystycznych zależności między zmiennymi (współczynnik korelacji r_s = 0,03, rys. 5.26). Rezultaty otrzymane dla stacji zamiejskiej pokazały brak związku korelacyjnego, tj. wzrost stężenia Rn-222 przy malejącej prędkości wiatru (r_s = –0,16, rys. 5.26). Silniejszy związek stężenia Rn-222 z prędkością wiatru wykazała analiza przeprowadzona na podstawie danych godzinnych. Na obu stacjach ujawnia się odwrotna zależność między stężeniem Rn-222 a prędkością wiatru, silniejsza na stacji w Ciosnach (rys. 5.27 i 5.28, tab. 5.6). Otrzymane wyniki pokazały, że na stacji zamiejskiej notowano większe prędkości wiatru i większy udział cisz niż w centrum Łodzi. Okresy bezwietrzne za miastem wyraźnie sprzyjały znacznej koncentracji radionuklidu przy gruncie,

kiedy to maksima dobowe stężenia Rn-222 prawie dwukrotnie przewyższały wartości ekstremalne stężenia tego radionuklidu w mieście. W 2008 r. i 2010 r. cisze w Ciosnach stanowiły odpowiednio 22% i 10% przypadków, podczas gdy w Łodzi sytuacje bezwietrzne wystąpiły tylko w 1% przypadków w 2008 r., w 2% w 2009 r., a w 2010 r. nie wystąpiły wcale (rys. 5.27 i 5.28). Główne przyczyny mniejszej frekwencji sytuacji bezwietrznych w mieście w stosunku do stacji w Ciosnach to intensywniejsza turbulencja dynamiczna w wyniku większej szorstkości podłoża oraz intensywniejsza turbulencja termiczna - przejaw nadwyżki ciepła na obszarach zurbanizowanych.

W tabeli 5.7 przedstawiono średnią oraz zakres wahań największych dobowych wartości stężenia Rn-222 w pięciu przedziałach średnich dobowych prędkości wiatru. Prezentowane wyniki potwierdzają generalną prawidłowość - największe stężenia Rn-222 w ciągu doby na obu stacjach były rejestrowane w dniach ze średnią prędkością wiatru poniżej 1 $m \cdot s^{-1}$. Największy zakres wahań dobowych maksimów stężenia Rn-222 przypadał w przedziale średnich prędkości wiatru 0,6–1,0 $m \cdot s^{-1}$ i zakres ten malał wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Wartości maksymalne stężenia Rn-222 > 30 $Bq \cdot m^{-3}$ były jednak obserwowane nawet w dniach ze średnią dobową prędkością wiatru z przedziału 2–3 $m \cdot s^{-1}$.

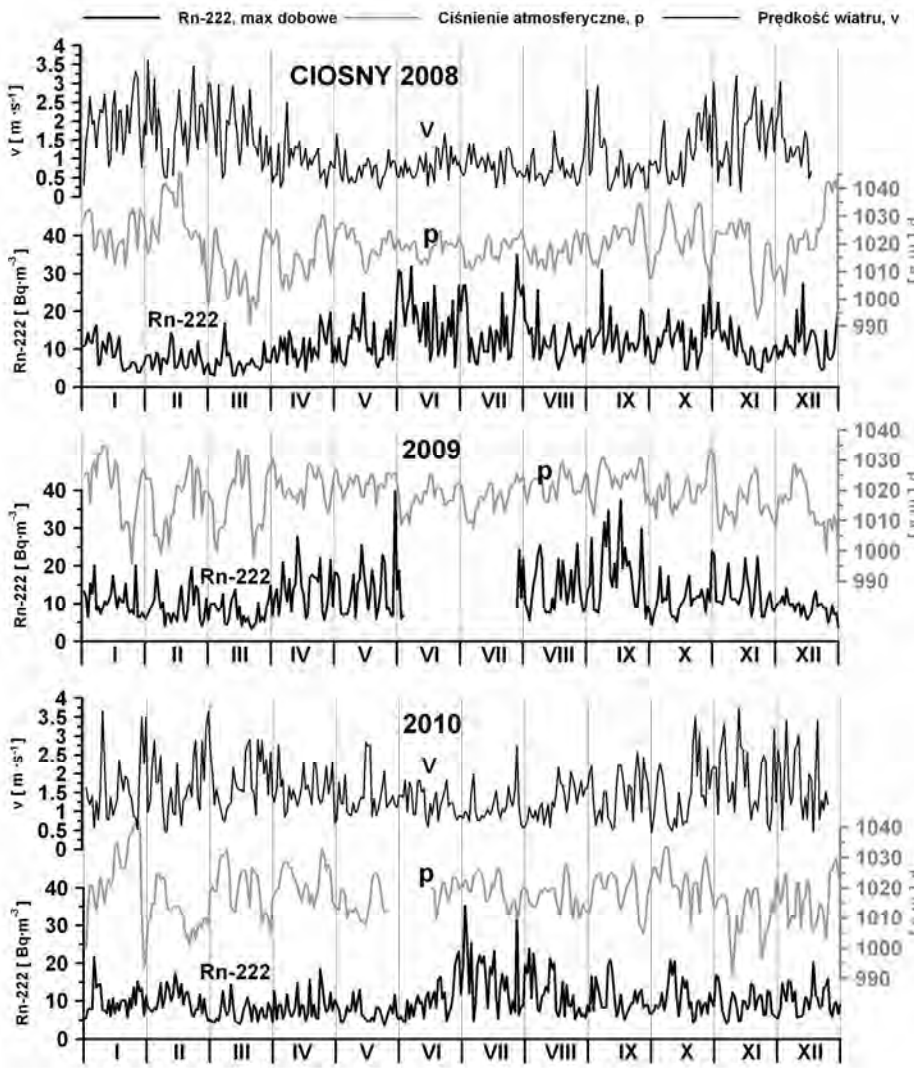
Tabela 5.7

Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach średniej dobowej prędkości wiatru w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie najwiekszych dobowych wartości stężenia radonu)

Table 5.7

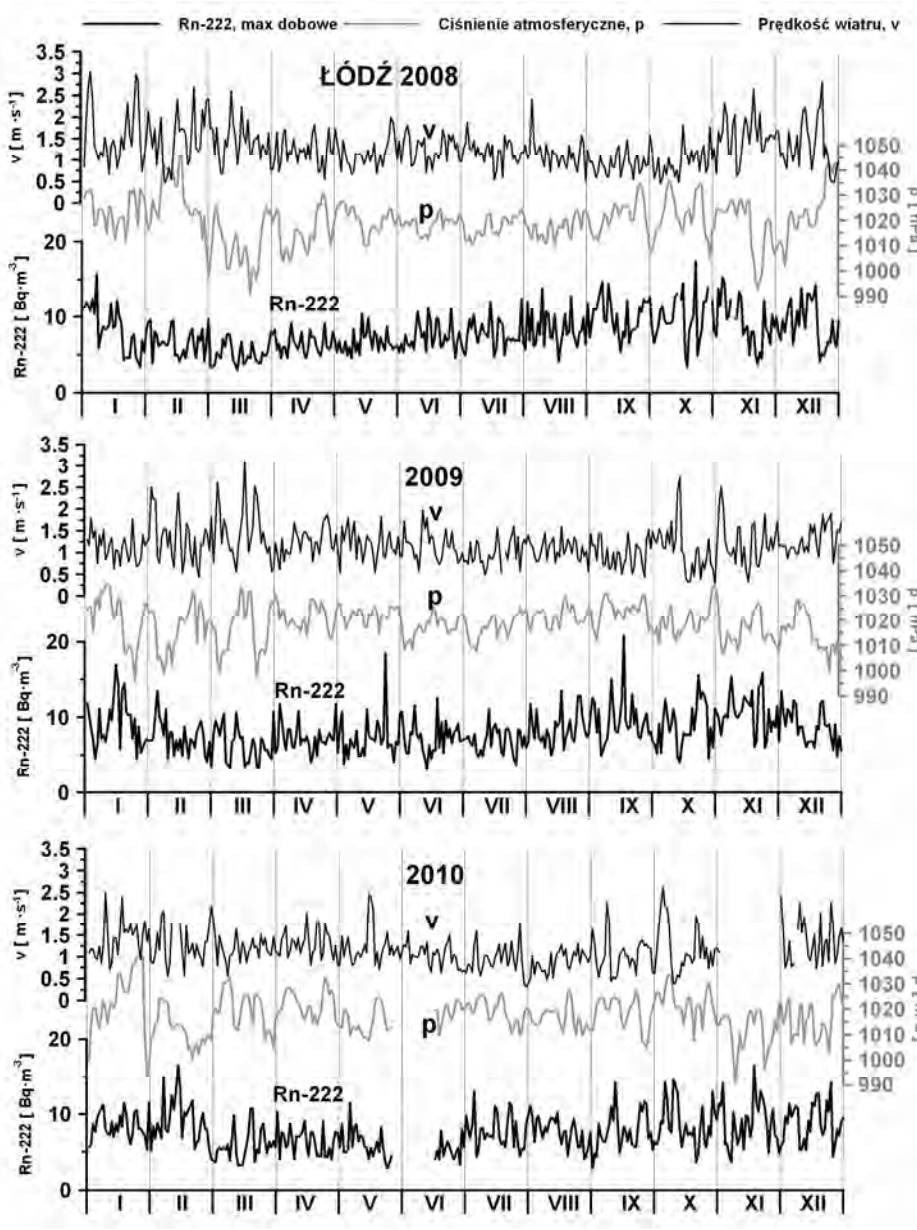
Mean and extreme Rn-222 concentration in different ranges of average daily wind speed in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (prepared on the basis of maximal daily radon concentration)

	0,0–0,5 $m \cdot s^{-1}$	**0,6–1,0 $m \cdot s^{-1}$**	**1,1–2,0 $m \cdot s^{-1}$**	**2,1–3,0 $m \cdot s^{-1}$**	**3,1–4,0 $m \cdot s^{-1}$**
Rn-222 [$Bq \cdot m^{-3}$], Ciosny ; Łódź					
Średnia	13,4 ; 10,2	13,3 ; 8,2	9,5 ; 7,7	8,8 ; 7,6	7,4 ; -
Maksymalna	27,0 ; 18,0	35,0 ; 20,0	31,0 ; 19,0	34,0 ; 14,0	13,0 ; -
Minimalna	6,0 ; 5,0	5,0 ; 3,0	3,0 ; 3,0	3,0 ; 3,0	3,0 ; -



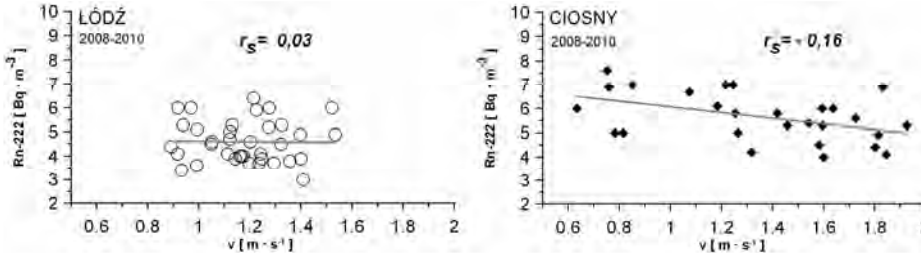
Rys. 5.24. Maksymalne dobowe stężenie Rn-222 i ciśnienie atmosferyczne oraz średnia dobowa prędkość wiatru w Ciosnach w latach 2008–2010

Fig. 5.24. Maximum daily Rn-222 concentration and atmospheric pressure and average daily wind speed in Ciosny in 2008–2010



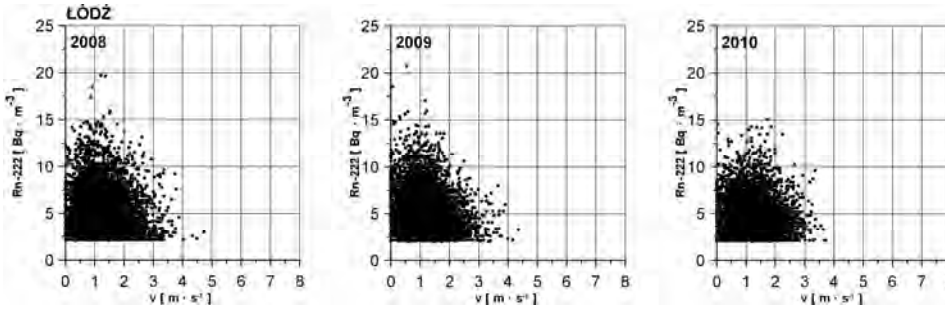
Rys. 5.25. Maksymalne dobowe stężenie Rn-222 i ciśnienie atmosferyczne oraz średnia dobowa prędkość wiatru w Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.25. Maximum daily Rn-222 concentration and atmospheric pressure and average daily wind speed in Łódź in 2008–2010



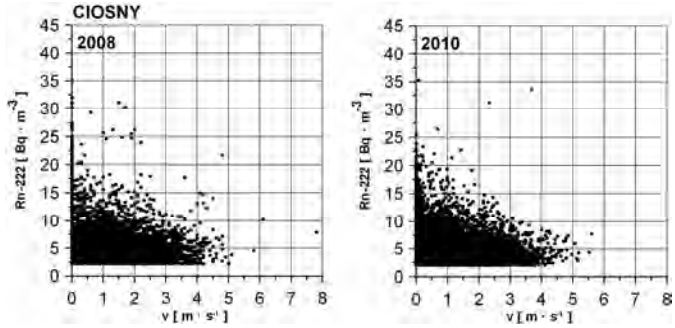
Rys. 5.26. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniej miesięcznej prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Współczynnik korelacji rang Spearmana - r_s

Fig. 5.26. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly wind speed in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Spearman's rank correlation coefficient - r_s



Rys. 5.27. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji prędkości wiatru w Łodzi w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.)

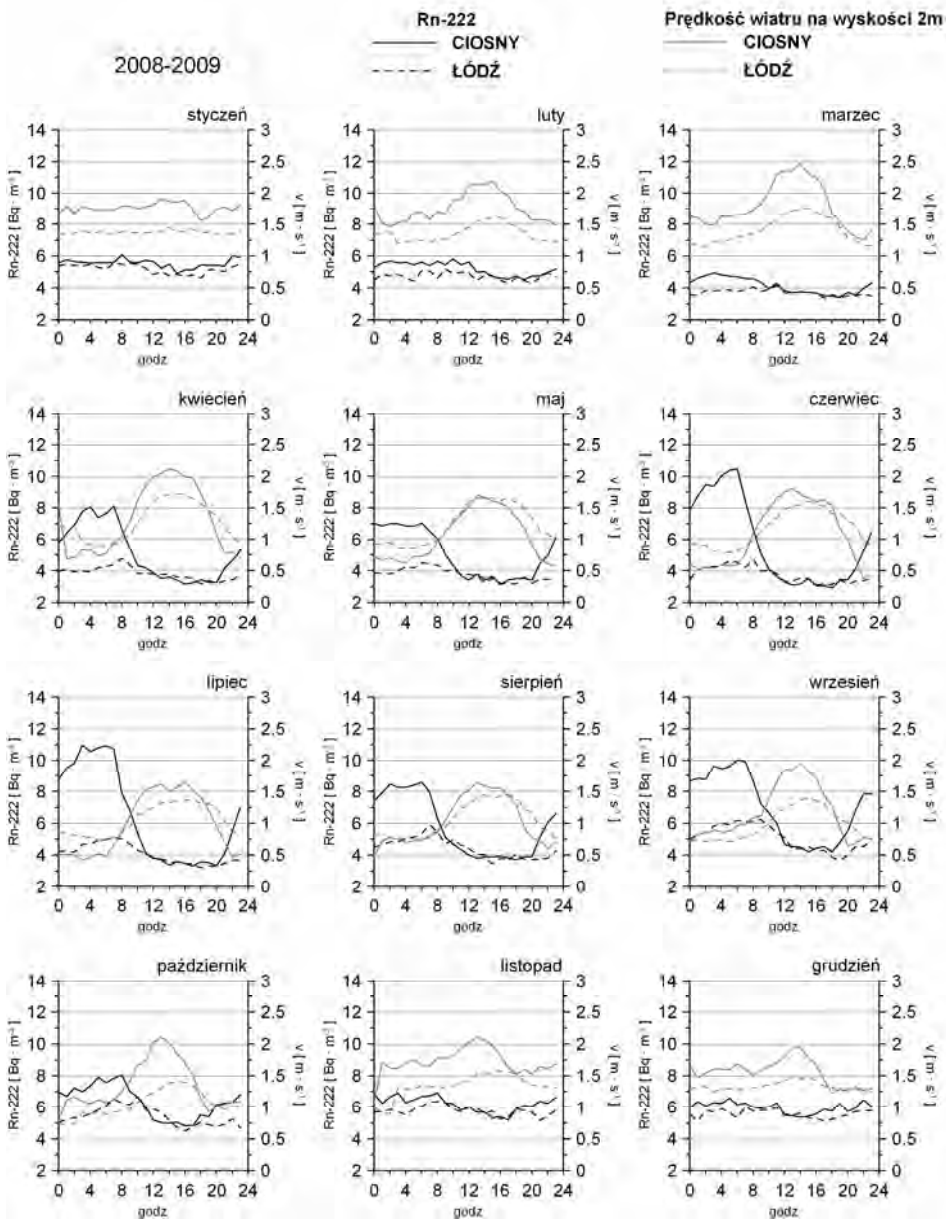
Fig. 5.27. Average Rn-222 concentration as a function of wind speed in Łódź in 2008–2010 (data every 1 hr.)



Rys. 5.28. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji prędkości wiatru w Ciosnach w latach 2008 i 2010 (dane co 1 godz.)

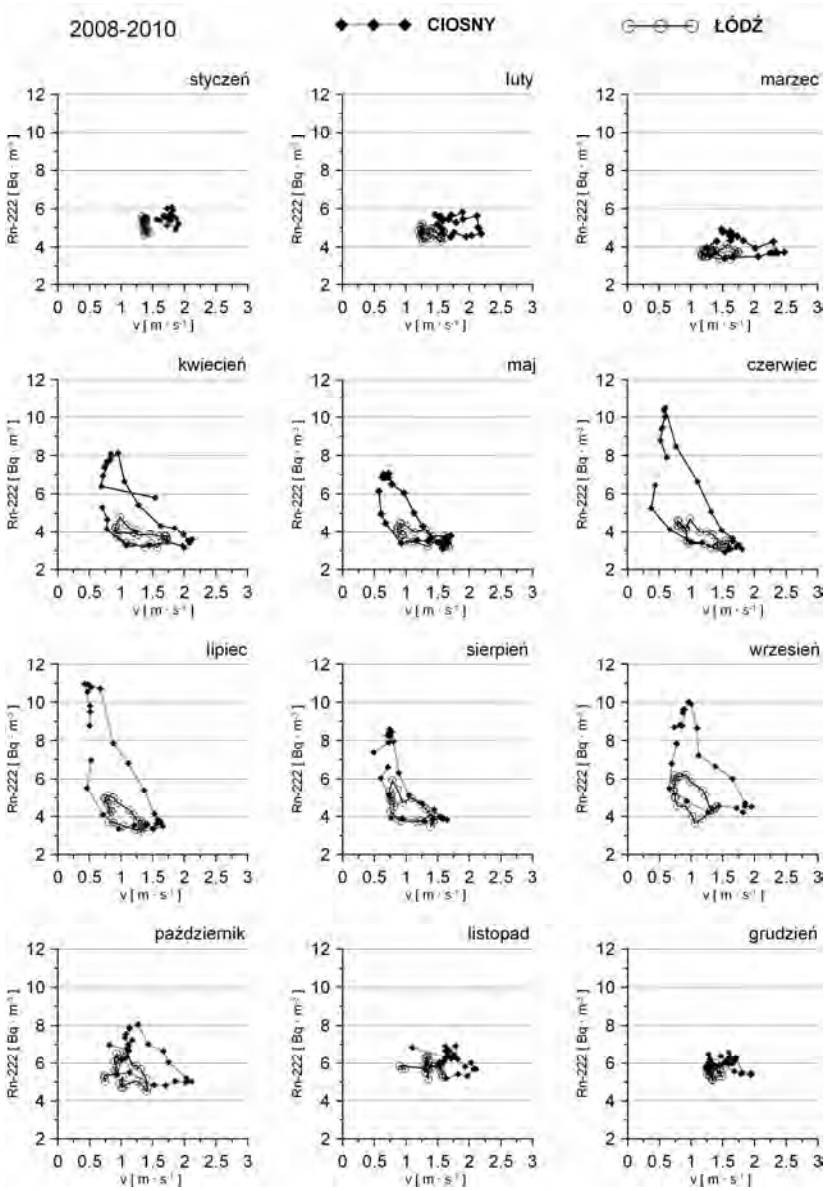
Fig. 5.28. Average Rn-222 concentration as a function of wind speed in Ciosny in 2008 and 2010 (data every 1 hr.)

Związek stężenia Rn-222 z prędkością wiatru na obu stacjach dobrze ilustrują krzywe dobowego przebiegu badanych elementów w poszczególnych miesiącach (rys. 5.29). Wyraźny cykl dobowy wiatru z minimum w godzinach nocnych (od ok. północy do wschodu Słońca) i maksimum we wczesnych godzinach popołudniowych charakteryzuje miesiące od marca do października. W pozostałych miesiącach zmienność dobowa wiatru wyraźnie zmniejsza się, a w styczniu i grudniu prawie zanika w związku ze zwiększaniem się prędkości wiatru ogólnej cyrkulacji atmosferycznej związanej z aktywnością o tej porze roku układów niskiego ciśnienia z frontami atmosferycznymi. W okresie od października do marca prędkość wiatru na stacji zamiejskiej jest większa niż w centrum Łodzi, a w miesiącach od kwietnia do września można zaobserwować zjawisko zwiększania prędkości przepływu powietrza w godzinach nocnych na obszarze miasta (rys. 5.29). W ciepłej porze roku, w ciągu dnia, generalnie notuje się większą prędkość wiatru za miastem. Na tle przedstawionych warunków anemometrycznych w cyklu dobowym stężenie Rn-222 cechuje się przeciwną zmiennością – zmniejszaniu się prędkości wiatru w godzinach nocnych odpowiada zwiększanie stężenia Rn-222. Intensywnemu przepływowi powietrza w ciągu dnia towarzyszy niska wartość stężenia tego radionuklidu. Różnice warunków anemometrycznych między stacją miejską i zamiejską mogą mieć wpływ na różnice w dobowej zmienności stężenia Rn-222 rejestrowanego na badanych stacjach. Największe ujemne różnice koncentracji Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach przypadają w czerwcu i lipcu w godzinach nocnych, kiedy to o tej porze doby następuje wzrost prędkości przepływu powietrza w mieście w stosunku do obszarów zamiejskich (rys. 5.29). Małe wartości stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza na obu stacjach występują w ciągu dnia przeciętnie od godz. ok. 11.00 do ok. 20.00 Opisywane relacje prezentują także wykresy korelacyjne stężenia Rn-222 i prędkości wiatru opracowane dla średnich przebiegów dobowych (rys. 5.30) oraz wartości współczynnika rang Spearmana dla poszczególnych miesięcy (tab. 5.8). W I kwartale roku brak istotnych statystycznych zależności badanych zmiennych, a dodatni lub ujemny znak współczynnika korelacji świadczy o małej wiarygodności uzyskanych wyników dla tych miesięcy. Podobnie małą siłą statystycznego związku cechują się miesiące IV kwartału roku. Od kwietnia do września współczynnik korelacji na obu badanych stacjach przyjmuje większe wartości w stosunku do pozostałych miesięcy i jest zawsze ujemny, co świadczy o odwrotnej zależności analizowanych zmiennych. W tym okresie silniejsza korelacja badanych zmiennych występuje na stacji zamiejskiej (tab. 5.8). Na wykresach korelacyjnych, podobnie jak w przypadku związku stężenia Rn-222 z temperaturą powietrza, w niektórych miesiącach (np. kwiecień, maj,



Rys. 5.29. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle prędkości wiatru 2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.29. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of wind speed of 2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010



Rys. 5.30. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji prędkości wiatru 2 m nad gruntem w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.29)

Fig. 5.30. Average Rn-222 concentration as a function of wind speed of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in the years 2008–2010 (dependence of average daily cource - Fig. 5.29)

czerwiec, lipiec) dane układają się w postaci pętli, co ilustruje zjawisko przesunięcia czasowego ekstremów dobowych badanych zmiennych (rys. 5.30).

Tabela 5.8

Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05

Table 5.8

Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for hourly average Rn-222 concentrations as a function of wind speed in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łódź 2008												
r_s	0,419	-0,334	0,153	-0,300	-0,447	-0,438	-0,440	-0,331	-0,441	0,034	-0,246	-0,425
Ciosny 2008												
r_s	-0,056	-0,114	-0,203	-0,613	-0,593	-0,634	-0,611	-0,576	-0,440	-0,456	-0,466	-0,054
Łódź 2009												
r_s	-0,360	-0,009	0,114	-0,577	-0,640	-0,647	-0,677	-0,600	-0,541	-0,188	0,129	0,055
Ciosny 2009												
r_s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,401	-0,354	-0,410
Łódź 2010												
r_s	0,594	0,413	0,224	-0,119	-0,08	-0,200	-0,210	-0,305	-0,083	-0,287	-	-0,022
Ciosny 2010												
r_s	0,144	0,230	0,117	-0,548	-0,277	-0,385	-0,421	-0,412	-0,247	-0,424	0,148	-0,206

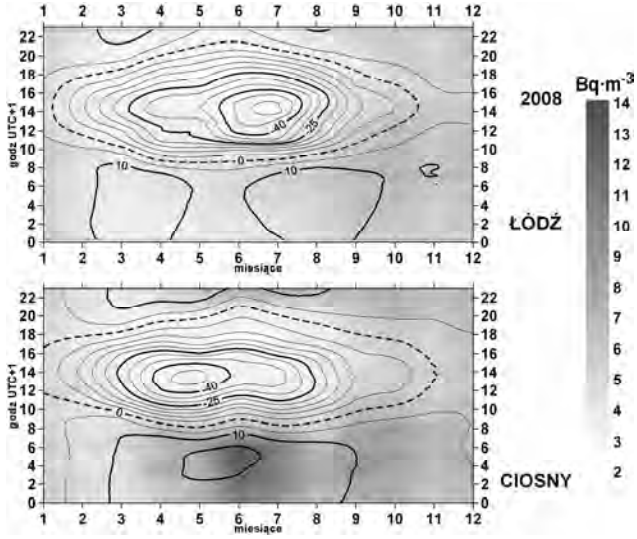
5.3. Zmienność stężenia Rn-222 i strumienia ciepła glebowego oraz wilgotności gleby

Strumień ciepła glebowego (*QG*, w Wm^{-2}) jest istotną składową bilansu cieplnego powierzchni czynnej, obok bilansu promieniowania (sumy składników, takich jak: krótkofalowe promieniowanie słoneczne docierające i odbite od powierzchni ziemi, długofalowe promieniowanie zwrotne atmosfery i promieniowanie własne Ziemi) oraz pionowych strumieni ciepła jawnego i utajonego. Ciepło glebowe *QG* pełni ważną rolę dla procesu wychładzania lub nagrzewania powierzchni gruntu, szczególnie w miesiącach zimowych (niskie wartości natężenia promieniowania słonecznego), wpływając na warunki termiczne panujące w przygruntowej warstwie powietrza. Czasowa zmienność

wartości strumienia ciepła glebowego zależy od różnic temperatury w profilu pionowym gleby oraz od współczynnika przewodnictwa cieplnego gleby wynikającego z cech fizycznych gruntu, m.in. stopnia uwilgotnienia, porowatości (Kędziora 1999). Wartości dodatnie *QG* oznaczają transport ciepła z głębszych warstw do powierzchni gruntu (strumień przychodowy), a wartości ujemne *QG* wskazują na transport ciepła od powierzchni czynnej w głąb gruntu (strumień rozchodowy), a o kierunku przepływu decyduje profil pionowy temperatury powietrza. Wertykalny rozkład temperatury w podłożu jest ważnym czynnikiem determinującym migrację radonu w profilu pionowym gruntu. Szybkość migracji radonu w glebie ku powierzchni ziemi i natężenie ekshalacji wzrastają wraz ze wzrostem różnicy temperatury między warstwami gleby - wyższa temperatura w glebie, a niższa w warstwie przypowierzchniowej, sprzyja przepływowi gazów do atmosfery (Janik 2005, Mazur 2008). Strumień ciepła glebowego jest proporcjonalny do gradientu temperatury w profilu glebowym, a jego dodatnie wartości teoretycznie odpowiadają okresowi intensyfikacji transportu Rn-222 ku powierzchni ziemi. Wartości *QG* informują także o intensywności wychładzania czy nagrzewania powierzchni gruntu, pośrednio wskazując na warunki termiczne panujące w przypowierzchniowej warstwie powietrza. Warunki termiczne wpływają na intensywność procesu dyfuzji turbulencyjnej mającej kluczowe znaczenie dla koncentracji Rn-222 w przypowierzchniowej warstwie gleby oraz powietrza. Wychładzaniu powierzchni czynnej (dodatnia faza przebiegu dobowego *QG*) towarzyszy często zjawisko inwersji temperatury przy gruncie, prowadzącej do zaniku ruchów turbulencyjnych i sprzyjającej wzrostom stężenia Rn-222. To były główne przesłanki do poszukiwania związku *QG* ze stężeniem Rn-222 rejestrowanym w przypowierzchniowej warstwie powietrza. Jak dotąd ten wątek badawczy nie był omawiany w literaturze zagranicznej oraz krajowej, dotyczącej uwarunkowań tego radionuklidu w powietrzu. Należy podkreślić, że przepływ radonu w glebie, jak i ekshalacja, są procesami bardzo złożonymi, uwarunkowanymi wieloma czynnikami (właściwości petrofizyczne gleby, parametry meteorologiczne itd.), podobnie jak stężenie Rn-222 w powietrzu, zatem w badaniach wymienionej zależności zachowano dużą ostrożność interpretacyjną.

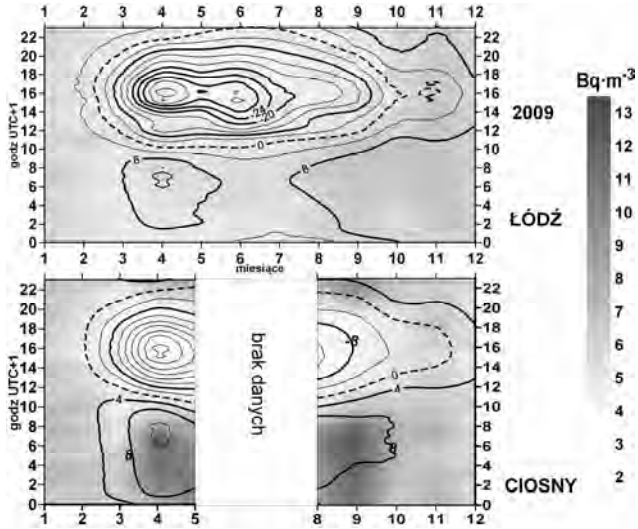
Pomiary strumienia ciepła glebowego na stacjach meteorologicznych w Łodzi były prowadzone od 2000 r. w ramach badań nad bilansem cieplnym miasta (Pawlak 2001, Fortuniak 2003, Fortuniak 2010). Od 2008 r. strumień ciepła gruntowego jest mierzony synchronicznie do stężenia Rn-222 i innych elementów meteorologicznych na stacjach w Łodzi i Ciosnach.

W centrum Łodzi w przebiegu rocznym średnie godzinne wartości *QG* w latach 2008–2010 zmieniały się od –35,8 W·m^{-2} w czerwcu (godz. 15.00) do 12,0 W·m^{-2} w kwietniu (godz. 6.00). W Ciosnach największe średnie dodatnie wartości *QG* były notowane w czerwcu o godz. 5.00, 11,6 W·m^{-2}, a najniższe –27,0 W·m^{-2} w kwietniu o godz. 15.00 (rys. 5.31–5.34). W miesiącach od listopada do lutego przez całą dobę średni strumień *QG* przyjmuje niewielkie dodatnie wartości (rzędu kilku W·m^{-2}), co świadczy o wyższej temperaturze gleby niż powierzchni gruntu i powietrza. Wymienione miesiące charakteryzują się najmniejszym zakresem zmienności dobowej *QG*, podobnie jak stężenie Rn-222. W przypadku wystąpienia zwartej pokrywy śnieżnej, jak to miało miejsce w styczniu i grudniu 2010 r., strumień ciepła glebowego nie zmieniał się w ciągu doby, utrzymując się średnio na poziomie ok. 4 W·m^{-2} w Ciosnach oraz ok. 6 W·m^{-2} (styczeń) i ok. 8 W·m^{-2} (grudzień) w Łodzi.



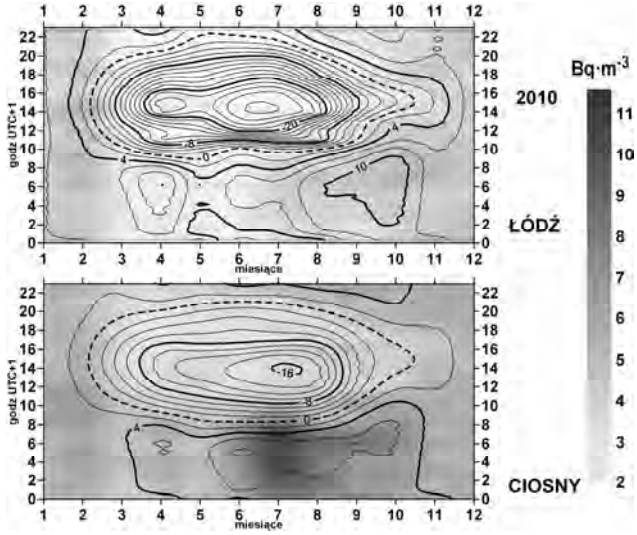
Rys. 5.31. Średnie godzinne stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego (izolinie, Wm^{-2}) w Łodzi i Ciosnach w 2008 r.

Fig. 5.31. Average hourly Rn-222 concentration and soil heat flux (isolines, Wm^{-2}) in Łódź and Ciosny in 2008



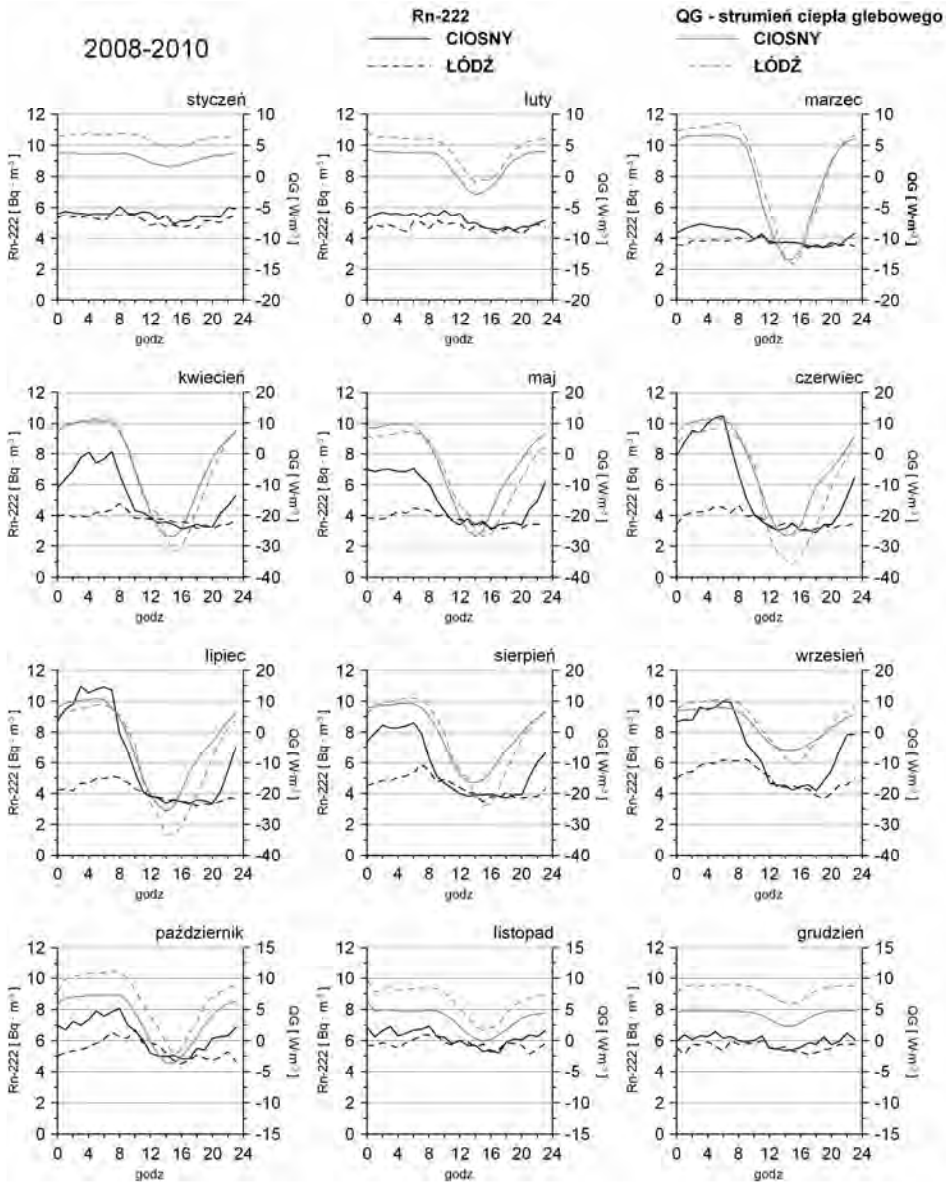
Rys. 5.32. Średnie godzinne stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego (izolinie, Wm^{-2}) w Łodzi i Ciosnach w 2009 r.

Fig. 5.32. Average hourly Rn-222 concentration and soil heat flux (isolines, Wm^{-2}) in Łódź and Ciosny in 2009



Rys. 5.33. Średnie godzinne stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego (izolinie, Wm^{-2}) w Łodzi i Ciosnach w 2010 r.

Fig. 5.33. Average hourly Rn-222 concentration and soil heat flux (isolines, Wm^{-2}) in Łódź and Ciosny in 2010

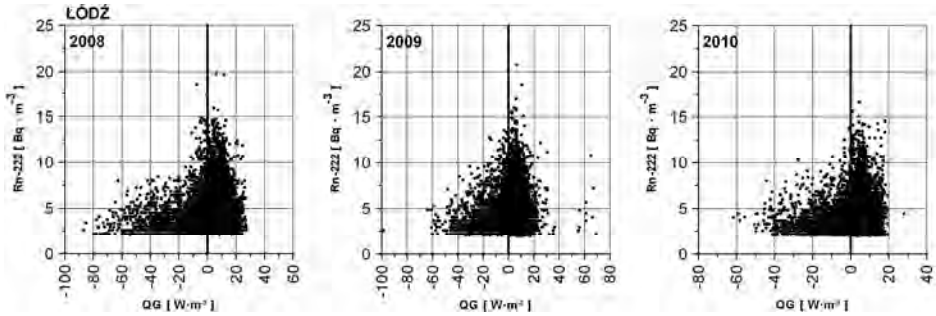


Rys. 5.34. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.34. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of soil heat flux (*QG*) in Łódź and Ciosny in 2008–2010

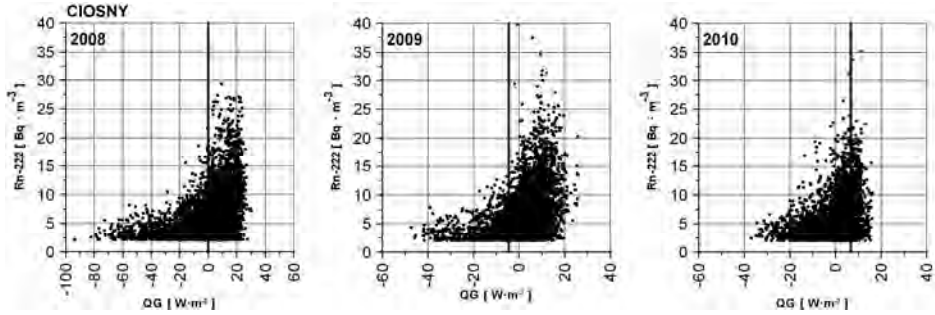
Rozchodowy, ujemny strumień ciepła (transport ciepła w głąb gleby) pojawia się średnio od marca i zanika w październiku. W przebiegu dobowym ujemne wartości są rejestrowane od godz. przedpołudniowych do godz. wieczornych, z maksimum rocznym w miesiącach letnich. Największy średni godzinny rozchodowy i przychodowy strumień ciepła glebowego w Łodzi i Ciosnach zarejestrowano w 2008 r., odpowiednio –52,3 $W \cdot m^{-2}$ i –46,5 $W \cdot m^{-2}$ oraz 14,7 $W \cdot m^{-2}$ i 15,5 $W \cdot m^{-2}$. Najmniejsze średnie godzinne wartości ujemnego i dodatniego *QG* wystąpiły na analizowanych stacjach w 2010 r., tj. odpowiednio –27,8 Wm^{-2} i –16,2 $W \cdot m^{-2}$ oraz 11,7 $W \cdot m^{-2}$ i 8,6 $W \cdot m^{-2}$ (rys. 5.31–5.34). Absolutnie największe wartości strumienia rozchodowego nie przekroczyły w Łodzi i Ciosnach –100 $W \cdot m^{-2}$, a przychodowego odpowiednio 60 $W \cdot m^{-2}$ i 30 $W \cdot m^{-2}$ (rys. 5.31–5.34).

Generalnie występowanie ujemnych wartości *QG* w biegu dobowym pokrywa się z okresem intensywnej turbulencji termicznej powietrza w mieście i za miastem, wynoszącej Rn-222 do wyższych warstw atmosfery, co w konsekwencji daje niewielkie stężenie tego gazu przy gruncie. W okresie dodatnich wartości *QG* obserwuje się zanik ruchów powietrza i występowanie nocnej inwersji temperatury powietrza, co sprzyja koncentracji Rn-222 przy gruncie. Przebieg dobowy *QG* w poszczególnych miesiącach na tle przebiegu stężenia Rn-222 można określić jako quasisynchroniczny. Ujemnym wartościom *QG*, pojawiającym się latem w godz. od ok. godz. 10.00 do. ok. 20.00–21.00, odpowiada spadek stężenia Rn-222 (rys. 5.34). Charakterystyczną cechą przebiegu stężenia Rn-222 w porze dziennej (od ok. godz. 12.00 do 20.00), odbiegającą od charakteru zmienności *QG*, jest utrzymywanie się prawie na stałym poziomie na obu stacjach niskich wartości stężenia Rn-222, tj. 2–4 $Bq \cdot m^{-3}$. Wyraźny wzrost stężenia Rn-222 w przebiegu dobowym obserwowany był dopiero po zmianie kierunku *QG* w stronę powierzchni ziemi, tj. po godz. 20.00. Na stacji zamiejskiej Ciosny, wcześniej niż w Łodzi, pojawiają się dodatnie wartości *QG*. To wynika z szybszego wychładzania powierzchni gruntu za miastem, co sprzyja wcześniejszemu wzrostowi stężenia Rn-222 w Ciosnach niż w centrum Łodzi. Na obu stacjach przychodowy strumień ciepła glebowego najwyższe wartości osiągał w godzinach porannych, kiedy to notowane były najwyższe stężenia Rn-222. Dobowe maksimum i minimum stężenia Rn-222 występuje jednak z opóźnieniem w stosunku do wartości ekstremalnych *QG*. Przesunięcie czasowe ekstremów dobowych wymienionych parametrów jest wyraźnie zilustrowane w postaci pętli na rysunkach przedstawiających stężenie Rn-222 w funkcji *QG* (rys. 5.39). Wyraźne pętle - efekt histerezy (opóźnienie reakcji na czynnik zewnętrzny) - na wykresach korelacyjnych przedstawiających średnie przebiegi dobowe Rn-222 i *QG* zaznaczają się w miesiącach od kwietnia do października (rys. 5.39).



Rys. 5.35. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.35. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Łódź in 2008–2010

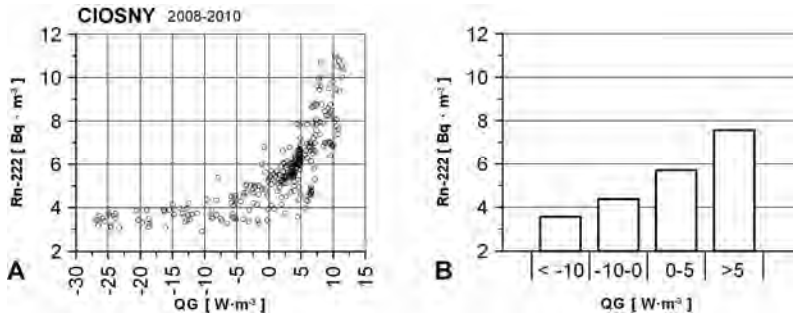


Rys. 5.36. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Ciosnach w latach 2008–2010

Fig. 5.36. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Ciosny in 2008–2010

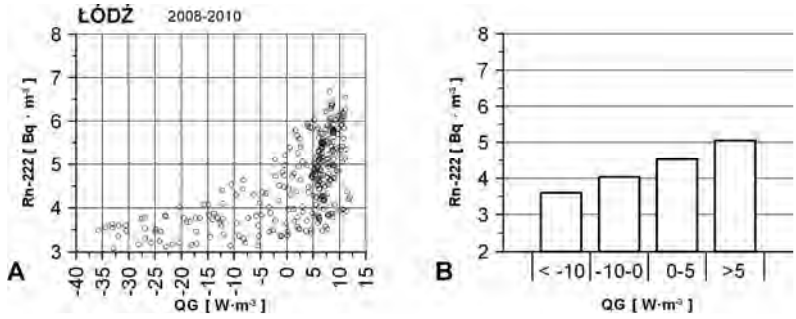
W przebiegu rocznym stężenia Rn-222 na tle strumienia ciepła glebowego podobieństwo zmienności czasowej obu zmiennych ujawnia się także w zakresie wahań dobowych. Wyraźny wzrost amplitudy dobowej *QG* i Rn-222 w biegu rocznym był obserwowany od kwietnia, z maksimum w miesiącach letnich. Niewielka zmienność dobowa *QG* i Rn-222 cechuje miesiące od listopada do lutego (rys. 5.34). Ogólne prawidłowości zaobserwowane dla relacji stężenia Rn-222 ze strumieniem ciepła glebowego ilustrują rysunki 5.35 i 5.36 opracowane na podstawie całej serii pomiarowej, gdzie wysokim dodatnim wartościom *QG* odpowiadają największe stężenia Rn-222.

Analiza średniego stężenia Rn-222 w czterech przedziałach wartości *QG* wskazuje, że największe średnie wartości stężenia tego radionuklidu były rejestrowane na stacji w Łodzi i Ciosnach dla przedziału powyżej 5 $W \cdot m^{-2}$. Najmniejsze stężenia Rn-222 występowały w przedziale wartości *QG* poniżej –10 $W \cdot m^{-2}$ (rys. 5.37 i 5.38).



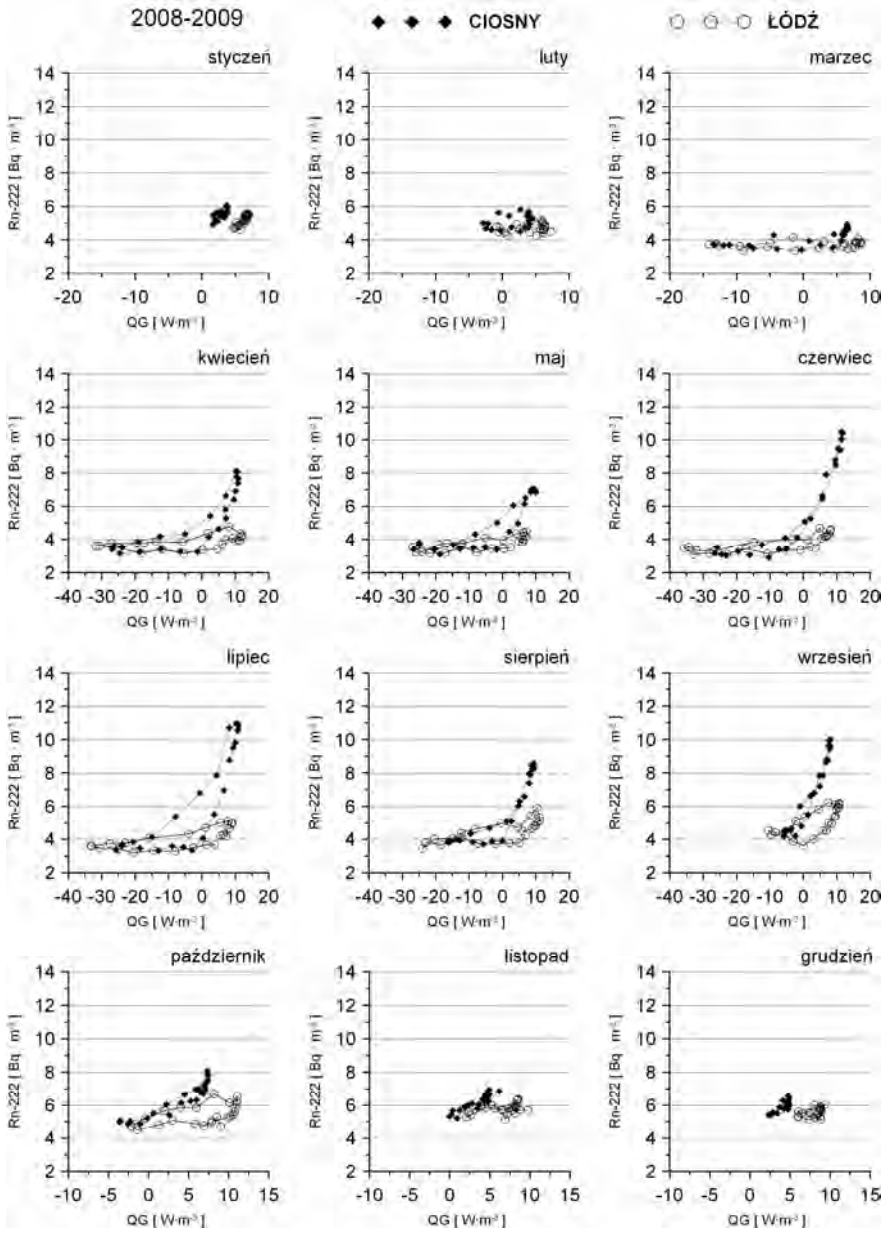
Rys. 5.37. A. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych dla poszczególnych miesięcy - rys. 5.34); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości strumienia ciepła glebowego

Fig. 5.37. A. Average Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Ciosny 2008–2010 (correlation for average daily runs for each month - Fig. 5.34); B. Mean concentration of Rn-222 for selected intervals of soil heat flux



Rys. 5.38. A. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych dla poszczególnych miesięcy - rys. 5.34); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości strumienia ciepła glebowego

Fig. 5.38. A. Average Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Łódź 2008–2010 (correlation for average daily runs for each month - Fig. 5.34); B. Mean concentration of Rn-222 for selected intervals of soil heat flux



Rys. 5.39. Stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.34)

Fig. 5.39. Rn-222 concentration as a function of soil heat flux (*QG*) in Łódź and Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily courses - Fig. 5.34)

Współczynniki korelacji rang Spearmana dla średnich wartości godzinnych stężenia Rn-222 i *QG* w poszczególnych miesiącach wskazują, że najsilniejsza zależność między badanymi zmiennymi występuje od kwietnia do października. Małe wartości współczynników korelacji cechują luty, listopad i grudzień (tab. 5.9).

Tabela 5.9

Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego *QG* w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05

Table 5.9

Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux *QG* in Ciosny and Łódź in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łódź 2008												
r_s	0,824	0,623	0,339	0,502	0,734	0,718	0,768	0,685	0,744	0,540	0,347	0,480
Ciosny 2008												
r_s	0,627	0,462	0,582	0,806	0,815	0,938	0,865	0,900	0,898	0,918	0,787	0,587
Łódź 2009												
r_s	0,667	0,033	0,249	0,709	0,842	0,864	0,821	0,862	0,780	0,467	0,139	0,486
Ciosny 2009												
r_s	0,385	0,782	0,576	0,918	0,871	brak	brak	0,942	0,904	0,945	-0,687	0,638
Łódź 2010												
r_s	0,429	0,125	0,402	0,447	0,530	0,633	0,760	0,793	0,810	0,730	0,615	-0,036
Ciosny 2010												
r_s	0,426	0,391	0,749	0,816	0,735	0,903	0,785	0,871	0,909	0,962	0,530	-0,221

Otrzymane wyniki analizy związku stężenia Rn-222 ze strumieniem ciepła glebowego są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi, z których wynikało m.in. że inwersyjny profil temperatury w gruncie (większa temperatura przy powierzchni gruntu), odpowiadający okresowi z ujemnymi wartościami *QG* w ciągu doby, nie powinien sprzyjać koncentracji Rn-222 w przypowierzchniowej warstwie powietrza. Uzyskane wyniki badań pozwoliły zakwalifikować strumień ciepła glebowego do elementów meteorologicznych pozwalających wnioskować o przebiegu dobowym stężenia Rn-222 i zadecydowały o wyborze tego parametru do konstrukcji modelu statystycznego w celu estymacji poziomu koncentracji tego radionuklidu w powietrzu. Wyniki modelowania zaprezentowano w podrozdziale 5.4.

Nierozstrzygnięta jednak pozostaje kwestia wpływu strumienia ciepła glebowego na stężenie Rn-222 w dolnej troposferze, wśród wielu innych czynników jednocześnie oddziałujących na aktywność promieniotwórczą tego gazu w powietrzu atmosferycznym. Ten problem wymaga dalszych badań na podstawie, między innymi, pomiarów szybkości ekshalacji.

Wilgotność gruntu (*VWC*, %) jest drugim elementem meteorologicznym, obok strumienia ciepła glebowego, na podstawie którego można pośrednio wnioskować o intensywności ekshalacji radonu i o stężeniu Rn-222 w powietrzu przy gruncie. W modelach transportu radonu w gruncie kluczową rolę dla wielkości strumienia tego radionuklidu odgrywają przepuszczalność oraz współczynnik dyfuzji, który jest silnie uzależniony od wilgotności ośrodka (Janik 2005). Przestrzenie międzyziarnowe w glebie, wypełnienie wodą, istotnie hamują migrację radonu ku powierzchni ziemi. Jak wykazały badania nad ekshalacją radonu prowadzone przez J. Mazur (2008), tempo procesu uwalniania Rn-222 do atmosfery istotnie zmniejszało się wraz ze wzrostem wilgotności gleby.

Tabela 5.10

Średnia wartość wilgotności gruntu (*VWC* w %) w poszczególnych porach roku na stacjach w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010

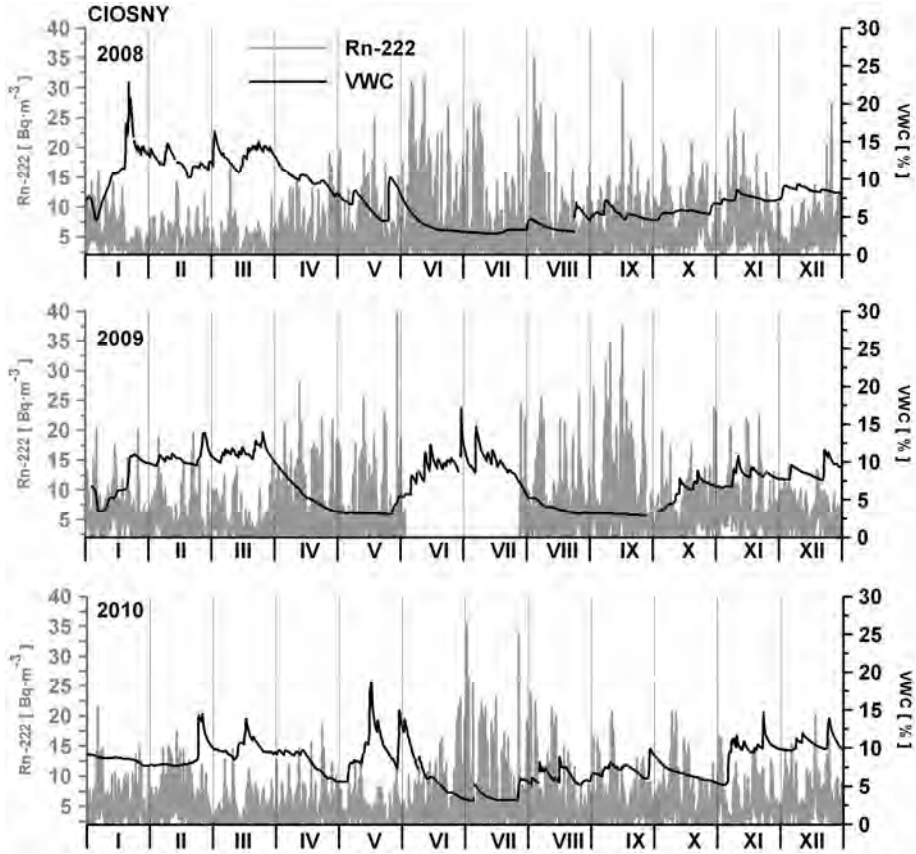
Table 5.10

Average value of soil moisture (volumetric water content, *VWC*, in %) in different seasons at stations in Łódź and Ciosny in 2008–2010

***VWC* %**	**III–V**	**VI–VIII**	**IX–XI**	**XII–II**
2008				
Łódź	22	12	14	25
Ciosny	10	4	6	11
2009				
Łódź	17	16	16	23
Ciosny	7	7	6	9
2010				
Łódź	22	15	20	24
Ciosny	9	6	8	9
2008–2010				
Łódź	20	14	17	24
Ciosny	9	6	7	10

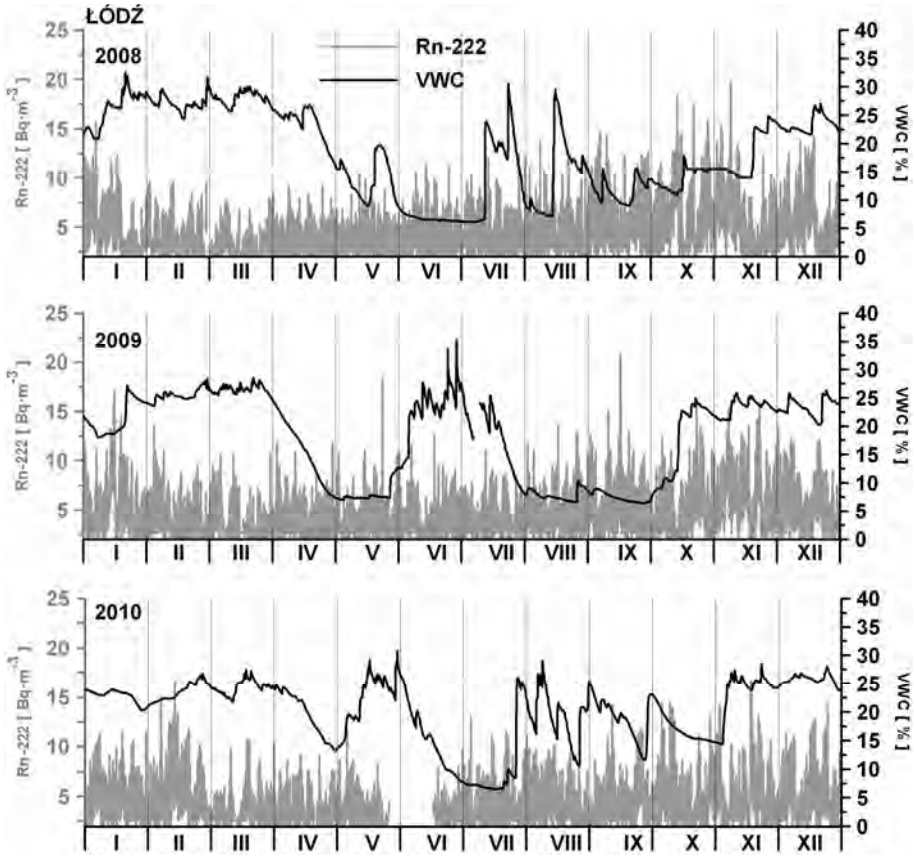
Podłoże na stacjach monitoringu stężenia Rn-222 w powietrzu w Ciosnach i w Łodzi różniło się stopniem uwilgotnienia. W latach 2008–2010 grunt na stacji w centrum Łodzi był przeciętnie o 11% bardziej wilgotny niż na stacji zamiejskiej. Zakres wahań różnic wilgotności podłoża między Łodzią a Cio-

snami w 2008 roku wynosił 3%–27%, w 2009 2%–24%, a w 2010 2%–22%. Największe różnice na korzyść stacji miejskiej przypadały na miesiące wiosenne i zimowe, a najbardziej zbliżony poziom wilgotności gruntu na badanych stacjach występował w okresie letnim (tab. 5.10, rys. 5.40 i 5.41). Tendencja większego przesuszenia gruntu na stacji zamiejskiej wynikała głównie z jego właściwości. W Ciosnach w podłożu dominują piaski, natomiast w centrum Łodzi - glina.



Rys. 5.40. Przebieg roczny stężenia Rn-222 na tle wilgotności gruntu (*VWC*) w Ciosnach w latach 2008–2010

Fig. 5.40. Annual course of Rn-222 concentration on the background of soil moisture (*VWC*) in Ciosny in 2008–2010



Rys. 5.41. Przebieg roczny stężenia Rn-222 na tle wilgotności gruntu (*VWC*) w Łodzi w latach 2008–2010

Fig. 5.41. Annual course of Rn-222 concentration on the background of soil moisture (*VWC*) in Łódź in 2008–2010

W przebiegu rocznym na obu stacjach największą wilgotność podłoża rejestrowano w miesiącach zimowych (XII–II), średnio 24% w Łodzi i 10% w Ciosnach, a najmniejszą w letnich (VI–VIII), odpowiednio 14% i 6%. Miesiące jesienne (IX–XI) charakteryzuje zbliżony poziom wilgotności gruntu do okresu letniego – 17% w Łodzi i 7% w Ciosnach. Wiosną (III–V) wilgotność gruntu w centrum Łodzi przeciętnie osiągała 20%, a na stacji zamiejskiej 9% (tab. 5.10). Generalnie zmienność roczna tego elementu meteorologicznego wykazuje przeciwną tendencję niż roczne zmiany stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza. Najmniejsze stężenie tego radionuklidu w powietrzu na obu stacjach było rejestrowane w każdym roku w marcu, kiedy to poziom

wilgotności gruntu na obu stacjach był jednym z największych w roku (rys. 5.40 i 5.41). Zwiększenie stężenia Rn-222 notowano w miesiącach o małej wilgotności gleby - w Ciosnach występowało ono latem i jesienią, a w Łodzi - jesienią. Ujemna korelacja badanych zmiennych jest bardziej widoczna na stacji zamiejskiej. Maksimum letnie stężenia Rn-222 w Łodzi nie występuje pomimo przesuszenia podłoża, co może wskazywać na dominującą rolę innych czynników sprzyjających koncentracji tego gazu w powietrzu. Analizując szczegółowo zmienność roczną wilgotności gruntu na tle stężenia Rn-222 (rys. 5.40 i 5.41) można zauważyć, że w Ciosnach wystąpiły kilkudniowe epizody gwałtownego zwiększenia wilgotności podłoża i odpowiadające im zmniejszenie stężenia Rn-222, np. w I, V, VIII 2008 r., w II, X, XI 2009 r. i w II, III, V, VI, VIII, XI, XII 2010 r. W Łodzi także obserwowane było zmniejszanie stężenia Rn-222 w okresach zwiększenia wilgotności gruntu, np. w VII, VIII, X, XI 2008 r., w I, V, X 2009 r., w I, V, VI, VIII, IX, XI 2010 r.

Analizie poddano średnią dobową wilgotność gruntu oraz zakres jej wahań w dniach z maksymalnym stężeniem Rn-222 w przedziałach 20–40 $Bq \cdot m^{-3}$ (Ciosny) i 10–20 $Bq \cdot m^{-3}$ (Łódź). W wybranych dniach na stacji zamiejskiej przeciętny poziom wilgotności podłoża wynosił 5% i zmieniał się od 3% do 11%. Stacja w Łodzi w dniach z najwyższym stężeniem dobowym Rn-222 charakteryzowała się 18% zawartością wody w gruncie, a zakres jej wahań to 6–27%. W dniach gdy na obu stacjach najwyższe dobowe stężenie było niskie, tj. < 5 $Bq \cdot m^{-3}$, średnia wilgotność gruntu w Ciosnach nie przekraczała 11% i zmieniała się w zakresie 4–20%, a przeciętne wartości uwilgotnienia podłoża w Łodzi to 22% przy zmianie przeciętnych dobowych wartości od 6 do 31%. Przedstawione dane dla Łodzi obrazują brak wyraźnych różnic w warunkach uwilgotnienia gruntu rejestrowanego w dniach z wysokim i niskim stężeniem radonu w przygruntowej warstwie powietrza. Na stacji zamiejskiej w dniach ze zwiększonym stężeniem tego radionuklidu notowano natomiast o połowę niższy poziom uwilgotnienia podłoża niż w dniach z niskim stężeniem Rn-222. Zaobserwowane prawidłowości ujawniły się także w przypadku pogrupowania danych o największych dobowych stężeniach Rn-222 według klas wilgotności gruntu (tab. 5.11). W przypadku stacji miejskiej nie stwierdzono zależności między zmiennością przeciętnych dobowych maksimów stężenia Rn-222 w różnych warunkach uwilgotnienia podłoża. Istotne różnice w wartościach przeciętnych najwyższego dobowego stężenia Rn-222 w powietrzu dla różnych przedziałów wilgotności gruntu zaobserwowano na stacji zamiejskiej, gdzie stężenie Rn-222 w warunkach przesuszenia podłoża do poziomu < 5% jest 3 razy wyższe niż dla przedziału wilgotności 15–20%.

Tabela 5.11

Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach wilgotności gruntu (w %) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie największych dobowych wartości stężenia radonu)

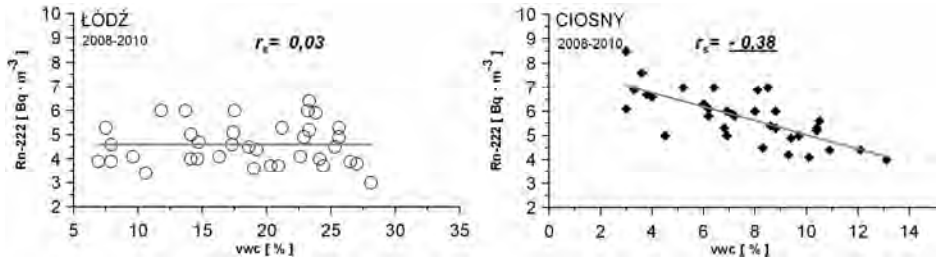
Table 5.11

Mean and extreme values of Rn-222 concentration in different ranges soil moisture (in %) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (prepared on the basis of maximal daily values of radon concentration)

	≤ 5%	**5–10%**	**10–15%**	**15–20%***	**20–25%**	**25–30%**
Rn-222 [Bq·m^{-3}], Ciosny ; Łódź						
Średnia	14,5 ; -	8,1 ; 8,0	7,7 ; 8,8	4,9 ; 7,8	- ; 8,5	- ; 6,9
Maksymalna	40,0 ; -	20,0 ; 20,0	20,0 ; 19,0	6,0 ; 17,0	- ; 16,0	- ; 14,0
Minimalna	4,0 ; -	3,0 ; 3,0	3,0 ; 4,0	4,0 ; 3,0	- ; 3,0	- ; 3,0

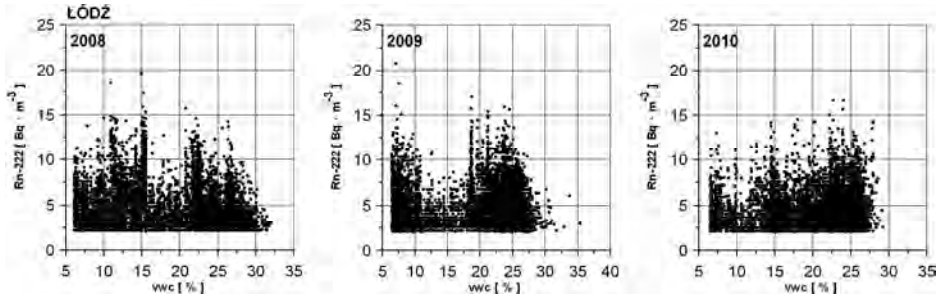
* 6 przypadków w Ciosnach i 137 przypadków w Łodzi

Potwierdzeniem opisywanych na analizowanych stacjach różnych relacji rejestrowanego stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza ze stanem uwilgotnienia podłoża są wykresy korelacyjne opracowane na podstawie średnich miesięcznych wartości oraz danych co 1 godz. W Łodzi nie obserwuje się wyraźnego związku między tymi zmiennymi, podczas gdy na stacji Ciosny występuje ujemna zależność statystyczna o umiarkowanej sile związku między stężeniem Rn-222 a wilgotnością gruntu (współczynnik korelacji rang Spearmana r_s = –0,38 , rys. 5.42–5.44). Różnice między stacjami w otrzymanych wynikach analiz świadczą o złożoności problemu uwarunkowań determinujących stężenie Rn-222 w powietrzu atmosferycznym. Na stacji zamiejskiej w Ciosnach, charakteryzującej się piaszczystym, bardziej suchym w skali roku podłożem, wilgotność gruntu można zaliczyć niewątpliwie do ważnych czynników kształtujących poziom stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza. W centrum Łodzi, gdzie poziom uwilgotnienia gliniastego gruntu był przeciętnie w roku dwukrotnie wyższy niż w Ciosnach związku badanych zmiennych nie stwierdzono, jednak nie można jednoznacznie wykluczyć wpływu tego elementu meteorologicznego na poziom koncentracji radonu w powietrzu w mieście. Poszerzenie wiedzy na temat roli wilgotności gruntu dla stężenia radonu w dolnych warstwach troposfery mogłyby przynieść synchroniczne pomiary ekshalacji tego gazu.



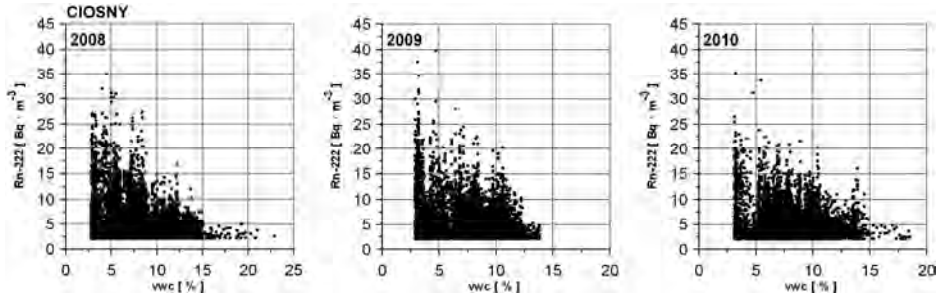
Rys. 5.42. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniej miesięcznej wilgotności gruntu (*VWC*) w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Współczynnik korelacji rang Spearmana - r_s

Fig. 5.42. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly soil moisture (*VWC*) in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Spearman's rank correlation coefficient - r_s



Rys. 5.43. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji wilgotności gruntu (*VWC*) w Łodzi w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.)

Fig. 5.43. Average Rn-222 concentration as a function of soil moisture (*VWC*) in Łódź in 2008–2010 (data every 1 hr.)



Rys. 5.44. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji wilgotności gruntu (*VWC*) w Ciosnach w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.)

Fig. 5.44. Average Rn-222 concentration as a function of soil moisture (*VWC*) in Ciosny in 2008–2010 (data every 1 hr.)

5.4. Modele statystyczne stężenia Rn-222 w Ciosnach i Łodzi

W niniejszym rozdziale wykorzystano zależności funkcyjne stężenia Rn-222 i temperatury powietrza oraz stężenia Rn-222 i strumienia ciepła glebowego (*QG*) do stworzenia dwóch modeli pozwalających prognozować poziom stężenia tego radionuklidu w przygruntowej warstwie powietrza. Przesłanką do wybrania tych dwóch elementów meteorologicznych jako zmiennych niezależnych był m.in. ich wyraźny rytm dobowy i wysokie współczynniki korelacji ze stężeniem Rn-222 w stosunku do pozostałych analizowanych elementów pogody (tab. 5.2, 5.5, 5.8, 5.9). Ponadto o wyborze temperatury powietrza z wysokości 2 m nad gruntem do modelu stężenia Rn-222 zadecydowało istotne znaczenie tego elementu pogody dla intensywności dyfuzji turbulencyjnej, wpływającej na stopień koncentracji Rn-222 w powietrzu. Zaletą wykorzystania temperatury powietrza w prognozowaniu stężenia Rn-222 jest powszechna dostępność danych pomiarowych - dane te należą do standardowych pomiarów meteorologicznych na wszystkich stacjach i posterunkach meteorologicznych. Informacji o wartościach temperatury dostarcza także miernik stężenia Rn-222 AlphaGUARD® PQ2000PRO, coraz powszechniej wykorzystywany w badaniach środowiskowych Rn-222, rejestrujący ten element meteorologiczny synchronicznie do stężenia radionuklidu.

Najwyższy współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem Rn-222 a wybranymi elementami meteorologicznymi zaobserwowano dla strumienia ciepła glebowego, co zadecydowało o jego wyborze jako zmiennej niezależnej do drugiego modelu stężenia Rn-222. Dodatkowo *QG*, jako składnik bilansu cieplnego powierzchni czynnej (powierzchni ziemi), pośrednio charakteryzuje cechy termiczne podłoża, ważne dla intensywności przepływu gazów glebowych do atmosfery. Znak i wartość *QG* są odzwierciedleniem różnic temperatury między powierzchnią ziemi a głębszymi warstwami gleby. Jak wynika z teoretycznych rozważań przedstawianych w literaturze przedmiotu, przepływ gazów w glebie, podobnie jak wartość *QG*, zależą od wartości gradientu temperatury w profilu pionowym gleby, zwiększając się wraz ze wzrostem różnicy temperatury w podłożu (Kędziora 1999, Janik 2005, Mazur 2008). Dodatnie 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* (strumień rozchodowy ciepła od powierzchni w głąb gleby), pojawiające się w konsekwencji inwersyjnego profilu temperatury podłoża hamują transport gazów glebowych ku powierzchni ziemi. Zatem ten element meteorologiczny może być pośrednim wskaźnikiem szybkości ekshalacji Rn-222, a także daje pogląd na warunki mikroklimatyczne w warstwie przygruntowej powietrza, wskazując na stopień

nagrzania lub wychłodzenia powierzchni ziemi, nad którą ustawiony jest miernik radonu AlphaGuard® PQ2000PRO.

Do opisu związku stężenia Rn-222 z temperaturą powietrza i *QG* wybrano funkcję eksponencjalną. Ten model funkcji, jak pokazała wstępna analiza danych, daje mniejsze sumy kwadratów różnic między danymi pomiarowymi a modelowymi niż np. funkcja wielomianowa czy potęgowa. Dodatkowym argumentem przemawiającym za doborem funkcji eksponencjalnej było jej szerokie zastosowanie w badaniach klimatu Łodzi, m.in. do opisu zależności intensywności miejskiej wyspy ciepła od prędkości wiatru i zachmurzenia oraz parametryzacji turbulencyjnych składników bilansu cieplnego miasta (Fortuniak 2003, Fortuniak 2010).

Estymacje stężenia Rn-222 przeprowadzono dla poszczególnych miesięcy z uwagi na duże zróżnicowanie zmian dobowych stężenia tego radionuklidu w przebiegu rocznym.

Podstawą obliczenia wartości współczynników modeli statystycznych opisujących dane empiryczne godzinnych wartości stężenia Rn-222 były średnie miesięczne wartości godzinne stężenia Rn-222 w zależności od średnich miesięcznych wartości godzinnych temperatury powietrza (t_{2m}) i *QG* w latach 2008–2010. Estymacje stężenia Rn-222 przeprowadzono dla kolejnych miesięcy z uwagi na duże zróżnicowanie zmian dobowych tej zmiennej w przebiegu rocznym.

Dla obu zależności wyznaczono po dwa modele w oparciu o funkcje eksponencjalne.

Pierwszy model (model I) ma postać:

$$1)\ Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot Q_G) + a_3,$$
$$2)\ Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot t_{2m}) + a_3,$$

gdzie: *Rn* - wartości stężenia radonu [Bq·m^{-3}], Q_G - strumień ciepła w gruncie [W·m^{-2}], t_{2m} - temperatura powietrza na wysokości 2 m nad gruntem [°C]. Współczynniki modelu I - a_1, a_2 i a_3 , zamieszczono w tabelach 5.12–5.15.

Tabela 5.12

Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach). MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.12

Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu I *Rn-222 (QG)***			**Statystyki dopasowania modelu I *Rn-222 (QG)***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	0,014	0,628	4,453	0,000	0,137	0,103	0,875
2	11,325	0,002	–6,706	0,000	0,241	0,211	0,112
3	0,000	1,144	3,663	0,000	0,183	0,144	0,253
4	0,162	0,118	3,570	0,000	0,303	0,231	0,563
5	0,310	0,135	3,419	0,000	0,262	0,240	0,728
6	0,325	0,158	3,350	0,000	0,257	0,199	0,846
7	0,369	0,146	3,568	0,000	0,344	0,281	0,808
8	0,161	0,194	3,977	0,000	0,399	0,327	0,759
9	0,150	0,230	4,366	0,000	0,496	0,376	0,762
10	0,000	1,393	5,195	–0,002	0,488	0,371	0,524
11	0,456	0,072	5,058	0,000	0,280	0,222	0,252
12	0,001	0,632	5,317	0,004	0,225	0,179	0,393

W drugim modelu zarówno dla związku z temperaturą powietrza jak i *QG* wprowadzono pochodną po czasie ∂t zmiennej niezależnej jako dodatkową zmienną. Wprowadzenie pochodnej uwzględnia zjawisko przesunięcia czasowego wartości ekstremalnych stężenia Rn-222 w stosunku do wartości analizowanych elementów meteorologicznych. Efekt histerezy ujawniał się w postaci pętli na wykresach korelacyjnych stężenia Rn-222 i temperatury powietrza oraz stężenia Rn-222 i strumienia ciepła gruntowego. W przebiegu rocznym efekt histerezy był szczególnie widoczny w miesiącach od kwietnia do października (rys. 5.8 i 5.39).

Tabela 5.13

Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach). MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.13

Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu I *Rn-222 (t_{2m})***			**Statystyki dopasowania modelu I *Rn-222 (t_{2m})***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	33,650	–0,010	–29,060	0,001	0,165	0,131	0,809
2	0,528	–0,497	4,396	0,000	0,209	0,179	0,457
3	0,824	–0,264	3,405	0,000	0,156	0,124	0,545
4	6,721	–0,205	3,142	0,000	0,219	0,185	0,812
5	10,517	–0,170	2,740	0,000	0,162	0,140	0,911
6	14,024	–0,135	2,457	0,000	0,197	0,158	0,915
7	42,796	–0,167	2,723	0,000	0,171	0,148	0,958
8	63,892	–0,239	3,712	–0,065	0,310	0,235	0,839
9	25,303	–0,171	2,893	0,000	0,339	0,272	0,902
10	70,134	–0,606	4,882	0,000	0,435	0,350	0,655
11	50,532	–0,833	5,493	0,000	0,246	0,200	0,499
12	44,795	–0,006	–39,395	0,000	0,212	0,158	0,504

Tabela 5.14

Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.14

Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu I *Rn-222 (QG)***			**Statystyki dopasowania modelu I *Rn-222 (QG)***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	0,440	0,266	4,530	0,000	0,192	0,158	0,640
2	0,223	0,250	4,768	0,000	0,367	0,316	0,352
3	0,004	0,852	3,716	0,000	0,206	0,148	0,903
4	0,683	0,172	3,492	0,000	0,478	0,406	0,961
5	1,258	0,114	3,332	0,000	0,420	0,342	0,960
6	1,793	0,122	2,982	0,000	0,314	0,241	0,993
7	1,852	0,131	3,441	0,000	0,830	0,637	0,959
8	0,878	0,183	3,803	0,000	0,281	0,220	0,989
9	1,985	0,144	3,481	0,000	0,342	0,276	0,986
10	0,513	0,233	4,735	0,000	0,286	0,230	0,960
11	2,438	0,081	2,945	0,000	0,209	0,179	0,900
12	1,621	0,128	3,209	0,000	0,195	0,157	0,797

Tabela 5.15

Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.15

Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu I *Rn-222 (t_{2m})***			**Statystyki dopasowania modelu I *Rn-222 (t_{2m})***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	36,000	–0,007	–31,000	0,003	0,185	0,155	0,683
2	1,070	–0,496	4,460	0,000	0,251	0,202	0,774
3	2,640	–0,282	3,150	0,000	0,211	0,180	0,899
4	14,000	–0,170	2,150	0,000	0,321	0,263	0,983
5	24,400	–0,033	–10,600	0,000	0,322	0,266	0,977
6	34,800	–0,086	–1,870	0,000	0,414	0,331	0,988
7	79,900	–0,151	2,150	–0,212	0,882	0,785	0,944
8	74,200	–0,173	2,950	–0,117	0,499	0,426	0,956
9	38,600	–0,136	0,901	0,000	0,354	0,261	0,985
10	13,300	–0,190	3,440	0,000	0,231	0,189	0,974
11	39,800	–0,607	5,200	0,000	0,216	0,177	0,892
12	51,700	–0,009	-45,900	-0,002	0,205	0,164	0,771

Formuła modelu z pochodną (model II) uwzględniająca efekt histerezy ma postać:

$$1)\ \ Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \frac{\partial Q_G}{\partial t}\ ,$$

$$2)\ \ Rn = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \frac{\partial t_{2m}}{\partial t}$$

Współczynniki modelu II z pochodną, a_1, a_2, a_3 i a_4, zamieszczono w tabelach 5.16–5.19.

Tabela 5.16

Współczynniki a_1, a_2, a_3, a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.16

Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ and fit statistics for the data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu II z pochodną *Rn-222 (QG)***				**Statystyki dopasowania modelu II z pochodną *Rn-222 (QG)***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**a_4**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	0,015	0,620	4,446	–0,101	0,000	0,135	0,106	0,880
2	241,135	0,000	–236,515	–0,076	0,000	0,216	0,186	0,332
3	0,000	1,122	3,664	–0,056	0,000	0,124	0,101	0,757
4	0,168	0,114	3,568	–0,055	0,000	0,186	0,149	0,871
5	0,311	0,134	3,419	–0,058	0,000	0,177	0,138	0,893
6	0,321	0,159	3,353	–0,037	0,000	0,191	0,137	0,921
7	0,368	0,146	3,569	–0,065	0,000	0,199	0,153	0,943
8	0,163	0,193	3,977	–0,078	0,000	0,290	0,227	0,886
9	0,155	0,226	4,363	–0,189	0,000	0,292	0,229	0,929
10	0,000	1,773	5,212	–0,257	0,000	0,336	0,254	0,820
11	0,395	0,080	5,122	–0,073	0,000	0,274	0,224	0,309
12	0,000	1,499	5,426	–0,408	0,000	0,138	0,112	0,837

Tabela 5.17

Współczynniki a_1, a_2, a_3 , a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach). MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.17

Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ and fit statistics for data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu II z pochodną *Rn-222 (t_{2m})***				**Statystyki dopasowania modelu II z pochodną *Rn-222 (t_{2m})***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**a_4**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	277,600	–0,001	–273,013	–0,006	0,001	0,165	0,131	0,811
2	0,556	–0,445	4,364	0,240	0,000	0,197	0,168	0,543
3	0,830	–0,232	3,366	0,253	0,000	0,110	0,095	0,817
4	6,403	–0,197	3,117	0,248	0,000	0,150	0,118	0,920
5	10,134	–0,165	2,712	0,168	0,000	0,130	0,114	0,945
6	13,664	–0,133	2,431	0,143	0,000	0,171	0,143	0,938
7	40,931	–0,164	2,700	0,205	0,000	0,091	0,071	0,989
8	204,947	–0,299	3,553	0,263	0,000	0,195	0,145	0,951
9	23,562	–0,162	2,786	0,511	0,000	0,182	0,147	0,973
10	91,620	–0,648	4,908	0,747	0,000	0,262	0,216	0,898
11	297,483	–2,429	5,609	0,296	0,000	0,204	0,171	0,704
12	846,837	0,000	–841,437	0,005	0,000	0,211	0,157	0,506

Tabela 5.18

Współczynniki a_1, a_2, a_3, a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.18

Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ and fit statistics for the data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu II z pochodną *Rn-222 (QG)***				**Statystyki dopasowania modelu II z pochodną *Rn-222 (QG)***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**a_4**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	0,664	0,208	4,272	–0,338	0,000	0,174	0,143	0,723
2	0,244	0,234	4,750	–0,348	0,000	0,229	0,196	0,820
3	0,004	0,860	3,718	–0,067	0,000	0,139	0,116	0,958
4	0,688	0,171	3,492	–0,092	0,000	0,313	0,259	0,984
5	1,263	0,114	3,330	–0,076	0,000	0,315	0,256	0,978
6	1,795	0,122	2,981	–0,029	0,000	0,294	0,204	0,994
7	1,863	0,131	3,437	–0,176	0,000	0,536	0,445	0,984
8	0,881	0,183	3,802	–0,072	0,000	0,208	0,160	0,994
9	2,001	0,143	3,469	–0,128	0,000	0,288	0,243	0,990
10	0,521	0,231	4,728	–0,107	0,000	0,256	0,213	0,968
11	2,469	0,080	2,913	0,044	0,000	0,207	0,177	0,901
12	1,622	0,128	3,207	0,005	0,000	0,195	0,156	0,797

Tabela 5.19

Współczynniki a_1, a_2, a_3 , a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981)

Table 5.19

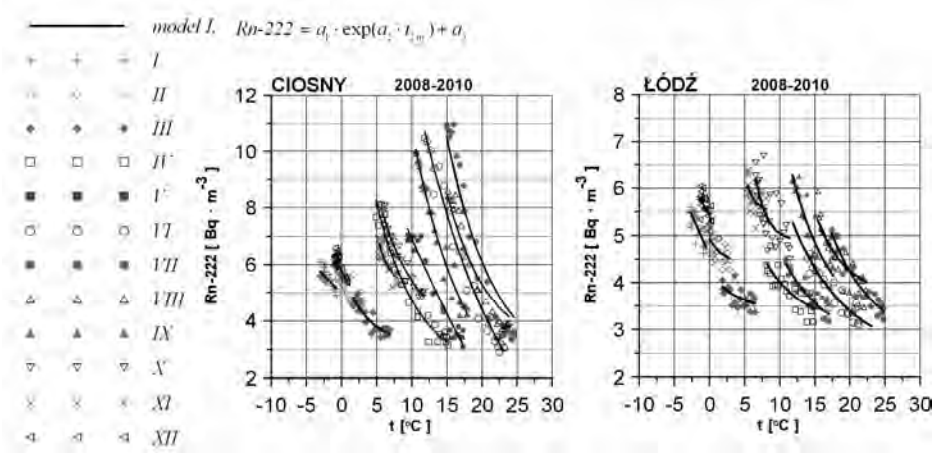
Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ and fit statistics for the data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981)

Miesiące	**Współczynniki modelu II z pochodną *Rn-222(t_{2m})***				**Statystyki dopasowania modelu II z pochodną *Rn-222(t_{2m})***			
	a_1	**a_2**	**a_3**	**a_4**	**MBE**	**RMSE**	**MAE**	**d**
1	179,000	–0,001	–174,000	0,001	0,003	0,185	0,155	0,684
2	1,110	–0,459	4,420	0,608	0,000	0,150	0,126	0,929
3	2,640	–0,280	3,150	0,077	0,000	0,207	0,176	0,903
4	13,900	–0,168	2,130	0,145	0,000	0,288	0,206	0,986
5	24,400	–0,033	–10,600	–0,034	0,000	0,321	0,263	0,977
6	35,100	–0,087	–1,750	–0,275	0,000	0,270	0,215	0,995
7	109,000	–0,154	0,634	0,156	0,000	0,468	0,377	0,987
8	102,000	–0,180	2,240	–0,008	0,000	0,317	0,238	0,985
9	38,100	–0,134	0,816	0,254	0,000	0,299	0,248	0,990
10	13,100	–0,187	3,400	0,192	0,000	0,202	0,174	0,980
11	37,600	–0,595	5,190	0,173	0,000	0,209	0,178	0,900
12	338,000	–0,001	–332,000	0,000	–0,002	0,204	0,163	0,772

Parametry funkcji zostały dobrane metodą najmniejszych kwadratów, tak aby najdokładniej opisać wyniki eksperymentalne stężenia Rn-222. Dopasowanie danych otrzymanych za pomocą prezentowanych modeli do wartości empirycznych zostało ocenione na podstawie następujących statystyk dopasowania: błędu systematycznego (MBE), średniego błędu kwadratowego pomiaru (RMSE), średniego błędu bezwzględnego (MAE) oraz indeksu zgodności danych Willmotta (d) (Willmott 1981, 1982). Formuły wymienionych statystyk przedstawiono w rozdziale 3.3.

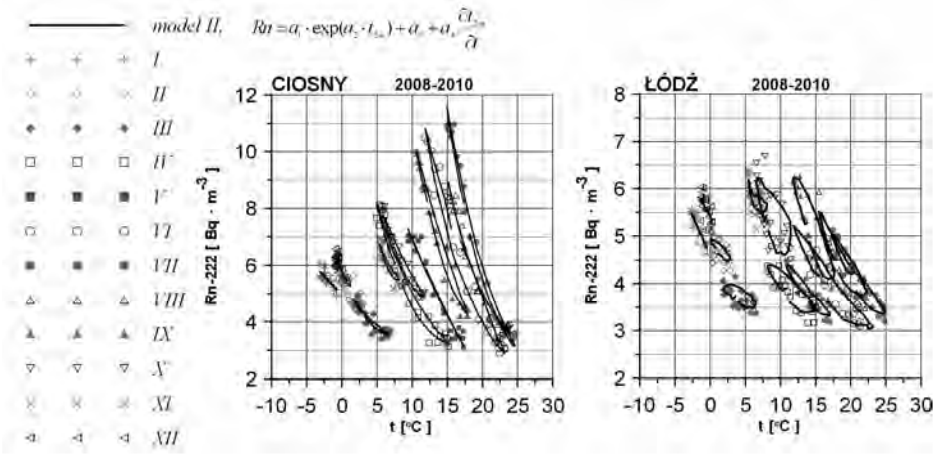
W świetle wartości statystyk dopasowania danych estymowanych do pomiarowych oraz korelacyjnych wykresów rozrzutu, modelowanie obu zależno-

ści, tj. *Rn-222 = Rn-222(t_{2m}) i Rn-222 = Rn-222(Q_G)* funkcją eksponencjalną dało zadowalające rezultaty zarówno dla Łodzi, jak i dla stacji zamiejskiej w Ciosnach (tab. 5.12–5.19, rys. 5.45–5.50). Błąd systematyczny osiągnął w większości miesięcy wartość zbliżoną do 0, co potwierdza dobry wybór modelu regresji. Indeks Willmotta wskazywał na dużą zgodność danych empirycznych i modelowych, szczególnie w miesiącach wiosennych i letnich (tab. 5.12–5.19). Dla obu zależności uwzględnienie efektu histerezy poprzez wprowadzenie pochodnej po czasie generalnie poprawiało dopasowanie modelu. Większą dokładność modelu II w stosunku do modelu I przedstawiają nie tylko wykresy rozrzutu danych modelowanych i pomiarowych, ale także zestawienie linii regresji dla poszczególnych miesięcy (rys. 5.45–5.50).



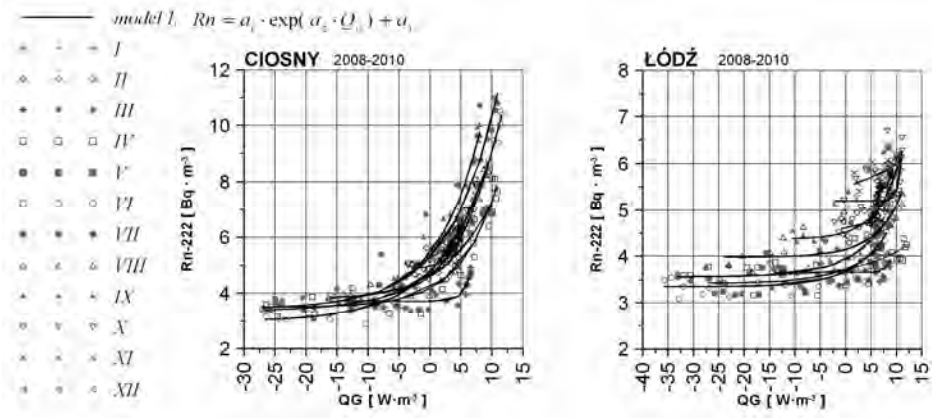
Rys. 5.45. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych). I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model I)

Fig. 5.45. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature for each month in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements; the lines marked regression curves for consecutive months (model I)



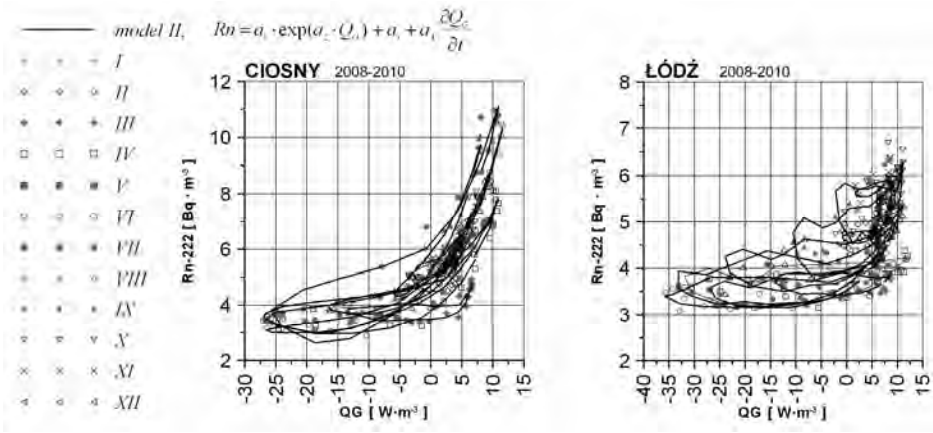
Rys. 5.46. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010. I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model II)

Fig. 5.46. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature for each month in Ciosny and Łódź in 2008-2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements; the lines marked regression curves for consecutive months (model II)



Rys. 5.47. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego (*QG*) w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych). I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model I)

Fig. 5.47. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux (*QG*) for each month in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements; the lines marked regression curves for consecutive months (model I)

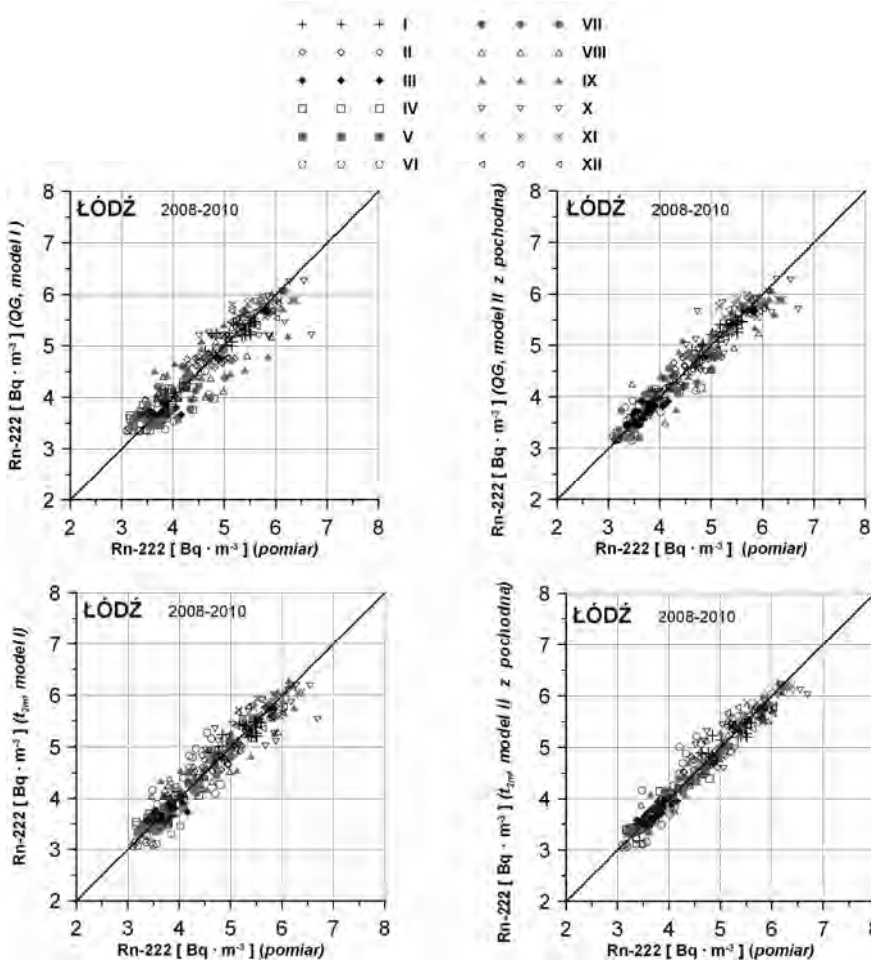


Rys. 5.48. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego (*QG*) w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych). I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono regresję krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model II)

Fig. 5.48. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux (*QG*) for each month in Ciosny and Łódź in 2008-2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements, the lines marked regression curves for consecutive months (model II)

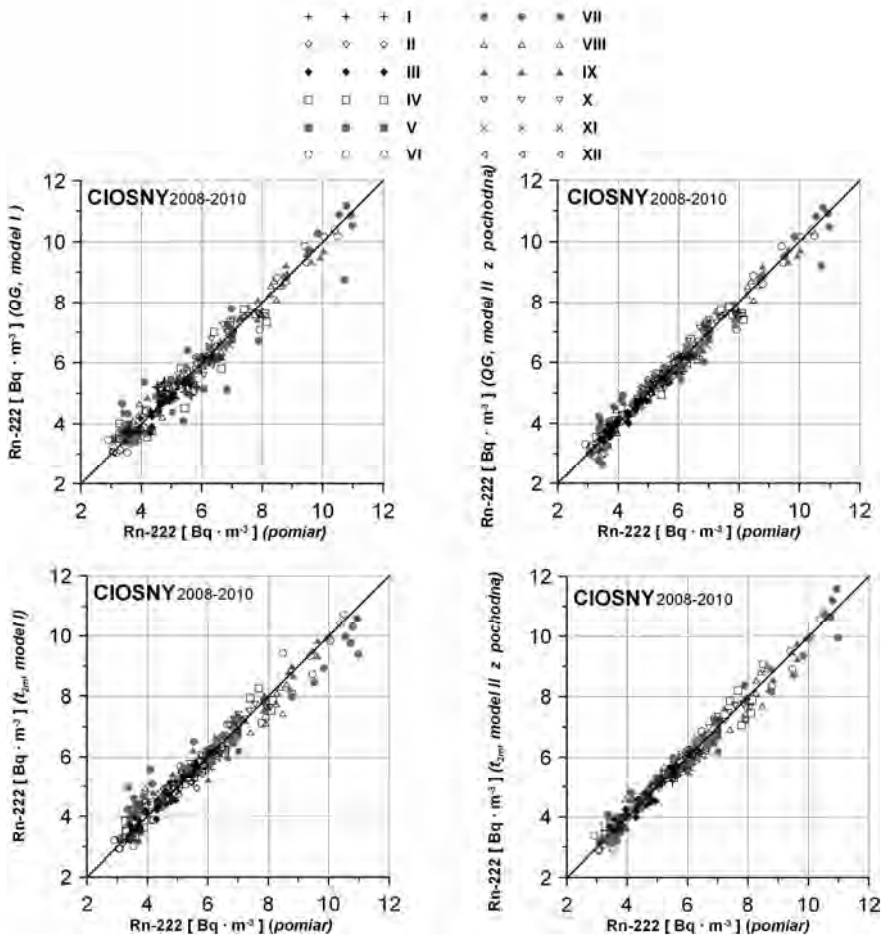
Analizując wartości indeksu zgodności danych dla kolejnych miesięcy można stwierdzić, że na obu stacjach w okresie zimowym (XII–II), a także w listopadzie występują największe odstępstwa oszacowanych wartości stężenia Rn-222 od danych empirycznych (tab. 5.12–5.19).

Generalnie dane modelowane dla Łodzi cechują się nieznacznie mniejszym dopasowaniem do danych pomiarowych niż wartości szacowane dla stacji w Ciosnach. W Łodzi można zauważyć lepsze dopasowanie danych estymowanych na podstawie temperatury niż na podstawie strumienia ciepła gruntowego, a w Ciosnach wyraźna różnica między modelami *Rn-222*(Q_G) *i Rn-222* (t_{2m}) nie występuje. Na rysunkach 5.51–5.54 przedstawiono średni przebieg dobowy zmierzonego stężenia Rn-222 w latach 2008–2010 na tle krzywych uzyskanych na podstawie danych modelowych. Kształt krzywych zmienności dobowej stężenia Rn-222 we wszystkich miesiącach na obu stacjach został bardzo dobrze odwzorowany, zarówno danymi oszacowanymi na podstawie *QG*, jak i temperatury powietrza. To potwierdza zasadność wykorzystania wartości tych dwóch elementów meteorologicznych do prognozowania stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza na badanych stacjach.



Rys. 5.49. Doświadczalne i modelowane (model I i II) wartości stężenia Rn-222 na podstawie strumienia ciepła glebowego (*QG*) i temperatury powietrza (t_{2m}) w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach)

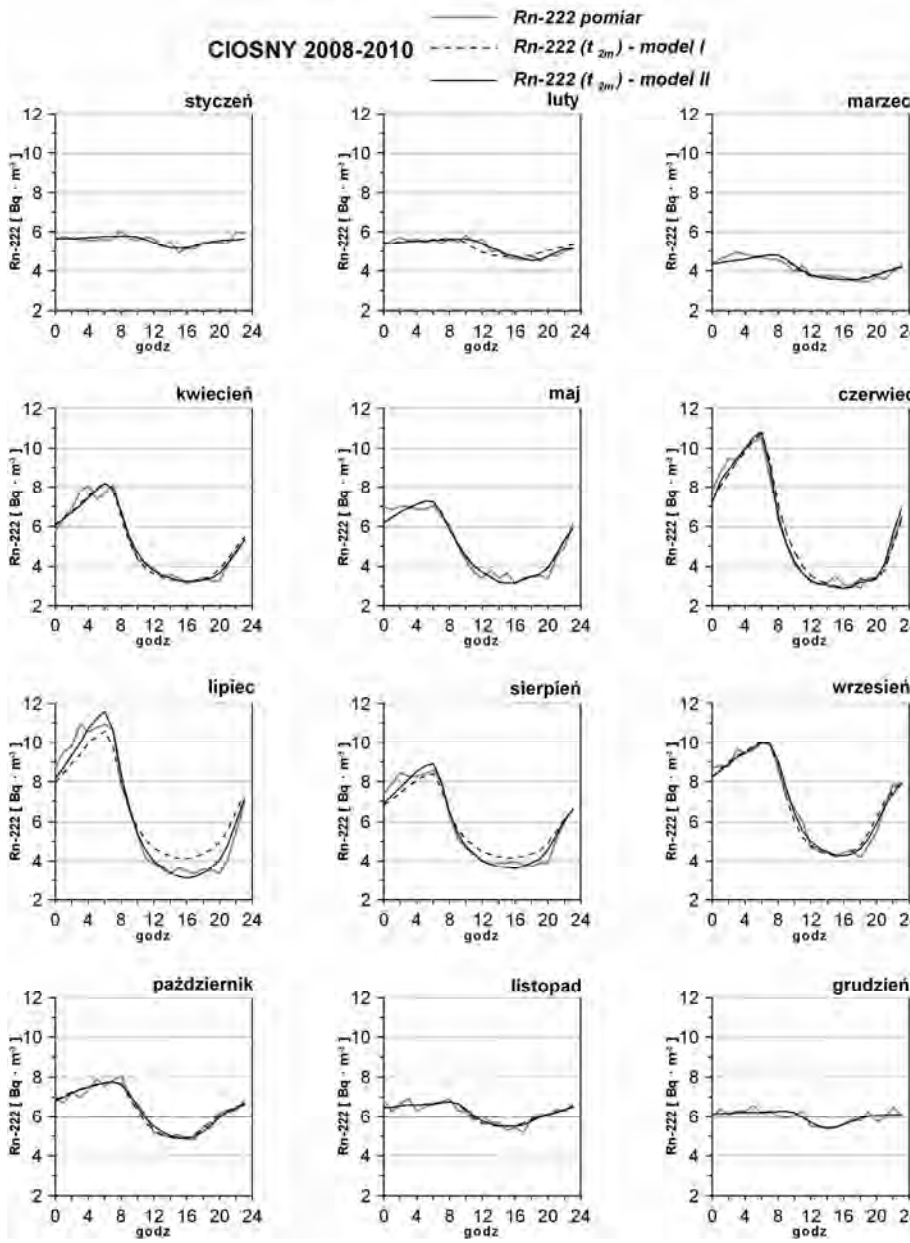
Fig. 5.49. Experimental and modeled (model I and II) of Rn-222 concentration from soil heat flux (*QG*) and air temperature (t_{2m}) in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month)



Rys. 5.50. Doświadczalne i modelowane (model I i II) wartości stężenia Rn-222 na podstawie strumienia ciepła glebowego (*QG*) i temperatury powietrza (t_{2m}) w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach)

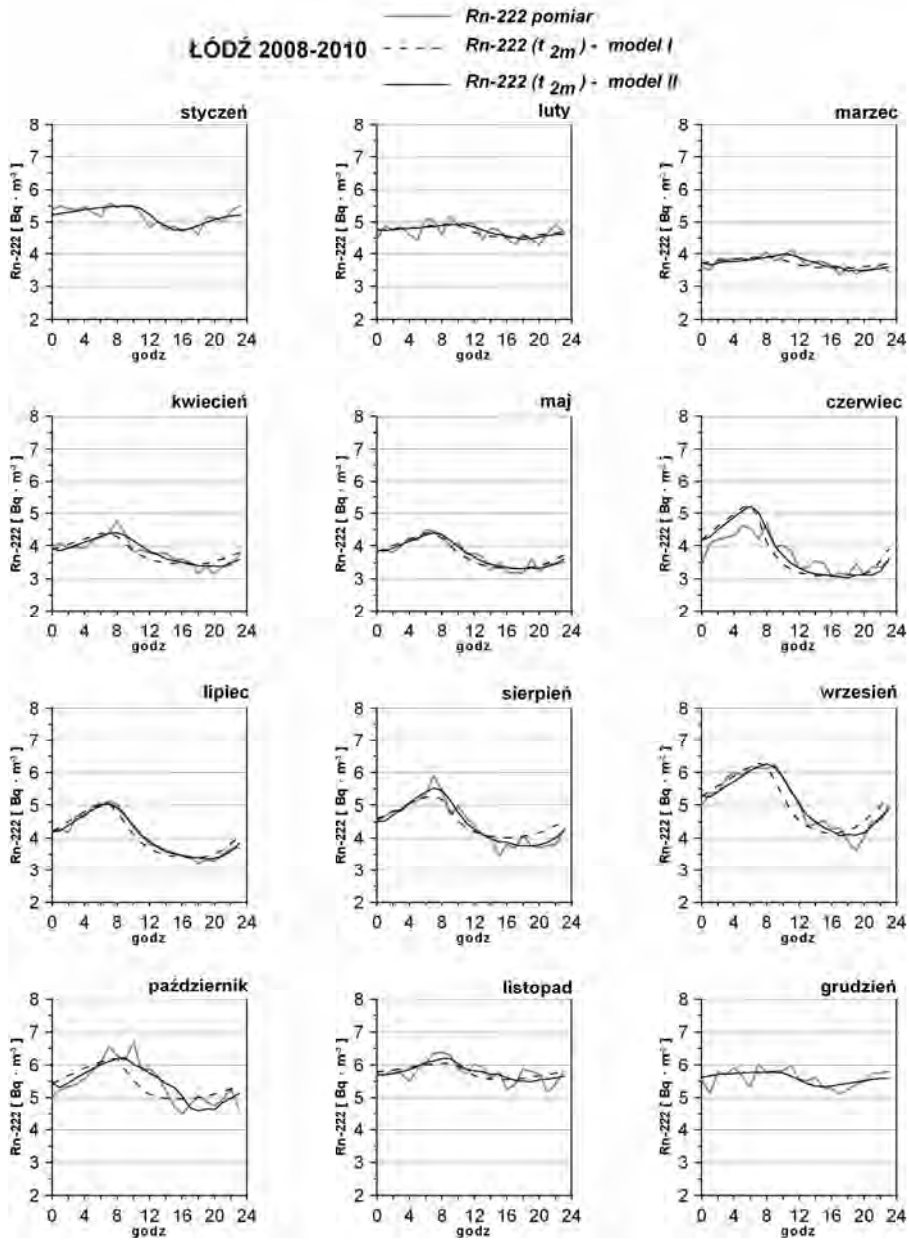
Fig. 5.50. Experimental and modeled (model I and II) of Rn-222 concentration from soil heat flux (*QG*) and air temperature (t_{2m}) in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month)

Przedstawione wyniki modelowania statystycznego wskazują, że komplementarne zastosowanie temperatury powietrza oraz strumienia ciepła gruntowego do szacowania stężenia Rn-222 na badanych stacjach w Polsce Środkowej, w środowisku miejskim i niezurbanizowanym, daje zadowalające rezultaty.



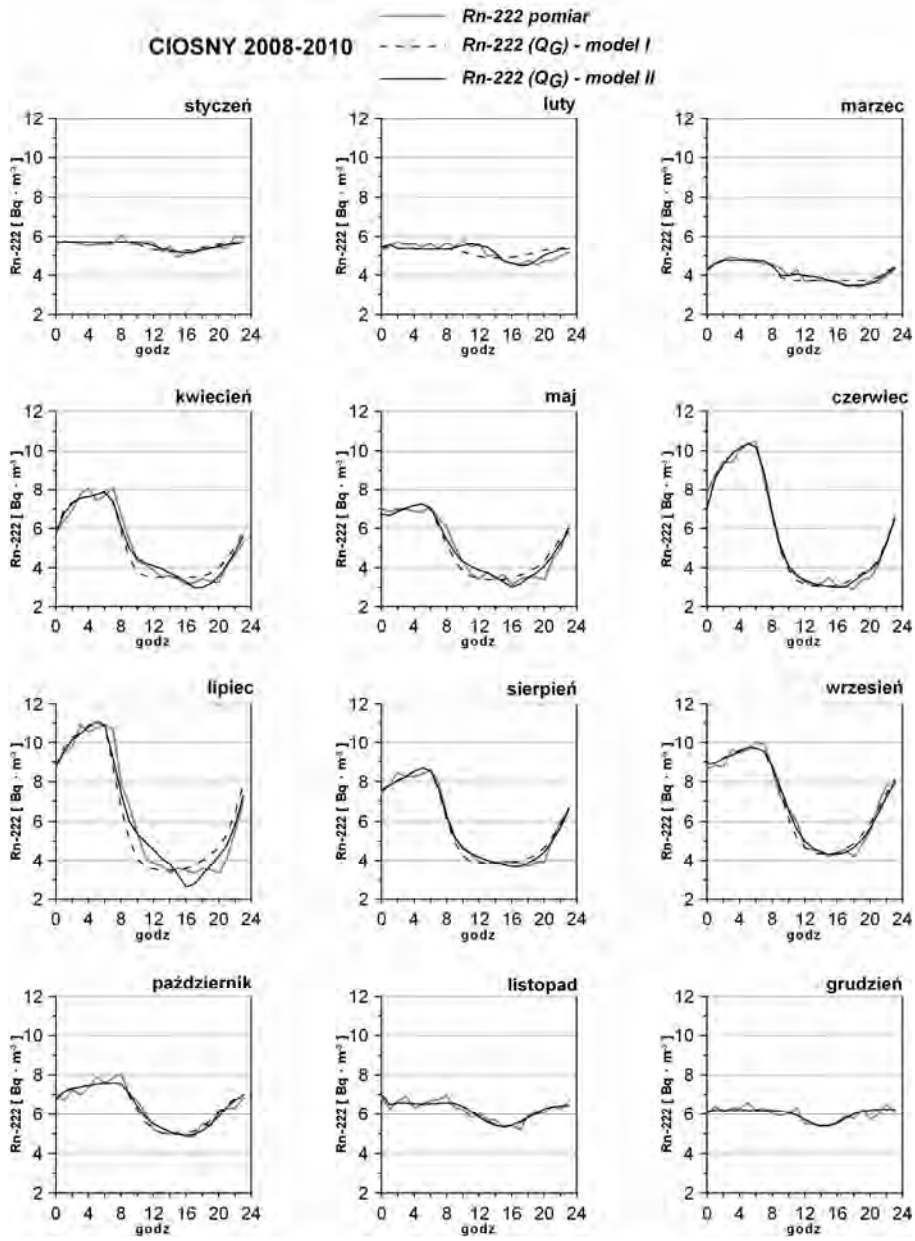
Rys. 5.51. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie temperatury powietrza (t_{2m})

Fig. 5.51. Average daily course of Rn-222 concentration in Ciosny in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of the air temperature (t_{2m})



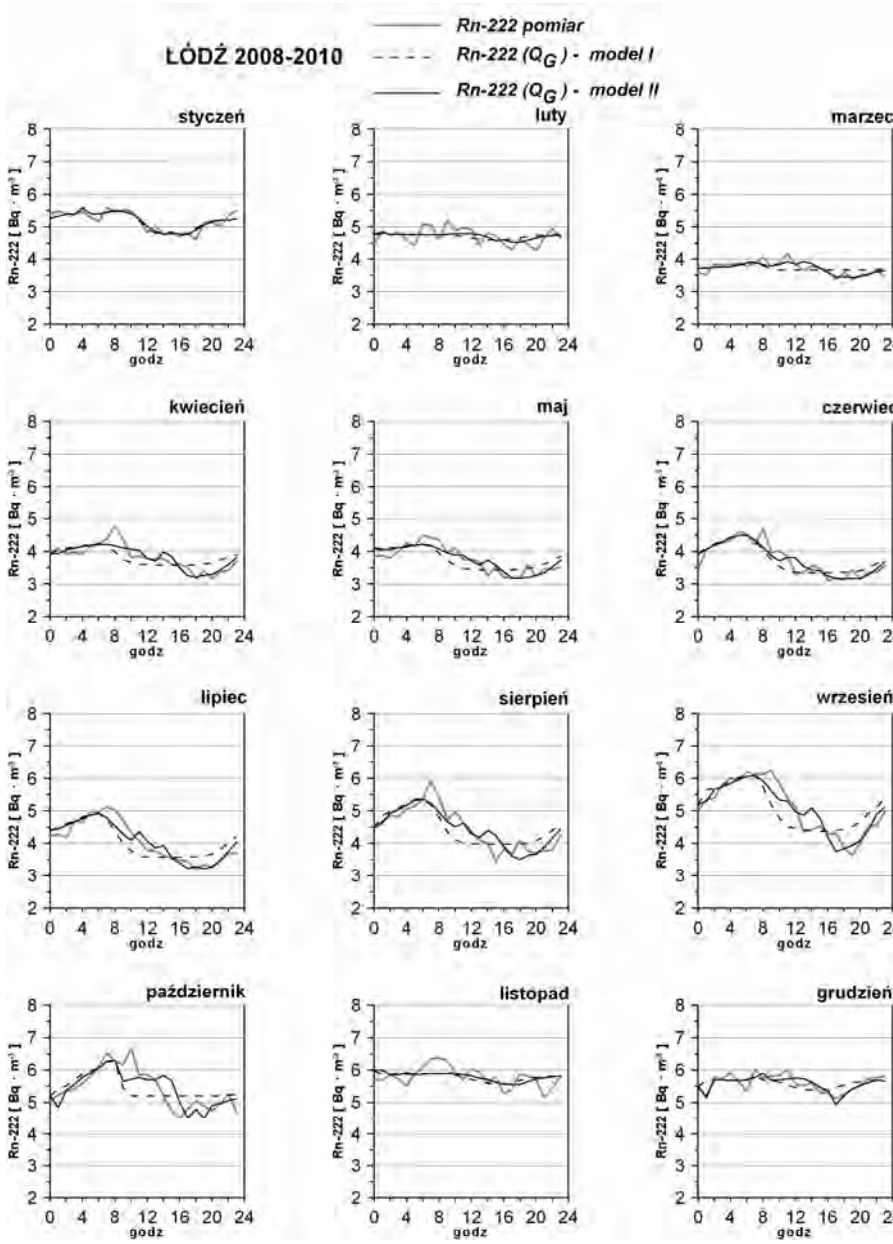
Rys. 5.52. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie temperatury powietrza (t_{2m})

Fig. 5.52. Average daily course of Rn-222 concentration in Łódź in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of the air temperature (t_{2m})



Rys. 5.53. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie strumienia ciepła glebowego (Q_G)

Fig. 5.53. Average daily course of Rn-222 concentration in Ciosny in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of soil heat flux (Q_G)



Rys. 5.54. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie strumienia ciepła glebowego (Q_G)

Fig. 5.54. Average daily course of Rn-222 concentration in Łódź in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of soil heat flux (Q_G)

5.5. Analiza wieloparametryczna związku stężenia Rn-222 z elementami meteorologicznymi

Przedstawiona we wcześniejszych rozdziałach charakterystyka stężenia Rn-222 na tle poszczególnych sześciu parametrów meteorologicznych, tj. temperatury powietrza, różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem, ciśnienia atmosferycznego, prędkości wiatru, strumienia ciepła glebowego oraz wilgotności gruntu była pierwszym, ujawniającym ogólne prawidłowości, etapem badań związku stężenia tego radionuklidu w powietrzu z warunkami pogodowymi. Otrzymane rezultaty pozwoliły na wstępne wyselekcjonowanie elementów meteorologicznych pozostających w najsilniejszych statystycznych związkach ze stężeniem Rn-222. Najwyższym współczynnikiem korelacji cechuje się stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego, a w dalszej kolejności temperatura powietrza, prędkość wiatru i gradient pionowy temperatury powietrza (tylko dla stacji w Ciosnach). Wykazano brak bezpośredniego związku z ciśnieniem atmosferycznym. Dla stacji w Ciosnach wystąpiła istotna zależność poziomu stężenia Rn-222 w powietrzu od wilgotności gruntu. W świetle jednoczesnego oddziaływania wielu czynników determinujących stężenie Rn-222 oraz w świetle skomplikowanej zmienności czasowej elementów meteorologicznych i ich wzajemnych powiązań, trudno o jednoznaczny wniosek, która z badanych zmiennych jest najistotniejsza dla stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza. To skłania do ostrożności w ostatecznej interpretacji rezultatów badań. Na trudności interpretacyjne w ocenie wpływu warunków pogodowych na aktywność promieniotwórczą radonu w dolnej troposferze zwraca uwagę wielu autorów, m.in. Hosler (1966), Porstendörfer i in. (1991), Hötzl i Winkler (1994), Winkler i in. (2001), Magalhães i in. (2003), Baciu (2005), Florea i Duliu (2012). Kopcewicz (1968, 1974). Kopcewicz wyraźnie podkreśla, że powodem niejednoznaczności wyników badań jest jednoczesne oddziaływanie na poziom stężenia Rn-222 w powietrzu procesu ekshalacji i turbulencji będących funkcją czasu przy współudziale wielu parametrów meteorologicznych. Część parametrów oddziałuje właśnie na tempo ekshalacji (np. stan gruntu, pokrywa śnieżna), a część na intensywność ruchów powietrza wynoszących Rn-222 do górnych warstw troposfery (np. temperatura powietrza, wiatr). Istotne są także zaburzenia okresowych zmian elementów pogody związanych z wymianą mas powietrza.

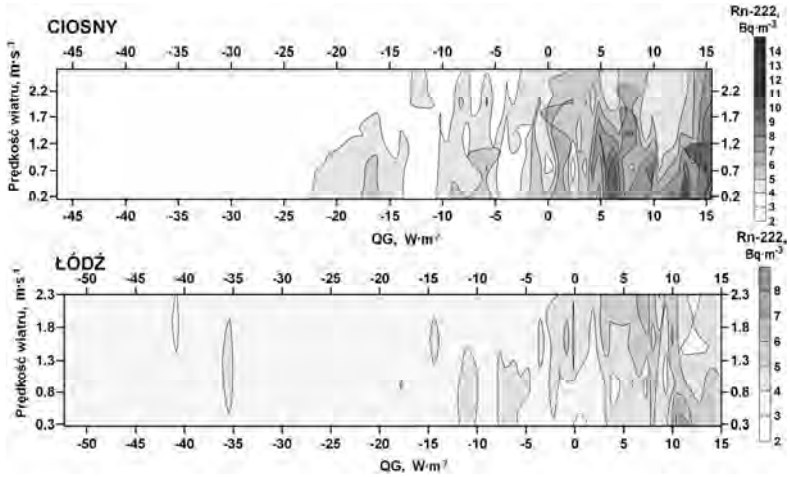
Celem kolejnego etapu badań prezentowanego w niniejszym rozdziale jest wyodrębnienie kompleksu elementów pogodowych, które wprowadzone jednocześnie do modelu regresji wielokrotnej najlepiej będą nadawać się do predykcji stężenia Rn-222. W analizie zastosowano metodę regresji wielokrotnej w oparciu o estymacje nieliniowe na podstawie następujących zmiennych me-

teorologicznych: prędkości wiatru, temperatury powietrza, różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m, strumienia ciepła glebowego (*QG*) i wilgotności gruntu (*VWC*). W analizie wieloparametrycznej pominięto ciśnienie atmosferyczne, którego rola, jak wykazano w rozdziale 5.2, była nieistotna dla zmienności stężenia Rn-222. W celu wyodrębnienia zespołu zmiennych meteorologicznych o największym wpływie na wyniki modelu zastosowano analizę regresji krokowej wstecznej polegającej na eliminacji poszczególnych zmiennych z modelu.

W badaniach szczególną uwagę poświęcono sprawdzeniu jaką rolę pełni prędkość wiatru i różnica temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m w oddziaływaniu z innymi zmiennymi na stężenie Rn-222. Bowiem w świetle doniesień z literatury turbulencja, której ważnymi składowymi są wiatr oraz pionowa równowaga termiczna atmosfery, uznawana jest za najbardziej znaczący czynnik kształtujący poziom stężenia Rn-222 w dolnej troposferze.

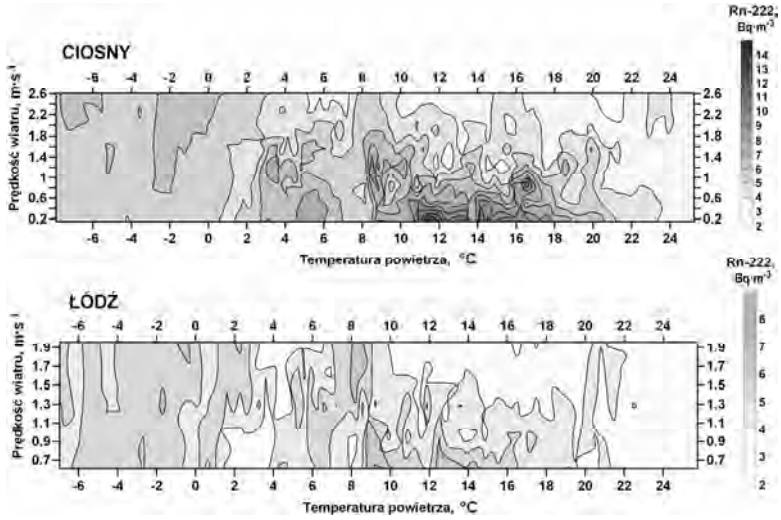
W analizie wieloparametrycznej wykorzystano dwa rodzaje danych pomiarowych: 1- miesięczne średnie godzinne wartości stężenia Rn-222 i pięciu wyżej wymienionych zmiennych meteorologicznych, rejestrowanych w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010, 2 - wartości godzinne stężenia Rn-222 i zmiennych meteorologicznych w okresie 22 dni (od 30.05.2008 r. do 20.06.2008 r.) - okres pogody wyżowej z regularnymi dobowymi zmianami badanych parametrów.

Na wstępie dokonano wizualizacji średniego godzinnego stężenia Rn-222 na tle poszczególnych par zmiennych meteorologicznych (rys. 5.55–5.64). Na wymienionych rysunkach prezentujących zależność zmienności stężenia Rn-222 od dwóch parametrów meteorologicznych generalnie ujawniają się wcześniej opisywane prawidłowości. Najwyższe średnie godzinne stężenie Rn-222 było obserwowane podczas dodatnich wartości *QG*, prędkościach wiatru poniżej 1 $m \cdot s^{-1}$, temperatury powietrza z przedziału 10–15°C, dodatnich różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m i niskiej wilgotności gruntu. Na obu stacjach prawidłowości zmian stężenia Rn-222 na tle elementów meteorologicznych są generalnie podobne, ale bardziej wyraźne relacje obserwuje się na stacji zamiejskiej. Są one lepiej zobrazowane w Ciosnach, m.in. z uwagi na większy zakres dobowych i rocznych zmian stężenia Rn-222.



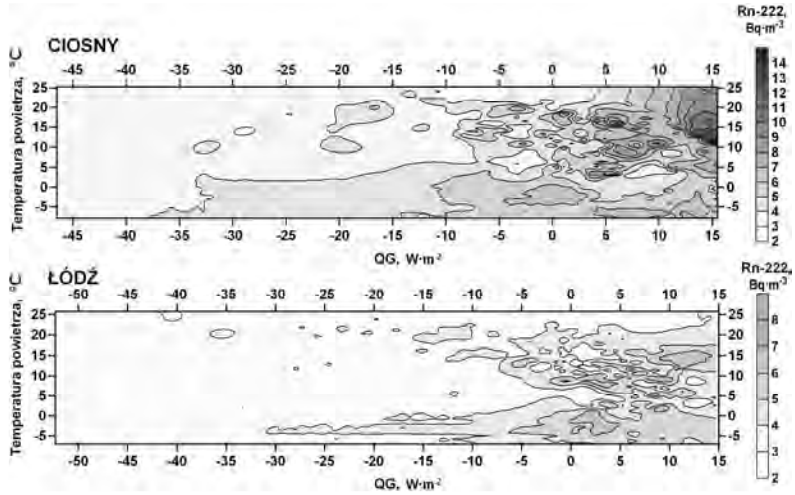
Rys. 5.55. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.55. Average Rn-222 concentration depending on the wind speed and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



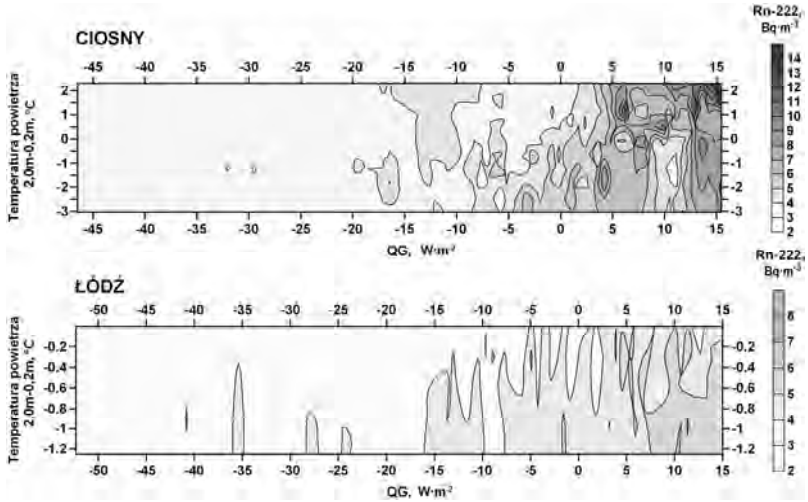
Rys. 5.56. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i temperatury powietrza w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.56. Average Rn-222 concentration depending on wind speed and air temperature in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



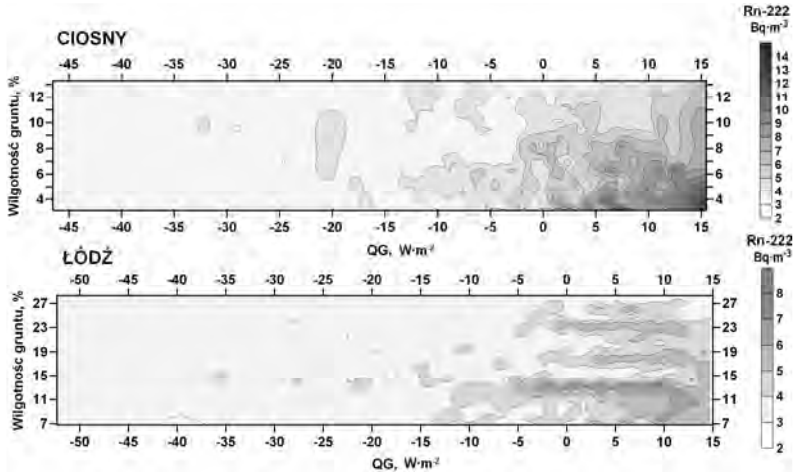
Rys. 5.57. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od temperatury powietrza i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.57. Average Rn-222 concentration depending on air temperature and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



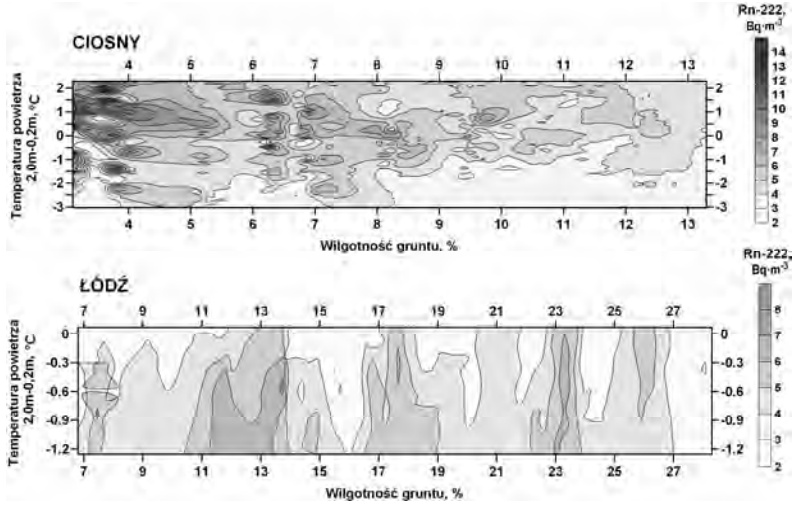
Rys. 5.58. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.58. Average Rn-222 concentration depending on the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



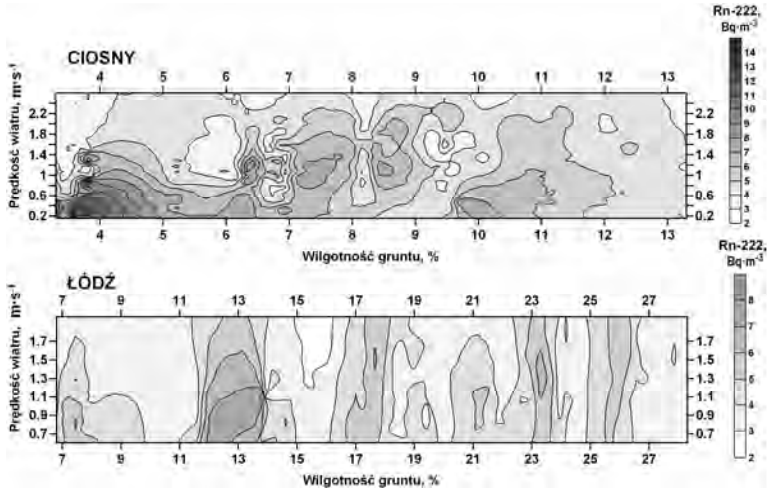
Rys. 5.59. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od wilgotności gruntu i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.59. Average Rn-222 concentration depending on soil moisture and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



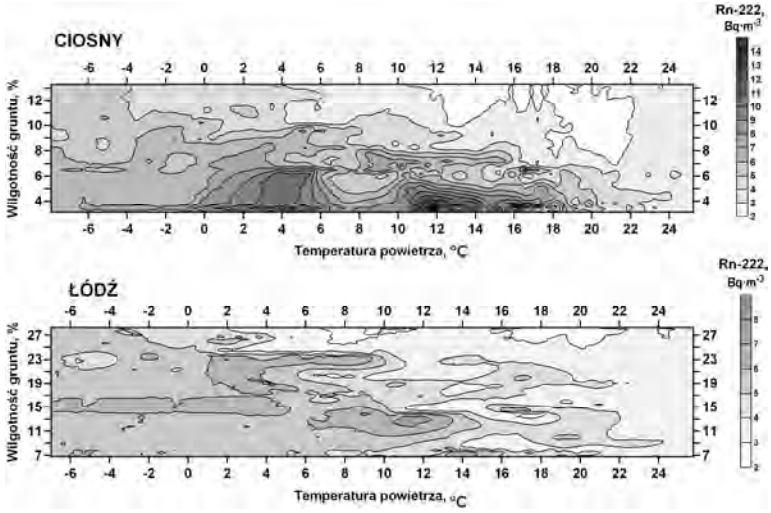
Rys. 5.60. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i wilgotności gruntu w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.60. Average Rn-222 concentration depending on the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and soil moisture in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



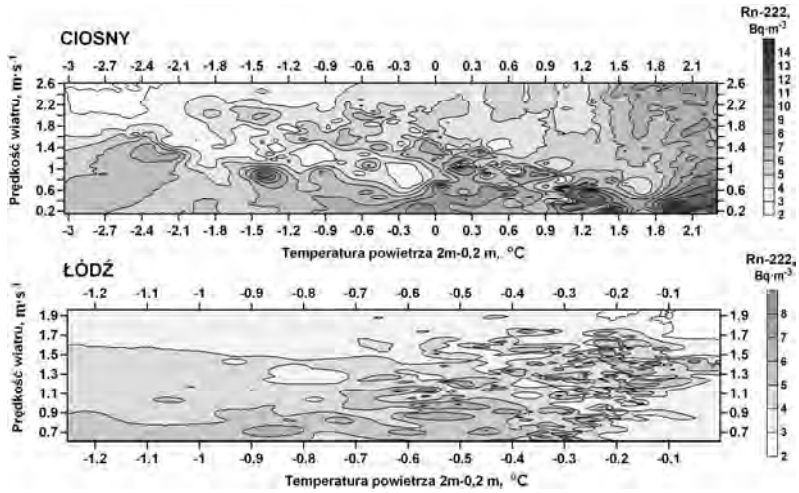
Rys. 5.61. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i wilgotności gruntu w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.61. Average Rn-222 concentration depending on the wind speed and soil moisture in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



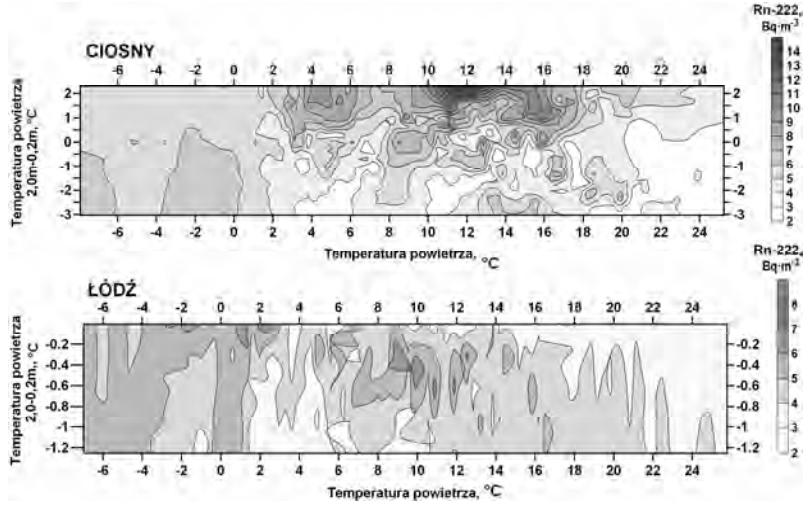
Rys. 5.62. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od wilgotności gruntu i temperatury powietrza w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.62. Average Rn-222 concentration depending on soil moisture and air temperature in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



Rys. 5.63. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.63. Average Rn-222 concentration depending on the wind speed and the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)



Rys. 5.64. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od różnicy temperatury powietrza w warstwie 2 m–0,2 m i temperatury powietrza na wysokości 2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach)

Fig. 5.64. Average Rn-222 concentration depending on the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and air temperature in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)

W pierwszym etapie analizy wieloparametrycznej wykorzystano wszystkie wybrane elementy meteorologiczne w konstrukcji modelu regresji w oparciu o estymację funkcją eksponencjalną (model I):

$$Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Q_G + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2m-0,2m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$$

Wszystkie współczynniki regresji w opisywanym modelu dla obu stacji są istotne statystycznie na poziomie ufności 95%, z wyjątkiem różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m (tab. 5.20). Na stacji zamiejskiej indeks zgodności Willmotta (d = 0,92) wskazuje na wysoki stopień dopasowania danych modelowych do empirycznych. W Łodzi prognostyczna wartość modelu jest niższa niż w Ciosnach, ale zadowalająca, tj. indeks Willmotta wynosił 0,76.

Tabela 5.20

Parametry modelu regresji wielokrotnej (estymacja funkcją eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ obliczone na podstawie średnich miesięcznych wartości godzinnych w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010. Kursywą zaznaczono błędy standardowe estymacji

Table 5.20

Multiple regression model parameters (exponential function estimation $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ based on an monthly average hourly values in Ciosny and Łódź in 2008–2010. Italics - standard errors of estimation

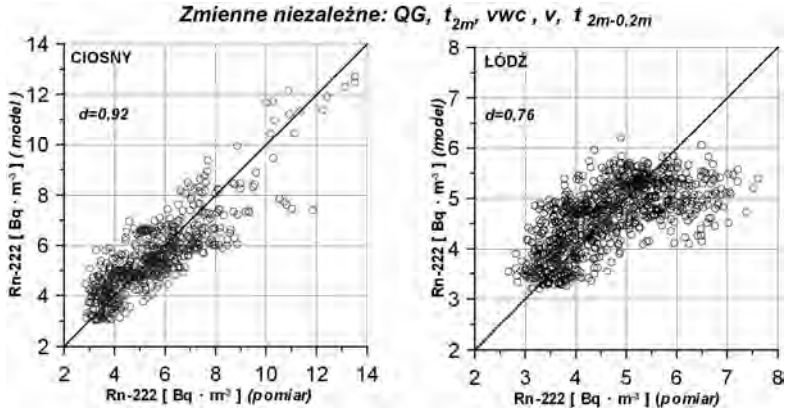
	a_1	a_2	a_3 (Q_G, $W \cdot m^{-2}$)	a_4 (t_{2m}, °C)	a_5 ($t_{2,0\,m-0,2\,m}$, °C)	a_6 (v, $m \cdot s^{-1}$)	a_7 (VWC, %)
Ciosny	2,175	2,965	0,069	–0,027	–0,035*	0,119	–0,176
	0,110	*0,160*	*0,006*	*0,003*	*0,024*	*0,059*	*0,012*
Łódź	1,022	3,120	0,046	–0,037	–0,273	0,220	–0,043
	0,165	*0,170*	*0,008*	*0,005*	*0,079*	*0,100*	*0,006*

*współczynnik nieistotny statystycznie na poziomie 0,05

W kolejnym etapie badań, poszukując odpowiedzi na pytanie jaki układ współoddziałujących zmiennych meteorologicznych pozostaje w najsilniejszym statystycznym związku ze stężeniem Rn-222, zastosowano krokową analizę regresji, eliminując zmienne z I modelu i oceniając stopień dopasowania danych modelowych do danych empirycznych na podstawie wartości indeksu Willmotta (Dobosz 2004, Willmott 1982). Dodatkowym celem tej analizy było znalezienie optymalnego modelu regresji w oparciu o kilka zmiennych meteorologicznych. W analizie kierowano się zasadą, że w optymalnym modelu

powinny znaleźć się zmienne o najwyższym współczynniku korelacji ze zmienną zależną oraz słabo powiązane ze sobą.

Najwyższym współczynnikiem zgodności wartości pomiarowych i obliczonych na stacji w Ciosnach i w Łodzi cechował się model oparty o pięć zmiennych (tab. 5.21, rys. 5.65). Podobnie wysoki indeks zgodności cechuje model oparty o trzy zmienne niezależne, tj. *QG*, t_{2m}, *VWC* (d_{Ciosny} = 0,91, $d_{Łódź}$ = 0,75). W Ciosnach eliminacja z modelu temperatury powietrza, prędkości wiatru lub różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m zasadniczo nie zmienia jego wyniku, natomiast wycofanie *QG* lub wilgotności gruntu obniża dopasowanie wyników modelu do danych pomiarowych. Na stacji zamiejskiej najniższym stopniem dopasowania charakteryzował się model w oparciu o wilgotność gruntu i prędkość wiatru (d_{Ciosny} = 0,72). W Łodzi najgorsze wyniki dał model w oparciu o wilgotność gruntu i różnicę temperatury powietrza ($d_{Łódź}$ = 0,08), dyskwalifikując tę parą zmiennych jako predykatory stężenia Rn-222 (tab. 5.21).



Rys. 5.65. Doświadczalne i modelowane wartości stężenia Rn-222 na podstawie 5 zmiennych niezależnych (*QG* - strumień ciepła glebowego, t_{2m} - temperatura powietrza, *VWC* - wilgotność gruntu, *v*- prędkość wiatru, $t_{2\,m–0,2\,m}$ - różnica temperatury w warstwie 1,8 m) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie miesięczne wartości godzinne)

Fig. 5.65. Experimental and modeled values of Rn-222 concentration from 5 independent variables (*QG* - soil heat flux, t_{2m} - air temperature, *VWC* - soil moisture, *v* - wind speed, $t_{2\,m–0,2\,m}$ - difference of temperature in the layer 1.8 m) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations)

Metodę analizy wieloparametrycznej zastosowano także do estymacji przebiegu dobowego radonu w Ciosnach w wybranym okresie, tj. 30.05.–20.06.2008 r. Był to okres regularnych dobowych zmian stężenia Rn-222

i elementów meteorologicznych, cechujący się dużą amplitudą wahań dobowych badanych zmiennych. Maksymalne stężenie Rn-222 osiągnęło w tym okresie wartość 35 Bq·m^{-3}. Pogodę w Polsce w pierwszych 12 dniach badanego okresu kształtował układ wysokiego ciśnienia z centrum nad Skandynawią. Dominował typ pogody bezchmurnej z rozpogodzeniami w nocy, bez opadów. Od 11.06.2008 r. nastąpiła przebudowa pola barycznego nad europejskim obszarem synoptycznym i nad Polską dominowały płytkie układy niżowe znad Skandynawii z mało aktywnymi frontami (napływ polarnego powietrza o cechach morskich, niewielkie opady tylko w strefie frontów). Maksymalna temperatura powietrza na stacji w Ciosnach w analizowanym okresie wynosiła od 18,0°C do 29,0°C, a przeciętna prędkość wiatru to 0,7 m·s^{-1}.

Tabela 5.21

Indeks zgodności Willmotta dla wybranych modeli regresji w oparciu o funkcję eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$·w Łodzi i Ciosnach. Opracowano na podstawie średnich miesięcznych wartości godzinnych

Table 5.21

Willmott agreement index for selected regression models based on the exponential function $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ in Łódź and Ciosny. Prepared on the basis of monthly average hourly values

Zmienne niezależne w modelu stężenia Rn-222	**Ciosny** ***d***	**Łódź** ***d***
(5) QG, t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v, VWC	0,92	0,76
(4) t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v, VWC	0,86	0,71
(4) QG, t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v	0,82	0,72
(4) QG, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v, VWC	0,90	0,71
(3) QG, t_{2m}, VWC	0,91	0,75
(3) QG, $t_{2\,m-0,2\,m}$, VWC	0,89	0,69
(3) t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v	0,77	0,66
(2) QG, VWC	0,89	0,68
(2) QG, v	0,82	0,68
(2) QG, t_{2m}	0,81	0,70
(2) QG, $t_{2\,m-0,2\,m}$	0,80	0,68
(2) VWC, t_{2m}	0,76	0,65
(2) VWC, $t_{2\,m-0,2\,m}$	0,77	0,08
(2) VWC, v	0,72	0,34
(2) v, t_{2m}	0,75	0,64
(2) v, $t_{2\,m-0,2\,m}$	0,74	0,30

W analizie zastosowano podobną procedurę obliczeniową jak w przypadku opisywanych miesięcznych średnich godzinnych wartości, wprowadzając do pierwszego modelu 5 zmiennych. Spośród analizowanych parametrów meteorologicznych wszystkie współczynniki regresji z wyjątkiem współczynnika dla wilgotności gruntu są istotne statystycznie (tab. 5.22). Indeks zgodności danych dla tego typu modelu wyniósł 0,88. Z przebiegu dobowego wartości pomiarowych stężenia Rn-222 i modelowanych wynika, że model generalnie zaniża wartości maksymalne i podwyższa nieznacznie minimalne stężenia w ciągu doby (rys. 5.66). Wsteczna analiza krokowa regresji wykazała, że najmniej do wyników modelu wniosła wartość różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i wilgotność gruntu. Eliminacja tych zmiennych nie pogorszyła wyników modelu (tab. 5.23). Spośród modeli dwuparametrycznych najlepsze wyniki, zbliżone do modelu 5 parametrycznego dał model w oparciu o *QG* (zamiennie z temperaturą powietrza) i prędkość wiatru (tab. 5.23).

Tabela 5.22

Parametry modelu regresji wielokrotnej (estymacja funkcją eksponencjalną typu
$Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$
obliczone na podstawie godzinnych danych w Ciosnach w okresie 30.05.–20.06.2008 r.
Kursywą zaznaczono błędy standardowe estymacji

Table 5.22

Multiple regression model parameters (exponential function estimation
$Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$
based on an hourly data in Ciosny in the period 30th May–20th June 2008.
Italics - standard errors of estimation

a_1	a_2	a_3 (Q_G, $W \cdot m^{-2}$)	a_4 ($t_{2\,m}$, °C)	a_5 ($t_{2,0\,m-0,2\,m}$, °C)	a_6 (v, $m \cdot s^{-1}$)	a_7 (VWC, %)
2,185	3,122	0,041	–0,060	–0,047	–1,022	4,777*
0,260	*0,326*	*0,009*	*0,012*	*0,017*	*0,212*	*2,848*

*współczynnik nieistotny statystycznie na poziomie 0,05

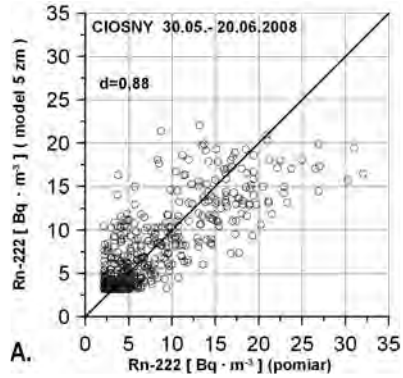
Tabela 5.23

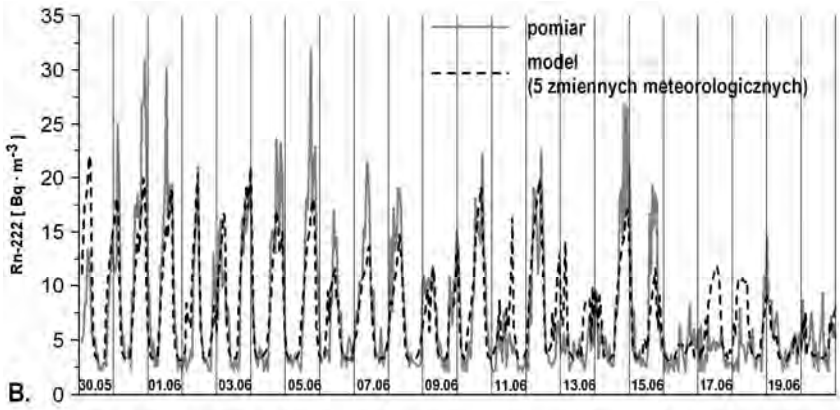
Indeks zgodności Willmotta dla wybranych modeli regresji w oparciu o funkcję eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ w Ciosnach w okresie 30.05.–20.06.2008 r. Opracowano na podstawie danych co 1 godz.

Table 5.23

Willmott agreement index for selected regression models based on the exponential function $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$in Ciosny in the period 30th May–20th June 2008. Prepared on the basis of the data at 1 hr.

Zmienne niezależne w modelu stężenia Rn-222	**Ciosny** ***d***
(5) QG, t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v, VWC	0,88
(4) t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v, VWC	0,87
(4) QG, t_{2m}, $t_{2\,m-0,2\,m}$, v	0,88
(3) QG, t_{2m}, v	0,87
(2) QG, t_{2m}	0,87
(2) QG, v	0,86
(2) v, t_{2m}	0,86
(2) v, $t_{2\,m-0,2\,m}$	0,74





Rys. 5.66. A. Doświadczalne i modelowane godzinne stężenie Rn-222 na podstawie 5 zmiennych niezależnych, tj. strumienia ciepła glebowego (*QG*), prędkości wiatru (*v*), temperatury powietrza (t_{2m}), różnicy temperatury powietrza w warstwie 1,8 m ($t_{2\ m-0,2\ m}$), wilgotności gruntu (*VWC*) w Ciosnach w okresie 30.05.–20.06.2008 r.; B. Przebieg dobowy pomiarowych wartości stężenia Rn-222 na tle wartości modelowanych w Ciosnach w badanym okresie; d - indeks zgodności Willmotta

Fig. 5.66. A. Experimental and modeled hourly Rn-222 concentration on the basis of five independent variables, that is the soil heat flux (*QG*), wind speed (*v*), air temperature (t_{2m}), the difference in air temperature in the layer 1.8 m ($t_{2\ m-0,2\ m}$), soil moisture (*VWC*) in the period 30th May–20th June 2008 in Ciosny; B. Daily course of experimental Rn-222 concentration on the background of modeled values in Ciosny in the analysed period; d - the index of agreement by Willmott

5.6. Różnice stężenia Rn-222 między centrum Łodzi a terenem zamiejskim

Odrębność klimatyczna obszarów zurbanizowanych to cecha wyraźnie wyróżniająca je ze środowiska geograficznego. Indywidualizm klimatu miasta wynika przede wszystkim ze zmienionych cech podłoża, tj. przeważającego udziału powierzchni sztucznych o dużej pojemności cieplnej nad powierzchniami naturalnymi, geometrycznej struktury zabudowy oraz mniejszych strat ciepła na parowanie, zanieczyszczenia powietrza poprzez pyły i gazy - głównie CO_2, emisji ciepła sztucznego do atmosfery (Landsberg 1981, Oke 1995).

Głównym przejawem odrębności klimatu miasta jest wzrost temperatury powietrza w stosunku do otaczających obszarów zamiejskich. Nadwyżka ciepła w mieście intensyfikuje procesy konwekcyjne, co prowadzi do wzrostu zachmurzenia i opadów. Wzrost ten może ujawniać się poprzez intensyfikację procesów burzowych i opadów o charakterze konwekcyjnym. Miasto poprzez wzrost szorstkości aerodynamicznej wpływa modyfikująco na pole wiatru, zmniejszając jego prędkość i zmieniając kierunek. W Łodzi redukcja prędkości wiatru w stosunku do obszarów zamiejskich wynosi 35–40% (Fortuniak i in. 2006). W specyficznych warunkach pogodowych (sytuacje antycyklonalne ze słabym wiatrem ogólnej cyrkulacji) silny rozwój konwekcji może generować tzw. bryzę miejską (napływ do wnętrza miasta chłodniejszego powietrza z obszarów podmiejskich), a tym samym wzrost prędkości wiatru w mieście. To zjawisko ma znaczenie dla dyspersji zanieczyszczeń i może polepszać stan sanitarny powietrza o ile nie ma emiterów zanieczyszczeń na peryferiach miasta. Za kolejną specyficzną cechę klimatu miasta odpowiedzialny jest aerozol miejski - przyczynia się on do wzrostu zamglenia, silniejszego pochłaniania i rozpraszania promieniowania słonecznego. Największe osłabienie promieniowania dotyczy ultrafioletowej części widma (Oke 1995). Miasto także wpływa na wilgotność powietrza, co jest procesem bardziej złożonym w stosunku do temperatury powietrza - generalnie absolutna zawartość pary wodnej jest wyższa za miastem w ciągu dnia, a w ciągu nocy sytuacja jest odwrotna w wyniku intensywnej kondensacji pary wodnej na terenie niezurbanizowanym (Fortuniak 2010).

Najlepiej poznaną osobliwością klimatu miasta jest zjawisko miejskiej wyspy ciepła (UHI – urban heat island), opisane po raz pierwszy w literaturze przez Lucka Howarda na podstawie badań temperatury powietrza w Londynie w latach 1807–1816 (Howard 1833). W sprzyjających warunkach atmosferycznych, podczas bezchmurnej i bezwietrznej pogody wzrost temperatury powietrza w mieście w stosunku do terenów otaczających może sięgać kilkunastu stopni. Miejska wyspa ciepła wywołuje różne klimatyczne skutki wtórne, m.in. ożywienie wymiany pionowej powietrza w postaci intensywnej turbulen-

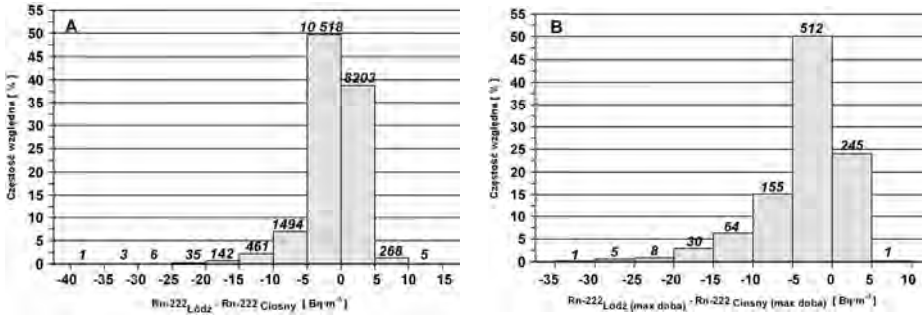
cji termicznej i konwekcji, powstanie wyżej opisanej cyrkulacji o charakterze „bryzy miejskiej”, szybszy zanik pokrywy śnieżnej itp.

Studia eksperymentalne nad UHI w Łodzi rozpoczęto w latach 60. XX w. Położenie geograficzne miasta (brak w otoczeniu zbiorników wodnych, rzeki, małe deniwelacje terenu od 180 m do 270 m n.p.m.) oraz wielkość i struktura zabudowy (gęsta zabudowa centrum o udziale powierzchni sztucznych 90–100% z jednorodną warstwą dachową na wysokości 15–20 m) tworzą wyjątkowo korzystny poligon dla badań indywidualności klimatu obszarów zurbanizowanych na tle innych miast Polski. Łódź cechuje się także dużą emisją ciepła sztucznego do atmosfery, porównywalną z emisją ciepła wielkich miast Europy i Ameryki. W centrum Łodzi średni roczny strumień ciepła może przewyższać 100 $W \cdot m^{-2}$, a w miesiącach zimowych dopływ ciepła antropogenicznego jest większy od ilości ciepła słonecznego docierającego do powierzchni czynnej (Kłysik 1996).

W Łodzi zarejestrowano najwyższe w Polsce natężenie miejskiej wyspy ciepła sięgające 12°C - takie rekordowe różnice temperatury powietrza między miastem a terenem zamiejskim obserwowano w niewielu miastach na świecie (Kłysik, Fortuniak 1999). W dużych miastach polskich najwyższe wartości UHI, w sprzyjających dla tego zjawiska warunkach pogodowych, wynoszą najczęściej 5–8°C. Poza Łodzią, wyższe niż 8°C natężenie UHI wystąpiło w Warszawie (10,4°C) i Wrocławiu (8,4°C) (za Fortuniakiem 2010). Miejska wyspa ciepła ma wybitnie dynamiczny charakter cechujący się rytmem dobowym i rocznym. Maksimum dodatnich kontrastów termicznych między miastem a terenem zamiejskim przypada na godziny nocne, a różnice temperatury zanikają po wschodzie Słońca. W Łodzi, dodatnie różnice temperatury na korzyść miasta występują przez około 75% dni w roku, a średnia miesięczna wartość UHI w Łodzi nie przekracza 2°C. W średnim przebiegu rocznym największe kontrasty termiczne występują latem, a najmniejsze zimą. W zimie rzadziej występują warunki do tworzenia trwałej nadwyżki ciepła, z uwagi na często panujące warunki pogodowe z dużym zachmurzeniem i silnym wiatrem - przy prędkości wiatru powyżej 4 ms^{-1} UHI zanika (wpływ atlantyckich cyklonów z frontami atmosferycznymi). Przypadki ekstremalnej nadwyżki ciepła w Łodzi, rzędu 8–9°C, a nawet 12°C, są jednak najczęściej obserwowane zimą podczas adwekcji chłodu, bezchmurnej i bezwietrznej pogodzie i dużej emisji ciepła sztucznego (Kłysik i Fortuniak 1999, Fortuniak 2003, Fortuniak i Kłysik 2004, Fortuniak i in. 2006).

Opisana specyfika klimatu obszarów zurbanizowanych oraz osobliwości klimatu Łodzi były przesłanką do poszukiwań odpowiedzi na pytanie o wpływ lokalnego zróżnicowania warunków atmosferycznych na stężenie promieniotwórcze radonu. Zatem kolejnym zagadnieniem badawczym prezentowanym

w rozdziale 5 niniejszej pracy są wyniki analizy różnic stężenia radonu między centrum Łodzi a stacją w Ciosnach na tle elementów meteorologicznych. W tym wątku badań poszukiwano odpowiedzi na następujące pytania: jaki jest charakter i częstość różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach; jakie są cechy zmienności tych różnic w cyklu dobowym i rocznym; jakie makroskalowe warunki meteorologiczne sprzyjają wzrostowi różnic stężenia tego radionuklidu między stacjami; jaki jest przebieg różnic koncentracji tego radionuklidu na stacjach na tle temperatury powietrza; jaki jest przebieg różnic temperatury powietrza w warstwie 0,2–2,0 m oraz prędkości wiatru; czy zjawisko miejskiej wyspy ciepła zarejestrowane w latach 2008–2010 i jego konsekwencje m.in. w postaci „bryzy miejskiej" wpływają na poziom koncentracji Rn-222 w Łodzi; jakie stężenie tego radionuklidu występuje w tym czasie na obszarze zamiejskim.



Rys. 5.67. Częstość względna oraz liczba przypadków różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach w latach 2008–2010 (A - wszystkie wartości, B - wartości maksymalne dobowe)

Fig. 5.67. Relative frequency and the number of cases of Rn-222 concentration differences between Łódź and Ciosny stations in 2008–2010 (A - all values, B - maximum daily values)

Analizy częstości różnic stężenia Rn-222 między centrum Łodzi a stacją w Ciosnach dokonano na podstawie całej serii pomiarów godzinnych oraz w oparciu o różnice maksymalnych dobowych średnich godzinnych stężeń Rn-222. W szeregach danych dominowały wartości ujemne, co oznaczało większą frekwencję wyższych stężeń na stacji zamiejskiej. W przypadku całej serii pomiarów ujemne różnice stanowią 60% przypadków, a wśród różnic maksymalnych dobowych stężeń ujemne wartości mają aż 76% udziału (rys. 5.67). Histogram częstości dla obu serii danych wskazuje na największą frekwencję przedziału –5–0 $Bq \cdot m^{-3}$ i lewostronną skośność rozkładu. Różnice

wartości godzinnych zmieniają się w zakresie od –35 Bq·m^{-3} (31.05.2009, godz. 08.00) do 12 Bq·m^{-3} (31.12.2008, godz. 12.00), a różnice między dobowymi maksimami od –33 Bq·m^{-3} (31.05.2009, godz. 08.00) do 6 Bq·m^{-3} (09.11.2008, godz. 05.00).

W przebiegu rocznym różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją zamiejską obserwowana jest duża zmienność z dnia na dzień i znaczący wzrost udziału wartości ≤ –10 Bq·m^{-3} w miesiącach letnich. Wartości ≤ –20 Bq·m^{-3} występują od kwietnia do września (rys. 5.68, tab. 5.24).

Tabela 5.24

Częstość względna różnic stężenia Rn-222 ≤ –10 Bq·m^{-3} między Łodzią a stacją w Ciosnach w poszczególnych miesiącach w latach 2008–2010 (a); absolutne maksimum godzinnych różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach (b)

Table 5.24

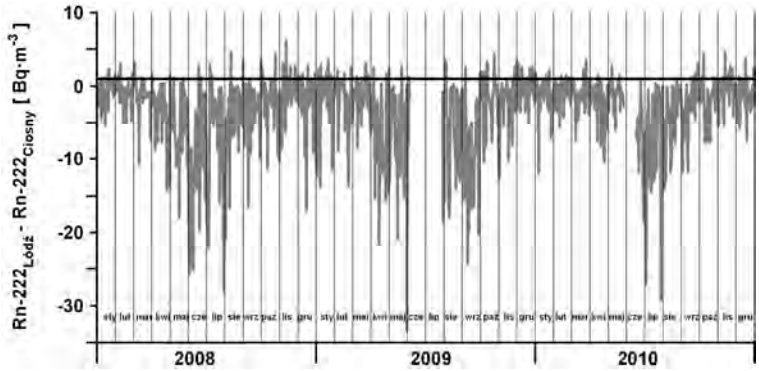
Relative frequency of Rn-222 concentration differences ≤ –10·Bq m^{-3} between Łódź and Ciosny stations in each month in 2008–2010 (a); absolute maximum hourly Rn-222 concentration differences between Łódź and Ciosny stations (b)

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2008	**a**	0,0	0,1	0,5	3,2	4,3	14,0	10,0	2,0	2,0	3,0	0,5	2,0
	b	-9,0	-10,0	-14,0	-17,0	-21,0	-28,0	-31,0	-23,0	-24,0	-19,0	-16,0	-18,0
2009	**a**	1,2	1,2	0,1	6,8	5,7	-*	-	7,0	12,2	1,5	1,4	-
	b	-19,0	-16,0	-10,0	-23,0	-35,0	-	-	-22,0	-26,0	-17,0	-16,0	-
2010	**a**	0,7	0,3	-	0,6	0,2	5,4	7,9	3,0	1,3	1.7	0,1	0,4
	b	-13,0	-12,0	-9,0	-14,0	-11,0	-20,0	-33,0	-18,0	-16,0	-18,0	-11,0	-14,0

* brak danych

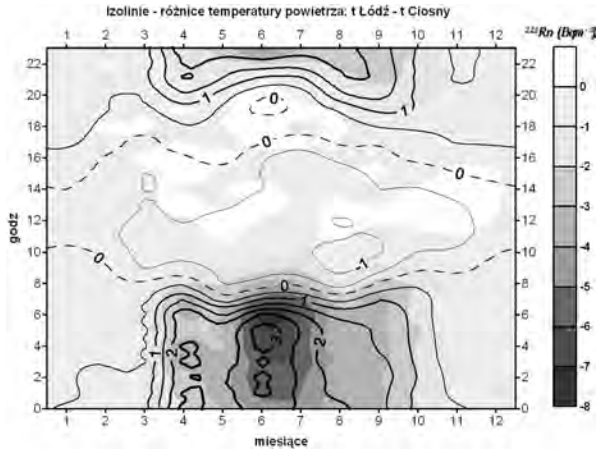
Udział dodatnich różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach, jak wyżej opisano, jest wyraźnie mniejszy i cechuje generalnie chłodną porę roku (rys. 5.68). Okres jesienno-zimowy w związku ze zwiększoną aktywnością cyklonalną charakteryzuje się wzrostem prędkości wiatru ogólnej cyrkulacji w Polsce. Miasto ze względu na zwiększony współczynnik szorstkości aerodynamicznej, a tym samym osłabienie przepływu powietrza może być bardziej uprzywilejowane w okresie silnych wiatrów do wzrostu stężenia Rn-222 niż stacja w Ciosnach. Średnie miesięczne różnice stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją zamiejską obliczone dla poszczególnych godzin wskazują na wzrost różnic w godzinach nocnych i zanik w ciągu dnia we wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy (rys. 5.69). Przebieg dobowy stężenia Rn-222 ze zwróceniem uwagi na występujące różnice wartości między stacjami był przedmiotem analiz prezentowanych we wcześniejszych rozdziałach pracy, zatem zosta-

nie w tym miejscu pominięty. Należy jednak zaakcentować wyraźny ujemny charakter różnic stężenia dominujący niemal przez całą dobę we wszystkich miesiącach. Największa średnia godzinna przewaga stężenia Rn-222 w Ciosnach w stosunku do miasta przypadała w czerwcu o godz. 06.00 średnio ok. –8,0 Bq·m^{-3} (rys. 5.69).



Rys. 5.68. Różnice maksymalnego dobowego stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach w latach 2008–2010

Fig. 5.68. Differences in daily maximum of Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground between the centre of Łódź and the rural station in Ciosny in 2008–2010



Rys. 5.69. Przebieg roczny zmienności dobowej różnic stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach na tle różnic temperatury powietrza między stacjami w latach 2008–2010

Fig. 5.69. Annual course of daily variability of Rn-222 concentration differences in the air 2 m above the ground between the centre of Łódź and the rural station in Ciosny on the background of the air temperature differences between the stations in 2008–2010

W celu odpowiedzi na pytanie o makroskalowy czynnik pogodowy determinujący lokalne zróżnicowanie stężenia Rn-222 zbadano charakter cyrkulacji i kierunki adwekcji mas powietrza w dniach z różnicą stężenia Rn-222 ≤ –10 Bq·m^{-3} między Łodzią a stacją w Ciosnach. W analizowanych latach 2008–2010 liczba dni o danym progu różnic stężenia Rn-222 między stacjami wynosiła 204, tj. 19%. W badanej grupie dni cyrkulacja antycyklonalna dominowała, ze swym udziałem 71%, nad cyrkulacją cyklonalną. Wśród kierunków adwekcji mas powietrza najbardziej sprzyjające do koncentracji Rn-222 za miastem i kształtowania różnic stężeń miasto–obszar zamiejski (≤ –10 Bq·m^{-3}) był kierunek E i S podczas cyrkulacji antycyklonalnej. Najrzadziej takie różnice stężenia Rn-222 występowały podczas cyrkulacji cyklonalnej z adwekcją powietrza z sektora NW i N (tab. 5.25). Cyrkulację atmosferyczną, tak jak wspomniano we wcześniej prezentowanych wynikach badań na łamach tego opracowania oraz innych (np. Podstawczyńska i Piotrowski 2010a, 2010b), należy traktować w dwóch aspektach – jako czynnik sprzyjający ujawnieniu się lokalnego zróżnicowania warunków meteorologicznych oraz jako czynnik transportu atmosferycznego radionuklidu z dalszych terenów na miejsce pomiarów. Kierunek adwekcji E i S, przy którym rejestrowano wzrost stężenia Rn-222 za miastem, wskazuje na kontynentalny rodowód mas powietrza nasycających się od podłoża radonem. Transport Rn-222 z miejsc o większym potencjale radonowym (np. teren Azji) niż środkowa Polska mógł mieć wkład we wzrost stężenia Rn-222 za miastem i zwiększanie ujemnych różnic stężenia tego radionuklidu między badanymi stacjami. Istotne znaczenie dla powstania tych różnic miała także druga składowa stężenia Rn-222 w danym miejscu, wyraźnie ujawniająca się w sytuacjach antycyklonalnych, tj. zróżnicowanie mikroklimatu otoczenia stacji pomiarowych, co będzie omówione w dalszej części tego rozdziału.

Tabela 5.25

Częstość względna kierunków wiatru geostroficznego podczas cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej w dniach z różnicą stężenia Rn-222 ≤ –10 Bq·m^{-3} między Łodzią a stacją w Ciosnach w latach 2008–2010

Table 5.25

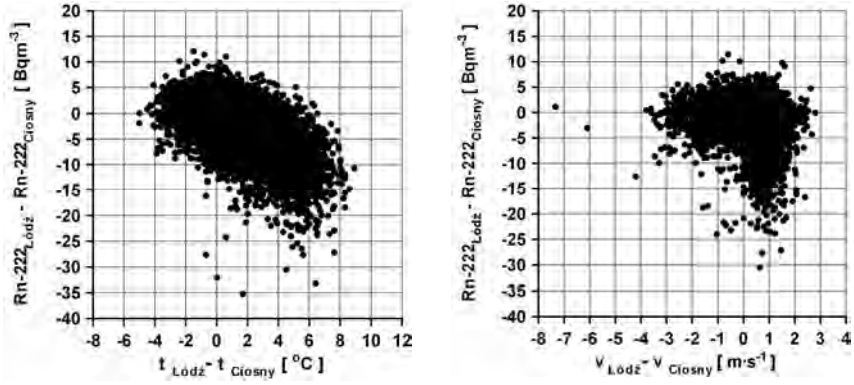
Relative frequency of geostrophic wind directions during anticyclonic and cyklonic circulation in the days with difference in Rn-222 concentration ≤ –10 Bq·m^{-3} between Łódź and Ciosny stations in 2008–2010

Cyrkulacja	**N**	**NE**	**E**	**SE**	**S**	**SW**	**W**	**NW**
Antycyklonalna	2,5	8,8	14,7	8,8	11,2	8,3	9,3	7,4
Cyklonalna	2,0	2,5	6,4	5,4	4,4	4,9	2,5	0,9

Analiza map synoptycznych w dniach z ekstremalnymi różnicami stężenia Rn-222 ≤ –20 Bq·m^{-3} wykazała, iż typ pogody panujący w tym czasie w Polsce (okres wiosenno-letni) był kształtowany przez ośrodki wysokiego ciśnienia z centrum nad Skandynawią - bezchmurnie, wiatr ogólnej cyrkulacji 1–2 m·s^{-1}. Takie warunki atmosferyczne sprzyjały znacznym kontrastom termicznym między badanymi stacjami i wykształceniu zjawiska miejskiej wyspy ciepła o dużym natężeniu (np. 8,9°C, 30.04.2009, godz. 04.00). Nadwyżce ciepła towarzyszyło znaczne zróżnicowanie przebiegu elementów meteorologicznych na badanych stacjach (różnic temperatury w warstwie przygruntowej powietrza, prędkości wiatru). To były przesłanki do szczegółowej analizy różnic stężenia Rn-222 w odniesieniu do spektakularnej cechy klimatu obszarów zurbanizowanych jaką jest miejska wyspa ciepła. To zagadnienie było już przedmiotem wstępnych analiz, których wyniki opisano w publikacjach m.in. Podstawczyńska i in. 2010, Podstawczyńska i Piotrowski 2010a, 2010b. Na rys. 5.69 przedstawiono średnią miesięczną dobową zmienność różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach na tle różnic temperatury powietrza. Przebieg izoterm ilustrujących najwyższe natężenie średniej godzinnej miejskiej wyspy ciepła nawiązuje do przebiegu największych różnic stężenia Rn-222. Przeciętnie największa nadwyżka ciepła w mieście występowała w czerwcu w drugiej połowie nocy i przed wschodem Słońca. Na ten miesiąc oraz tę porę doby przypadała największa różnica stężenia Rn-222 między stacjami na korzyść stacji zamiejskiej (rys. 5.69). Wykres korelacyjny między miejską wyspą ciepła a różnicami stężenia Rn-222 potwierdza zaobserwowaną relację, tj. ujemne różnice stężenia między Łodzią a stacją w Ciosnach generalnie wzrastają wraz ze wzrostem nadwyżki ciepła w mieście. Najwyższe różnice ujemne stężenia, ≤ –20 Bq·m^{-3}, przypadały w okresie największego natężenia UHI (rys. 5.70). Analiza korelacyjna różnic stężenia Rn-222 z różnicami prędkości wiatru zilustrowana na rys. 5.70 wykazała, że w czasie maksymalnych ujemnych różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją zamiejską, prędkość wiatru w mieście była wyższa niż na obszarze niezurbanizowanym. Jest to zjawisko znane w literaturze jako „bryza miejska”, występujące w czasie dużych kontrastów termicznych miasto–obszar zamiejski.

W dalszym etapie analizy porównano przebiegi dobowe stężenia Rn-222 na tle zmian temperatury powietrza, prędkości wiatru i różnic temperatury w warstwie powietrza 2,0 m–0,2 m w 3 grupach dni, tj. z miejską wyspą ciepła o wartościach > 3°C i > 5°C oraz w dniach z różnicą temperatury powietrza < 1°C między Łodzią a stacją w Ciosnach. Liczbę dni z wymienionymi różnicami temperatury powietrza wyznaczono stosując niestandardowy przedział 24–godzinny od południa do południa z uwagi na specyfikę zjawiska miejskiej wyspy ciepła. W ten sposób wykluczono zaliczanie danej UHI, której maksi-

mum przypada w nocy, do dwóch kolejnych dób (Fortuniak 2003). Frekwencja dni z miejską wyspą ciepła o wartości > 3°C i > 5°C w badanym okresie wynosiła odpowiednio 33% (362 dni) i 12% (135 dni). W latach 2008–2010 największe różnice temperatury powietrza między centrum Łodzi a stacją zamiejską wystąpiły w nocy z 29 na 30 kwietnia 2009 r. - 8,9°C. Dni z różnicą temperatury powietrza < 1°C między stacjami odnotowano 23% (253 dni).

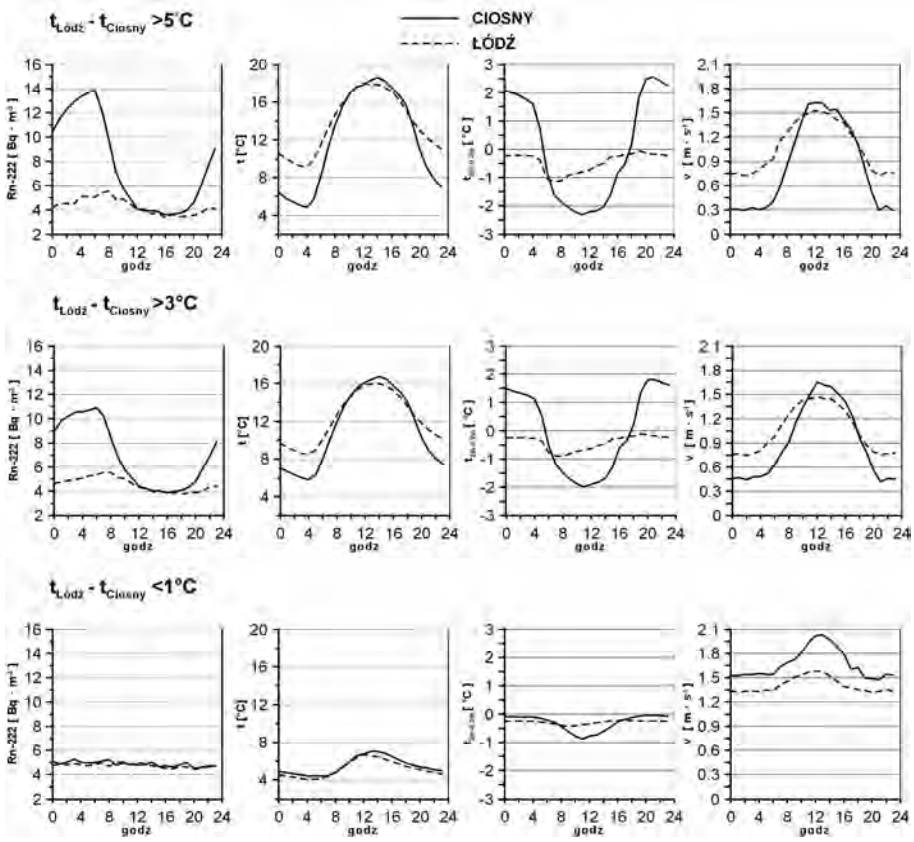


Rys. 5.70. Różnice stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach w zależności od różnicy temperatury (*t*) powietrza w latach 2008–2010 oraz różnicy prędkości wiatru (*v*) w latach 2008 i 2010

Fig. 5.70. Differences in Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground between the centre of Łódź and rural station in Ciosny depending on the air temperature difference (*t*) in 2008–2010 and wind speed difference (*v*) in the years 2008 and 2010

W tabeli 5.26 przedstawiono średnie wartości stężenia Rn-222 i wybranych elementów meteorologicznych oraz ich zakres wahań dobowych w analizowanych 3 grupach dni. Dane te dają ogólny pogląd na zróżnicowanie warunków mikroklimatycznych panujących na badanych stacjach w wybranych dniach. Ogólną prawidłowością jest, że różnice stężenia Rn-222 między stacjami ujawniają się w dniach z kontrastami termicznymi miasto–obszar zamiejski > 3°C i > 5°C, które występują w ciepłej porze roku. Tym kontrastom termicznym w badanym okresie towarzyszą znaczne amplitudy dobowe temperatury powietrza (za miastem aż 13,8°C) oraz znaczny (ok. 5°C) zakres wahań różnic temperatury w warstwie 2,0 m–0,2 m występujący tylko na stacji w Ciosnach. W tym czasie wyższą prędkość wiatru notuje się w mieście. W dniach z różnicami temperatury powietrza między stacjami < 1°C różnice stężenia Rn-222 miasto–obszar zamiejski zanikają, a średnia dobowa temperatura powietrza nie przekracza 5,5°C. W tych dniach dobowa zmienność wybranych parametrów jest niewielka. W dniach z brakiem kontrastów termicznych między stacjami

występuje niższe ciśnienie atmosferyczne, większa wilgotność względna i większa prędkość wiatru szczególnie za miastem (tab. 5.26). Opisane prawidłowości zostały dodatkowo zilustrowane średnimi dobowymi przebiegami stężenia Rn-222 oraz współzmiennością wybranych elementów meteorologicznych w analizowanych 3 grupach dni (rys. 5.71).



Rys. 5.71. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222, temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g., różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i prędkości wiatru na stacjach w Łodzi i Ciosnach w dniach ze zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła w Łodzi ($t_{Łódź}$-t_{Ciosny}) > 5,0°C i > 3,0°C i w dniach z różnicami temperatury powietrza między stacjami < 1°C w latach 2008–2010

Fig. 5.71. Average daily course of Rn-222 concentration, the air temperature at 2 m above the ground, difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and wind speed at stations in Łódź and Ciosny in the days with urban heat island phenomenon in Łódź ($t_{Łódź}$-t_{Ciosny}) > 5.0°C and > 3.0°C and in the days of the air temperature differences between stations < 1°C in 2008–2010

W dniach z temperaturą powietrza w Łodzi wyższą o > 5,0°C w stosunku do stacji Ciosny, średnie godzinne stężenie Rn-222 w centrum miasta zmieniało się w zakresie od 3,3 Bq·m^{-3} o godz. 16.00 do 5,5 Bq·m^{-3} o godz. 08.00, podczas gdy na stacji zamiejskiej stężenie Rn-222 charakteryzuje się większym zakresem dobowej zmienności, z minimum 3,6 Bq·m^{-3} o godz.16.00 i z maksimum 13,9 Bq·m^{-3} o godz. 06.00 (rys. 5.71). W przebiegu dobowym dodatnie różnice stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach ujawniają się od godz. 18.00 do 10.00, wykazując silny związek ze zmniejszeniem prędkości wiatru za miastem oraz zjawiskiem inwersji przygruntowej temperatury powietrza w Ciosnach (rys. 5.71). W dniach z nadwyżką temperatury powietrza w Łodzi > 3,0°C zakres wahań stężenia Rn-222 był mniejszy, nie przekraczający 11 Bq·m^{-3} w Ciosnach i 5,6 Bq·m^{-3} w Łodzi. W analizowanych dniach w Łodzi nie obserwowano przygruntowej inwersji temperatury, a przeciętne różnice pionowe temperatury powietrza w warstwie 1,8 m były ujemne przez całą dobę i zmieniały się od –0,1°C do –1,1°C, co świadczy o słabo chwiejnej stratyfikacji atmosfery, sprzyjającej mieszaniu powietrza.

Tabela 5.26

Średnia dobowa wartość stężenia Rn-222, temperatury powietrza (t_{2m}), prędkości wiatru (v), wilgotności względnej (f), ciśnienia atmosferycznego (p) oraz amplitudy dobowej temperatury powietrza (t_{ampl_doba}) i zakresu wahań dobowych stężenia Rn-222 ($Rn\text{-}222_{ampl}$) oraz różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m ($t_{2,0\ m–0,2\ m\ ampl}$) w Ciosnach (C) i Łodzi (Ł) w latach 2008–2010 w dniach z różnicą temperatury powietrza między stacjami > 5°C, > 3°C i < 1°C

Table 5.26

Average daily value of Rn-222 concentration, air temperature (t_{2m}), wind speed (v), relative humidity (f), atmospheric pressure (p) and the amplitude of the daily air temperature (t_{ampl_doba}) and range of daily variation of Rn-222 concentration ($Rn\text{-}222_{ampl}$) and difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m ($t_{2,0\ m–0,2\ m\ ampl}$) in Ciosny (C) and Łódź (L) in 2008–2010 in the days with difference of the air temperature between stations > 5°C, > 3°C and < 1°C

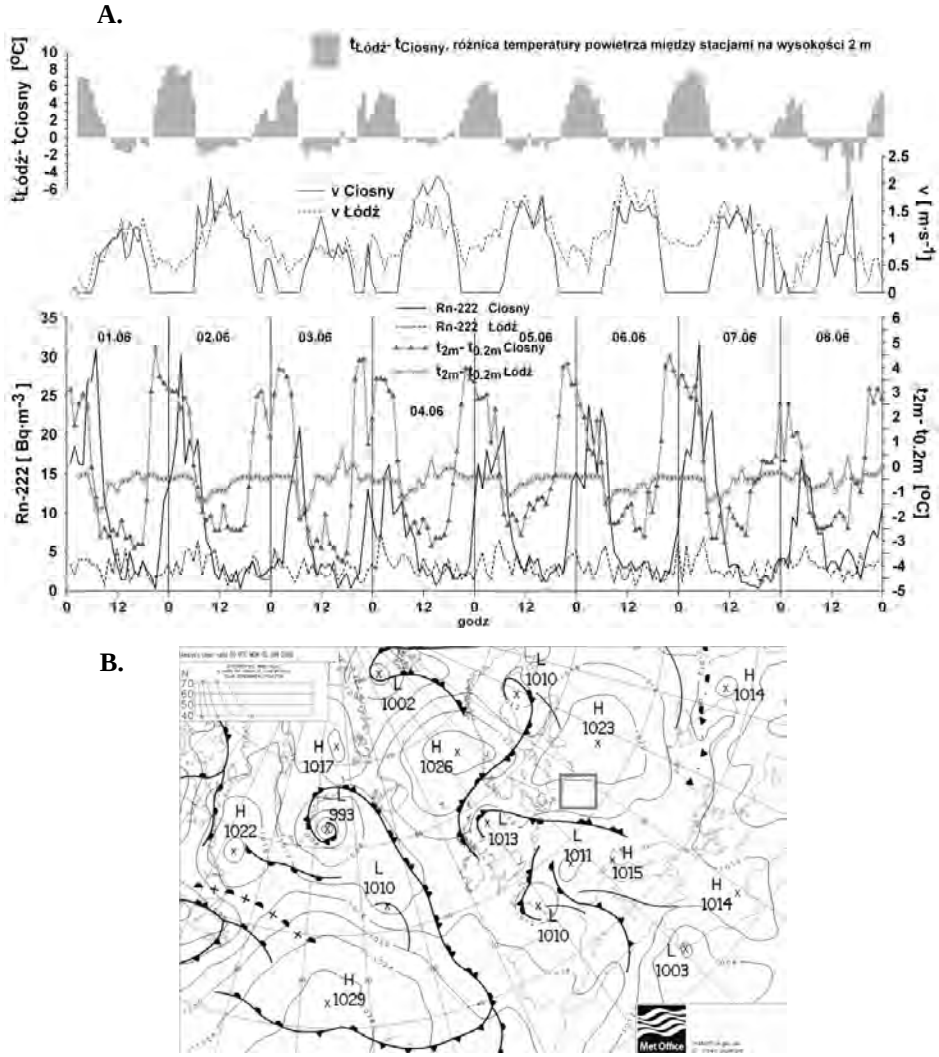
t_L-t_C °C		*Rn-222* Bq·m^{-3}	*Rn-222$_{ampl}$* Bq·m^{-3}	$t_{2\ m}$ °C	t_{ampl_doba} °C	$t_{2,0\ m-0,2\ m\ ampl}$ °C	v m·s^{-1}	f %	p hPa
> 5	Ł	4,3	2,2	13,8	8,9	1,1	1,1	56	994
	C	7,7	10,3	12,0	13,8	4,9	0,8	64	1002
> 3	Ł	4,6	1,8	12,3	7,5	0,8	1,1	65	992
	C	7,0	7,0	11,2	10,9	3,8	0,9	71	1000
< 1	Ł	4,7	0,6	5,2	2,6	0,2	1,4	89	987
	C	4,9	0,7	5,5	2,6	0,8	1,7	86	995

W dniach z nadwyżką temperatury powietrza w Łodzi > 5,0°C i > 3,0°C średnia pionowa różnica temperatury powietrza w warstwie 1,8 m na stacji zamiejskiej zmieniała się odpowiednio od 2,6°C w nocy do –2,3°C w dzień i od 1,8°C w nocy do –2,3°C w dzień. Porównując przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach do przebiegu dobowego pionowej różnicy temperatury powietrza w warstwie przygruntowej stwierdzono, że wzrost stężenia Rn-222 rozpoczyna się wraz z pojawieniem się wartości dodatnich badanych różnic, a maksimum dobowe stężenia Rn-222 występuje o godz. 06.00, w czasie zaniku inwersji przygruntowej powietrza (rys. 5.71).

W Łodzi, w dniach z miejską wyspą ciepła, w godzinach nocnych rejestrowano większą prędkość wiatru niż na stacji w Ciosnach, co sprzyjało redukcji stężeń Rn-222 w centrum miasta i dodatnim różnicom stężeń między miastem a terenem zamiejskim (rys. 5.71).

W dniach z różnicami temperatury powietrza < 1°C między Łodzią a stacją zamiejską nie obserwowano różnic stężenia Rn-222 między stacjami oraz wyraźnego rytmu dobowego zmian wartości stężeń na obu stacjach. W tych dniach odnotowano także małą zmienność dobową prędkości wiatru oraz pionowych różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m. Na obu stacjach zarejestrowano ujemne pionowe różnice temperatury powietrza, nie przekraczające –0,6°C na stacji w Ciosnach i –0,4°C w Łodzi oraz wyższą prędkość wiatru niż w dniach z miejską wyspą ciepła (rys. 5.71). Wartości wymienionych elementów meteorologicznych dowodzą intensywnej turbulencji w atmosferze nie sprzyjającej koncentracji Rn-222 przy gruncie na obu stacjach.

Porównując średnie stężenie Rn-222 w Łodzi w trzech grupach analizowanych dni można stwierdzić, że różnice są niewielkie. Średni dobowy poziom stężenia Rn-222 w Łodzi w dniach z brakiem nadwyżki temperatury powietrza w mieście był zbliżony do tego rejestrowanego w dniach z UHI, jedynie różnił się zakresem wahań dobowych (tab. 5.26). Zatem warunki atmosferyczne podczas rozwiniętej miejskiej wyspy ciepła w Łodzi nie wpłynęły na istotny wzrost stężenia tego gazu w przygruntowej warstwie powietrza tak jak to miało miejsce na stacji zamiejskiej w Ciosnach.



Rys. 5.72. A. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m n.p.g. i prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach w dniach 01–08.06.2008 r.; B. Mapa synoptyczna Met Office z dnia 02.06.2008 r. (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Kwadrat na mapie - w przybliżeniu obszar Polski

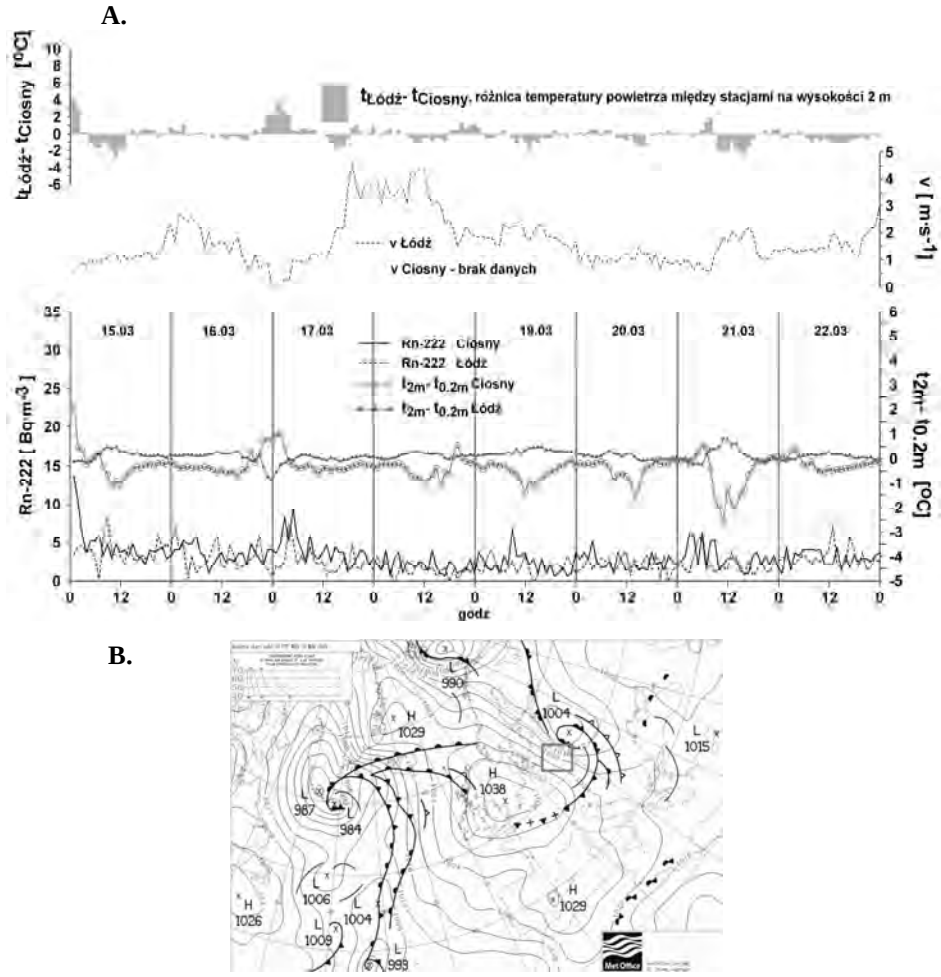
Fig. 5.72. A. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences between stations and the air temperature differences in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground and wind speed in Łódź and Ciosny in the period 1st–8th June 2008; B. Met Office synoptic map of 6th February 2008 (Source: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Square on the map - aproximation of Poland area

Intensywna miejska wyspa ciepła w Łodzi z wykształconą cyrkulacją o charakterze tzw. bryzy miejskiej skłania do zastanowienia się nad kwestią transportu Rn-222 w tych dniach ze strefy podmiejskiej, gdzie obserwowane są w tym czasie wyższe stężenia Rn-222, do centrum miasta. Jednak zbliżone średnie wartości stężenia Rn-222 w Łodzi w dniach z UHI > 5°C i w dniach z różnicami temperatury < 1°C, tj. odpowiednio 4,3 $Bq \cdot m^{-3}$ i 4,7 $Bq \cdot m^{-3}$ nie potwierdzają tej hipotezy. Nie można jednoznacznie wykluczyć wpływu na wartości stężenia Rn-222 w mieście składowej transportu tego radionuklidu znad wychłodzonych obszarów zamiejskich. Intensywna konwekcja rozwijająca się nad cieplejszym od otoczenia miastem może redukować stężenie Rn-222 przy powierzchni ziemi, wynosząc ten gaz do wyższych warstw atmosfery. Potwierdzenie tej tezy wymaga dalszych badań rozszerzonych o pomiary stężenia Rn-222 na różnych poziomach nad podłożem.

Ewidentnym przykładem wpływu zróżnicowania warunków mikroklimatycznych panujących w przygruntowej warstwie powietrza na koncentrację radonu na badanych stacjach jest okres od 1 do 6 czerwca 2008 r. (rys. 5.72). Wpływ na warunki atmosferyczne w Polsce w I dekadzie czerwca 2008 r. miał układ wysokiego ciśnienia z centrum nad Skandynawią, kształtujący na terenie Polski typ pogody bezchmurnej z rozpogodzeniami w nocy, bez opadów, z wiatrem ogólnej cyrkulacji < 2 $m \cdot s^{-1}$. Temperatura powietrza na stacji w Ciosnach zmieniała się od 7,8°C do 27,6°C, a w Łodzi od 11,6°C do 26,9°C. Typ pogody panujący w wybranych dniach wybitnie sprzyjał powstaniu w godzinach nocnych w Łodzi znacznej nadwyżki temperatury powietrza, która osiągnęła maksimum, tj. 8,5°C w dniu 02.06.2008 r. o godz. 03.00 (rys. 5.72). W czasie maksimum UHI wystąpiła także najwyższa obserwowana w dniach 01–06.06.2008 r. różnica stężenia tego radionuklidu między Łodzią a stacją w Ciosnach, tj. –30 $Bq \cdot m^{-3}$. W badanych dniach stężenie Rn-222 na stacji zamiejskiej cechował wyraźny rytm dobowy z amplitudami dobowymi > 20 $Bq \cdot m^{-3}$, podczas gdy w mieście zmienność dobowa występowała w zakresie kilku $Bq \cdot m^{-3}$. Za miastem w czasie wzrostu stężenia Rn-222 występowała przygruntowa inwersja temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m z maksimum 5°C oraz zanik wiatru. W tym czasie w centrum Łodzi obserwowano wzrost prędkości wiatru, a nadwyżka ciepła intensyfikowała pionową wymianę powietrza nie sprzyjającą powstawaniu inwersji przygruntowej (temperatura powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m zmieniała się od –2,0°C do 0,7°C). Dodatkowym czynnikiem, który mógł wpłynąć na znaczny wzrost stężenia Rn-222 w tym okresie na stacji zamiejskiej był długotrwały okres bezopadowy w maju 2008 r., co doprowadziło do przesuszenia gruntu, sprzyjającego ekshalacji Rn-222 do atmosfery. Wilgotność gruntu w Ciosnach zmieniała się w badanym okresie od 3,8% do 5,6%, a w Łodzi od 9,5% do 7,1%.

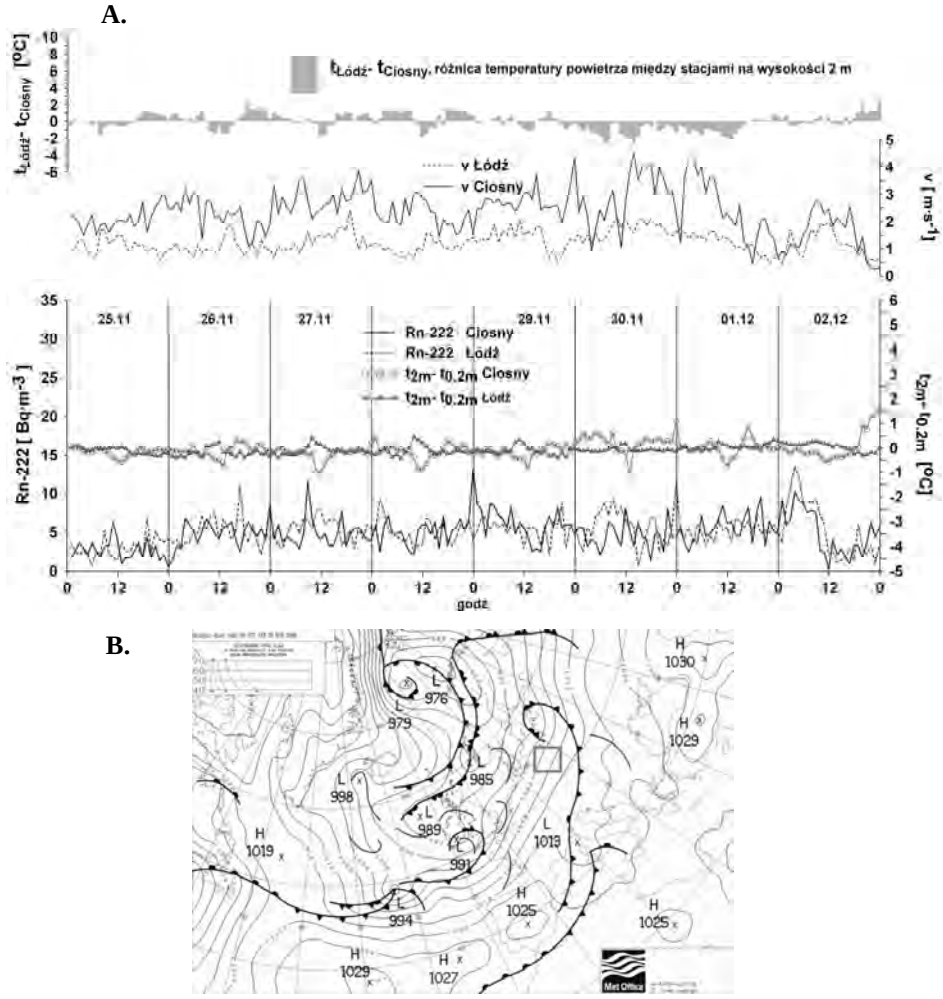
Innym charakterystycznym typem sytuacji meteorologicznej była pogoda kształtowana pod wpływem układów niskiego ciśnienia z frontami atmosferycznymi. Odmiennie od opisywanego wyżej okresu różnice w stężeniu Rn-222 między stacjami nie były wyraźnie widoczne. Rysunek 5.73 ilustruje zmienność stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza podczas pogody z dużym wiatrem, opadami deszczu lub deszczu ze śniegiem w marcu - miesiącu z najniższym średnim stężeniem tego radionuklidu w latach 2008–2010. Średnie wartości stężenia w okresie 15.03.–21.03.2009 r. to 3,7 $Bq \cdot m^{-3}$ w Ciosnach i 3,5 $Bq \cdot m^{-3}$ w Łodzi. Wartości stężenia zmieniają się prawie synchronicznie, bez rytmu dobowego, nie przekraczając 14 $Bq \cdot m^{-3}$ (Ciosny) i 8 $Bq \cdot m^{-3}$ (Łódź). W ciągu ośmiu analizowanych dni obserwowano niewielkie różnice temperatury powietrza między miastem a obszarem zamiejskim z dominacją różnic ujemnych. Wyjątek stanowiła noc 14/15.03.2012 r. oraz 16/17.03.2012 r., kiedy to wystąpiło zjawisko miejskiej wyspy ciepła o intensywności ok. 4°C. W tym okresie nie obserwowano także przygruntowych inwersji temperatury, różnice temperatury w warstwie 2,0 m–0,2 m w Łodzi oscylowały wokół 0°C, a w Ciosnach przeważały wartości ujemne (rys. 5.73).

Kolejny rysunek, 5.74, przedstawia przebieg stężenia Rn-222 w okresie 25.11.–01.12.2009 r., w podobnej sytuacji synoptycznej jak w opisywanym marcu 2009 r. - w czasie intensywnej cyrkulacji zachodniej z napływem nad Polskę aktywnych frontów atmosferycznych. Średnie stężenia Rn-222 w badanym okresie na obu stacjach są wyższe niż wiosną i wynoszą 5 $Bq \cdot m^{-3}$. Podobnie jak w marcu na stacjach nie obserwowano inwersji przygruntowych temperatury powietrza i intensywnej wyspy ciepła w Łodzi. Różnice temperatury powietrza między Łodzią a stacją w Ciosnach zmieniały się od –2,7°C do 2,5°C, a prędkości wiatru za miastem były ok. dwukrotnie większe niż w mieście i osiągały maksymalnie 4,5 $m \cdot s^{-1}$.



Rys. 5.73. A. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz pionowych różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m n.p.g. i prędkości wiatru w dniach 15–22.03.2009 r. na stacjach w Ciosnach i Łodzi; B. Mapa synoptyczna Met Office z dnia 18.03.2009 r. (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Kwadrat na mapie - w przybliżeniu obszar Polski. Pogoda w Polsce pod wpływem głębokich niżów z aktywnymi frontami atmosferycznymi. Silny wiatr i opady deszczu i deszczu ze śniegiem. Sztorm na Bałtyku, w centralnej Polsce silne porywy wiatru dochodzące do 20 ms^{-1} (komentarz pogodowy na podstawie Numerycznej Prognozy Pogody ICM: *http://new.meteo.pl/* i obserwacji własnych)

Fig. 5.73. A. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences between stations and Fig. 5.73. A. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground and wind speed in Łódź and Ciosny in the period 15th–22nd March 2009; B. Met Office synoptic map of 18th March 2009 (Source: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Square on the map - aproximation of Poland area. Weather in Poland under the influence of deep low pressure systems with active weather fronts. Strong wind, rain and sleet. The storm on the Baltic Sea, in central Poland, strong gusts of wind of up to 20 ms^{-1} (based on the weather comment Numerical Weather Forecast ICM: *http://new.meteo.pl/* and own observations)



Rys. 5.74. A. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz pionowych różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m n.p.g. i prędkości wiatru w dniach 25.11.–02.12.2009 r. na stacjach w Ciosnach i Łodzi. B. Mapa synoptyczna Met Office z dnia 29.11.2009 r. (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Kwadrat na mapie - w przybliżeniu obszar Polski. Pogoda w Polsce pod wpływem aktywnych układów niżowych z frontami atmosferycznymi znad Atlantyku, okres zwiększonej cyrkulacji zachodniej i intensywnych opadów deszczu (komentarz pogodowy na podstawie Numerycznej Prognozy Pogody ICM: *http://new.meteo.pl/* i obserwacji własnych)

Fig. 5.74. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences between stations and the air temperature differences in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground and wind speed in Łódź and Ciosny in the period 25th November–2nd December 2009; B. Met Office synoptic map of 25th November 2009 (Source: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Square on the map - aproximation of Poland area. Weather in Poland under the influence of low pressure systems with active weather fronts from the Atlantic, a period of enhanced western circulation and heavy rain (weather commentary from Numerical Weather Forecast ICM: *http://new.meteo.pl/* and own observations)

Wnioski

Przedmiotem analiz prezentowanych w rozdziale 5 było poszukiwanie związków zmienności czasowej stężenia Rn-222 z wybranymi elementami meteorologicznymi, tj. temperaturą powietrza, różnicą temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m nad gruntem, prędkością wiatru, ciśnieniem atmosferycznym, strumieniem ciepła glebowego oraz wilgotnością gruntu na stacjach w Łodzi i Ciosnach.

Warunki termiczne, reprezentowane przez średnią dobową i miesięczną temperaturę powietrza, analizowano w odniesieniu do rejestrowanego stężenia Rn-222 jako wskaźnika makroskalowych warunków pogodowych. Na wybranych przykładach stwierdzono związek poziomu stężenia Rn-222 z ogólną sytuacją synoptyczną - warunki „ciepłej" zimy z dominacją cyrkulacji zachodniej, z silnym wiatrem nie sprzyjały koncentracji tego radionuklidu przy gruncie. Mroźna zima z długotrwałym oddziaływaniem wyżu znad Rosji, z typem pogody słonecznej, bez aktywnej wymiany powietrza, sprzyjała zwiększaniu się poziomu rejestrowanych stężeń Rn-222 w środkowej Polsce.

W ciągu całego roku w Łodzi i Ciosnach stężenie Rn-222 cechuje się odwrotnym przebiegiem dobowym w stosunku do temperatury powietrza rejestrowanej na wysokości 2 m nad gruntem. Taki charakter relacji stężenia Rn-222 z temperaturą powietrza był opisywany w publikacjach np. Winkler i in. (2001), Magalhães i in. (2003), Baciu (2005), Florea i Duliu (2012).

Ekstremalne wartości dobowe stężenia Rn-222 występują z opóźnieniem w stosunku do minimum i maksimum temperatury powietrza, co na wykresach ujawnia się w postaci pętli (efekt histerezy). Ciosny charakteryzują się silniejszym związkiem korelacyjnym stężenia Rn-222 i temperatury powietrza niż Łódź, z maksimum siły związku w kwietniu i wrześniu. Na stacji zamiejskiej największe przeciętne stężenia Rn-222 były obserwowane dla temperatury powietrza w przedziale 10°C–15°C, a w mieście –5°C–0°C.

Wykazano wzrost stężenia Rn-222 podczas przygruntowej inwersji temperatury powietrza w warstwie 2,0–0,2 m, co jest zgodne z badaniami wielu autorów, tj. Kopcewicz (1974), Kataoka i in. (1992), Hötzl i Winkler (1994), Dueñas i in. (1996a), Porstendörfer i in. (1991). Wymienieni autorzy są zgodni co do istotnej roli stabilnej równowagi termodynamicznej atmosfery dla zwiększania stężenia Rn-222 w dolnej troposferze. Zanik turbulencji i przygruntowa inwersja temperatury powietrza działają jak „pułapka" dla tego radionuklidu.

Nie wykazano statystycznych związków stężenia Rn-222 z ciśnieniem atmosferycznym, co nie wyklucza całkowicie wpływu tego elementu meteorologicznego na poziom koncentracji badanego radionuklidu w powietrzu. Generalnie przy niskim i wysokim ciśnieniu atmosferycznym obserwowano spadek

stężenia Rn-222. Ciśnienie atmosferyczne należy traktować raczej jako wskaźnik zmian kompleksu pogodowego, który kształtuje warunki sprzyjające (np. brak silnej turbulencji) bądź niesprzyjające (np. aktywna wymiana mas powietrza) do gromadzenia się radonu w dolnych warstwach troposfery.

Analiza ujawniła odwrotną zależność między stężeniem Rn-222 a prędkością wiatru, silniejszą na stacji zamiejskiej. Okresy bezwietrzne za miastem charakteryzowały się dwukrotnie większymi stężeniami Rn-222 niż w centrum Łodzi. Przedstawiona zależność wymienionych zmiennych na stacjach w środkowej Polsce jest, podobnie jak w przypadku temperatury powietrza i termicznej stratyfikacji atmosfery, opisywana w literaturze np. przez Baciu 2005, Winklera i in. 2001.

Badanie związku stężenia Rn-222 z elementami meteorologicznymi wykazało najsilniejszą zależność korelacyjną ze strumieniem ciepła glebowego (*QG*). Przebieg dobowy *QG* jest quasisynchroniczny w stosunku do przebiegu stężenia Rn-222. Stwierdzono opóźnienie występowania dobowych wartości ekstremalnych stężenia Rn-222 w stosunku do ekstremalnych wartości *QG*. Największe przeciętne stężenia Rn-222 były rejestrowane dla przedziału wartości $QG > 5$ Wm^{-2}, a najmniejsze średnie stężenia Rn-222 notowano podczas strumienia *QG* o wartościach < -10 Wm^{-2}. Związek stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza ze strumieniem ciepła glebowego dotychczas nie był udokumentowany w literaturze krajowej i zagranicznej.

Analiza wilgotności gruntu (w %) na obu stacjach w środkowej Polsce wykazała, że poziom uwilgotnienia gliniastego podłoża w Łodzi był przeciętnie dwukrotnie wyższy niż na stacji w Ciosnach, gdzie występuje podłoże piaszczyste. W Łodzi nie obserwowano statystycznego związku stężenia Rn-222 ze zmianami wilgotności gruntu, natomiast w Ciosnach występuje ujemna zależność statystyczna między zmiennymi. Poszerzenie wiedzy na temat roli wilgotności gruntu dla stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza przyniosłoby rozszerzenie pomiarów o tempo ekshalacji tego gazu do atmosfery.

Uzyskane wyniki badań nad relacjami statystycznymi poszczególnych elementów meteorologicznych ze stężeniem Rn-222 w powietrzu oraz nad charakterem ich czasowej zmienności były przesłanką do stworzenia modelu statystycznego w celu estymacji stężenia tego radionuklidu w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem. Wykorzystano zależności funkcyjne stężenia Rn-222 i strumienia ciepła glebowego oraz temperatury powietrza - te dwa elementy meteorologiczne cechowały się najsilniejszym statystycznym związkiem ze stężeniem Rn-222 oraz wyraźnym rytmem dobowym. Relacje stężenia Rn-222 i poszczególnych elementów meteorologicznych nie mają charakteru prostej zależności liniowej. Do opisu związku zmiennych wybrano funkcje eksponencjalną, a estymację stężenia Rn-222 przeprowadzono dla poszczegól-

nych miesięcy. Skonstruowano dwa modele w oparciu o funkcje eksponencjalną. Drugi model ma wprowadzoną dodatkową zmienną - pochodną po czasie zmiennej niezależnej w celu uwzględnienia efektu histerezy. Wyniki uzyskane z modelu z pochodną mają większą dokładność. Generalnie poza miesiącami zimowymi dane estymowane stężenia Rn-222 na podstawie temperatury powietrza i *QG*, zarówno w Łodzi, jak i w Ciosnach, cechują się bardzo dobrym dopasowaniem do danych pomiarowych. Ograniczenie zastosowania *QG* do estymacji stężenia Rn-222 występuje w przypadku pokrywy śnieżnej, która redukuje zmienność dobową *QG*.

Analiza wieloparametryczna związku stężenia Rn-222 ze zmiennymi meteorologicznymi z zastosowaniem regresji krokowej wstecznej potwierdziła wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące relacji między zmiennymi meteorologicznymi a stężeniem Rn-222. Strumień ciepła glebowego, temperatura powietrza na wysokości 2 m nad gruntem i wilgotność gruntu to zmienne, których jednoczesne wprowadzenie do modelu predykcji stężenia Rn-222 dało najlepsze rezultaty, poza modelem wykorzystującym wszystkie 5 analizowanych zmiennych pogodowych. Wykorzystanie w modelu stężenia Rn-222 tylko prędkości wiatru i różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m i 0,2 m cechowało się natomiast słabym stopniem dopasowania wartości estymowanych stężenia Rn-222 do wartości pomiarowych.

Przeprowadzone badania potwierdziły hipotezę badawczą zakładającą, że przyczynami różnic stężenia promieniotwórczego radonu rejestrowanego w centrum miasta i na terenie niezurbanizowanym są odmienne cechy mikroklimatu otoczenia stanowisk pomiarowych. Wyniki prezentowane w niniejszym podrozdziale są dodatkowym argumentem przemawiającym za istotną rolą warunków atmosferycznych dla koncentracji radonu w dolnych warstwach troposfery.

Badania potwierdziły uprzywilejowanie terenów zamiejskich pod względem częstości rejestrowanego wyższego stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza. Największe ujemne różnice stężenia Rn-222 między stacjami, < -20 Bq·m^{-3}, były obserwowane od kwietnia do września. W przebiegu dobowym maksimum ujemnych różnic przypada w godzinach nocnych we wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy, kiedy to różnice stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach prawie nie występują. W ciągu dnia, przez cały rok, stężenie Rn-222 na stacjach kształtuje się na podobnym poziomie. Analiza czynnika kierunku adwekcji mas powietrza w dniach z ujemnymi różnicami stężenia Rn-222 < -10 Bq·m^{-3} wykazała dominację kierunku E i S napływu powietrza podczas cyrkulacji antycyklonalnej. Te kierunki adwekcji mogą potwierdzać rolę, jaką dla wzrostu stężenia Rn-222 odgrywa składowa transportu atmosferycznego tego radionuklidu z obszarów kontynentalnych,

o większym niż środkowa Polska potencjale radonowym. Drugim aspektem oddziaływania czynnika makrocyrkulacyjnego jest wpływ sytuacji antycyklonalnych na różnicowanie warunków mikroklimatycznych na badanych stacjach, ze szczególnym uprzywilejowaniem obszarów zamiejskich do gromadzenia się radonu przy gruncie. Przykładem takiego oddziaływania jest kształtowanie się silnych nocnych inwersji temperatury za miastem (tzw. pułapki dla radonu) podczas pogody wyżowej. W tym czasie takie zjawisko w Łodzi nie występowało.

Podczas sytuacji synoptycznych z układem niskiego ciśnienia, aktywnymi frontami atmosferycznymi, silnym wiatrem ogólnej cyrkulacji, opadami deszczu nie występowały różnice stężenia Rn-222 między stacją w Łodzi a stacją w Ciosnach. W tych dniach charakter przebiegu dobowego rejestrowanych wartości na obu stacjach był podobny.

Badanie zróżnicowania poziomu stężenia Rn-222 na stacjach podczas występowania w Łodzi miejskiej wyspy ciepła o natężeniu > 5,0°C i > 3,0°C wykazało, że warunki mikroklimatyczne panujące wówczas w Ciosnach wybitnie sprzyjają koncentracji tego radionuklidu przy gruncie. Istnienie w tym czasie silnych przygruntowych inwersji temperatury za miastem, zanik ruchu powietrza - to czynniki odpowiedzialne za przyrost stężenia Rn-222 w Ciosnach w stosunku do Łodzi, gdzie takich warunków atmosferycznych nie obserwowano.

6. WPŁYW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA STĘŻENIE RADONU W PRZYGRUNTOWEJ WARSTWIE POWIETRZA

6.1. Stan badań nad rolą kierunku adwekcji mas powietrza i typu cyrkulacji atmosferycznej dla stężenia Rn-222 w dolnej troposferze

Właściwości fizyko-chemiczne Rn-222, m.in. obojętność chemiczna (radon nawet po wzbudzeniu nie reaguje z tlenem, azotem, siarką, wodorem) i długi czas połowicznego rozpadu, 3,8 dnia, sprawiają, że gaz ten podlega procesom transportu atmosferycznego (za Zahorowskim i in. 2004).

W pracach badawczych nad związkiem stężenia Rn-222 w dolnej troposferze z parametrami meteorologicznymi podejmowany jest wątek oceny wpływu adwekcji mas powietrza na zmienność czasową stężenia tego radionuklidu. Takie podejście badawcze zakłada istnienie dwóch głównych składowych determinujących aktywność Rn-222 w przyziemnych warstwach powietrza, tj. składowej lokalnej w skali przestrzennej do 100 km i składowej transportu Rn-222 z masami powietrza z odległych obszarów do miejsca pomiaru (np. Sakashita i in. 1994, Dueñas i in. 1996, Morizumi i in. 1996, Omori i in. 2009, Arnold i in. 2009, 2010). Warunki lokalne determinujące stężenie Rn-222 przy gruncie rozumiane są jako ekshalacja tego radionuklidu z podłoża i warunki meteorologiczne z wiodącą rolą stabilności atmosfery. Ekshalacji Rn-222 o wartości w przybliżeniu 1 atom $cm^{-2}s^{-1}$ odpowiada wartość 20 $mBqm^{-2}s^{-1}$ (Chambers i in. 2009). Druga główna składowa stężenia Rn-222 rejestrowanego w danym miejscu wiąże się z cyrkulacją atmosferyczną, sterującą transportem mas powietrza o pewnych cechach, które są nabywane w trakcie przemieszczania się nad danym obszarem. Generalną prawidłowością jest większa zawartość Rn-222 w kontynentalnych masach powietrza w związku z 1000 razy większą ekshalacją tego gazu do atmosfery z powierzchni lądowej niż z morskiej (UNSCEAR 2000). Teza ta jest podstawą w ocenie wpływu kierunku adwekcji mas powietrza na wartość stężenia Rn-222 w danym miejscu.

Radon i jego pochodne są rozprowadzane w masie powietrza nad obszarem źródłowym na drodze turbulencyjnej pionowej wymiany powietrza. Powietrze arktyczne i polarno-morskie jest ubogie w całej masie w radon, natomiast bogatszymi w ten radionuklid są masy polarno-kontynentalne (Kopcewicz 1968).

W czasie przemieszczania mas powietrza poza obszar źródłowy następuje proces ich meteorologicznej transformacji wraz ze zmianą stężenia radonu z uwagi na jego rozpad, a także w wyniku dopływu „nowej porcji" tego radionuklidu do atmosfery z podłoża, nad którym aktualnie dana masa się znajduje. W wyniku przemieszczania się powietrza nad obszarami lądowymi masy powietrza początkowo ubogie w radon i jego pochodne zwiększają swoją aktywność promieniotwórczą, a masy bogate w ten radionuklid przemieszczając się nad akwenami, w wyniku małej ekshalacji radonu z wody i rozpad promieniotwórczy, obniżają początkowy poziom aktywności promieniotwórczej.

Przykładem opracowania, w którym obszarowi genetycznemu masy powietrza napływającej nad punkt pomiarowy stężenia Rn-222 przypisuje się znaczącą rolę w kształtowaniu zmienności czasowej zawartości tego radionuklidu w powietrzu jest praca Carvalho (1995). Opracowanie dotyczy obszaru okolic Lizbony (stacja Sacavem, Portugalia). Położenie stacji pomiarowej na granicy kontynentu europejskiego i Oceanu Atlantyckiego umożliwiło jednoznaczną ocenę różnic poziomu stężenia tego gazu w masach powietrza morskiego i kontynentalnego. W powietrzu znad Atlantyku średnie stężenie tego gazu wynosiło ok. 0,1 $Bq \cdot m^{-3}$, podczas gdy w kontynentalnych masach powietrza średnia wartość stężenia Rn-222 zmieniała się od 2 do 10 $Bq \cdot m^{-3}$. Najwyższa koncentracja Rn-222, 200 $Bq \cdot m^{-3}$, była rejestrowana na stacji Sacavem podczas adwekcji powietrza o cechach kontynentalnych z północnego wschodu. Kierunek adwekcji utrzymywał się niezmiennie przez tydzień przed zarejestrowanym stężeniem. Gwałtowne spadki aktywności promieniotwórczej Rn-222 na badanej stacji występowały w czasie przejścia frontów atmosferycznych z obszaru wyższych szerokości geograficznych Północnego Atlantyku (Carvalho 1995). Dueñas i in. (1996) wykazali istotną zależność stężenia Rn-222 od kierunku wiatru na stacji w Maladze, położonej na południowym wybrzeżu Hiszpanii i na stacji Valladolid, zlokalizowanej w północno-zachodniej części Hiszpanii w znacznej odległości od wybrzeża. Przy kierunku wiatru znad morza na wymienionych stacjach rejestrowano niższe stężenia Rn-222. Potwierdzeniem wyżej opisanych wyników badań była analiza 10–letniej serii danych o stężeniu pochodnych radonu z 25 stacji monitoringu aerozoli promieniotwórczych zlokalizowanych na półwyspie Iberyjskim (Arnold i in. 2009). Aktywność pochodnych radonu w powietrzu zmieniała się od 0,6 do 7 $Bq \cdot m^{-3}$. Najniższe wartości, poniżej 2 $Bq \cdot m^{-3}$, cechowały stacje na wybrzeżu, gdzie docierały ubogie w radon masy powietrza. Na stacjach położonych w głębi lądu, gdzie notowano większą frekwencję powietrza o cechach kontynentalnych, stężenia były wyższe (Arnold i in. 2009). Wyodrębnienie składowej transportu atmosferycznego w wartościach rejestrowanych stężeń dokonano na podstawie pomiarów stężeń tego radionuklidu w Holandii na stacji Cabauw (50 km na

wschód od wybrzeża Morza Północnego) - Arnold i in. 2010. Pomiary prowadzono na dwóch poziomach, tj. 20 m i 200 m nad gruntem, a różnice stężeń Rn-222 między poziomami wskazywały na wielkość wpływu adwekcji mas powietrza na wyniki. Oszacowano, że napływ kontynentalnych mas powietrza z sektora wschodniego Europy przynosił wzrost stężenia średnio o 3 $Bq \cdot m^{-3}$. Obliczono wartość „transportu atmosferycznego" stężenia Rn-222 dla tej stacji, która wynosi 1–2 $Bq \cdot m^{-3}$ (Arnold i in. 2010). Badania prowadzone w Japonii przyniosły oszacowanie wartości stężenia Rn-222 w danym miejscu, która pochodzi z transportu atmosferycznego. Ta składowa rejestrowanego stężenia nie przekraczała wartości zakresu dobowych wahań stężenia Rn-222 (za Morizumi i in. 1996).

Potwierdzenie znaczenia składowej transportu dla poziomu stężenia Rn-222 w dolnej troposferze przyniosły liczne wyniki badań nad wykorzystaniem tego radionuklidu jako znacznika procesów atmosferycznych. Ten aplikacyjny aspekt badań nad radonem był wykorzystywany do konstrukcji modeli transportu i dyfuzji zanieczyszczeń w atmosferze (np. Sakashita i in. 1994, Morizumi i in. 1996, Jacob i in. 1997, Sesana i in. 1998, 2003, Kataoka i in. 2001, Perrino i in. 2001, Chambers i in. 2009, Omori i in. 2009, Zahorowski i in. 2004). Prace wymienionych autorów dotyczyły głównie pomiarów stężenia Rn-222 m.in. w południowo-wschodniej Azji (Japonia, Korea Płd., Chiny), a także na Tasmanii oraz we Włoszech. Analizy wykazały zgodność roli jaką pełni kierunek napływu powietrza nad miejsce pomiaru dla czasowej zmienności aktywności promieniotwórczej tego radionuklidu - wyższe stężenia Rn-222 były rejestrowane w masach powietrza pochodzenia kontynentalnego. Ten wniosek jest silnie akcentowany w opracowaniach dotyczących obszaru azjatyckiego, m.in. wysp japońskich, gdzie stwierdzono sezonowość w przebiegu rocznym stężenia Rn-222 w dolnej atmosferze, silnie zdeterminowaną cyrkulacją monsunową w tym regionie. Najwyższa koncentracja tego radionuklidu w przyziemnych warstwach atmosfery była rejestrowana w powietrzu napływającym znad kontynentu azjatyckiego (np. Sakashita i in. 1994, Kataoka i in. 2001, Chambers i in. 2009, Omori i in. 2009). Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na stężenie Rn-222 był w niektórych opracowaniach analizowany w szerszym kontekście, nie tylko jako transport powietrza, ale także jako czynnik kształtujący warunki pogodowe w danym miejscu, które mogą mieć z kolei wpływ na poziom koncentracji Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza, silnie uzależniony od stabilności atmosfery. Sesana i in. (1998, 2003) wykorzystując stężenie Rn-222 jako naturalny znacznik do modelowania dyspersji zanieczyszczeń atmosferycznych (m.in. ołowiu, ozonu, tlenków azotu, tlenku węgla) w Mediolanie (Włochy) podkreślał rolę typu cyrkulacji w zmienności czasowej stężenia tego radionuklidu. Wykazał, że słabogradientowe sytuacje

antycyklonalne sprzyjają koncentracji Rn-222 przy gruncie. Podobne wnioski prezentował Perrino i in. (2001) wykorzystujący Rn-222 jako wskaźnik stabilności i procesów mieszania w warstwie granicznej atmosfery w badaniach koncentracji zanieczyszczeń emitowanych przez transport w Rzymie. Największą koncentrację tego radionuklidu w powietrzu zarejestrowano w miesiącach letnich, podczas pogody kształtowanej przez wielkoskalowy układu wysokiego ciśnienia, któremu towarzyszyły inwersje temperatury powietrza. Duża stabilność atmosfery pojawiająca się podczas antycyklonalnych typów cyrkulacji jest tzw. pułapką dla Rn-222 sprzyjającą znacznym wzrostom stężenia tego gazu przy gruncie (Perrino i in. 2003). Znaczenie stabilności atmosfery dla stężenia Rn-222 w dolnej troposferze, w kontekście związku z cyrkulacją atmosferyczną i ogólnymi warunkami pogodowymi, wykazały badania prowadzone m.in. w Hiszpanii (Dueñas i in. 1996), Niemczech (Porstendörfer i in. 1991, Winkler i in. 2001), Rumunii (Baciu 2005).

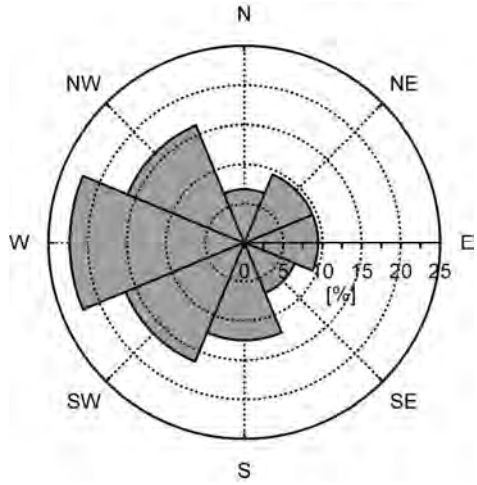
W niniejszej pracy podjęto próbę oceny wpływu czynnika adwekcyjnego na stężenie Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza w środkowej i południowej Polsce. Wstępne wyniki badań były już prezentowane w kilku publikacjach, np. Podstawczyńska i Piotrowski (2010a, 2010b, 2012). W tym opracowaniu przedstawiono rozszerzoną analizę zależności stężenia Rn-222 od kierunku napływu mas powietrza określonego na podstawie kierunku wiatru geostroficznego podczas cyrkulacji o charakterze cyklonalnym i antycyklonalnym.

6.2. Stężenie Rn-222 na tle kierunku adwekcji mas powietrza w środkowej i południowej Polsce

Za kierunek adwekcji mas powietrza analizowany w 8 sektorach przyjęto kierunek wektora wiatru geostroficznego (Kożuchowski 2004). Metodykę wyznaczania kierunku napływu mas powietrza oraz charakteru cyrkulacji przedstawiono w rozdziale 3.

W Polsce, w latach 2008–2009, dominowała adwekcja mas powietrza z sektora zachodniego. Największą częstością względną w badanym okresie cechowały się następujące kierunki wiatru geostroficznego: W (22,3%), SW (16,4%) i NW (16,1%) - rys. 6.1. Najrzadziej występowała adwekcja z kierunków N (6,8%) i NE (7,0%), a średni roczny udział pogód antycyklonalnych wynosił 60,9%. W poszczególnych porach roku frekwencja dni z pogodą antycyklonalną przewyższała liczbę dni z pogodą cyklonalną. Maksimum udziału pogód kształtowanych przez ośrodek wysokiego ciśnienia w latach 2008–2009

przypadał na lato (65,8%) i jesień (65,6%) - tab. 6.1. Częstość 8 kierunków adwekcji zmieniała się w poszczególnych porach roku (rys. 6.2). Wiosną największy udział miał kierunek NE (16,8%) i NW (15,2%), a najmniejszy W (9,2%). Latem największą częstość miała adwekcja z W (26,2%) i NW (21,2%), a najmniejszą z kierunków N i SE (3,8%). Jesienią dominował napływ powietrza z kierunku W (30,6%) i SW (15,3%), podczas gdy kierunek N występował rzadko (3,8%). Zimowe adwekcje powietrza najczęściej przypadały na kierunki W (23,3%) i SW (20,0%), a najrzadziej na kierunki E i SE (5,0%), rys. 6.2. Wśród analizowanych sezonów wiosna cechowała się brakiem wyraźnej dominacji określonego kierunku adwekcji. Największe różnice we frekwencji mas powietrza z poszczególnych kierunków występowały jesienią, z istotną przewagą sektora zachodniego (rys. 6.2 i 6.3).



Rys. 6.1. Częstość względna kierunku adwekcji mas powietrza nad Polską w latach 2008–2009

Fig. 6.1. Relative frequency of direction advection of the air masses in Poland in 2008–2009

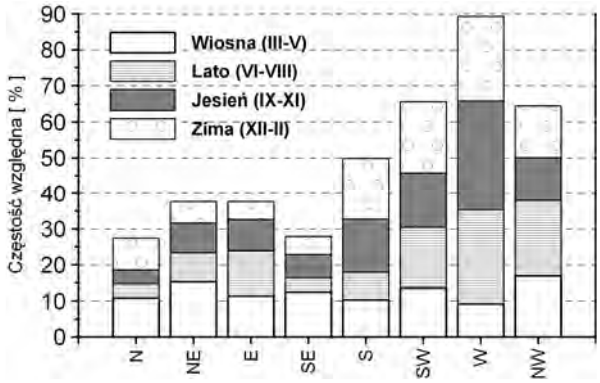
Tabela 6.1

Udział pogody cyklonalnej i antycyklonalnej (w %) w Polsce w latach 2008–2009

Table 6.1

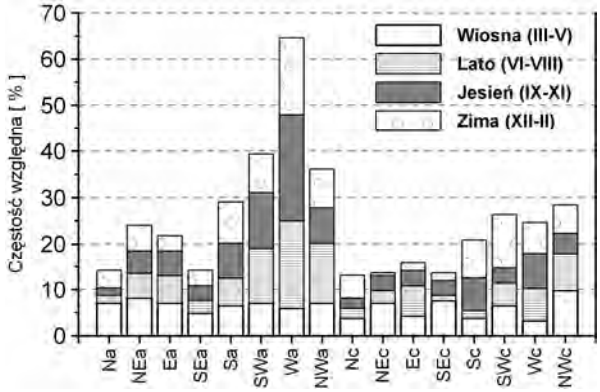
Percentage of cyclonic nad antycyclonic weathers (in %) in Poland in 2008–2009

Pogoda	Wiosna (III–V)	Lato (VI–VIII)	Jesień (IX–XI)	Zima (XII–II)	Rok
Cyklonalna	46,2	34,2	34,4	41,7	39,1
Antycyklonalna	53,8	65,8	65,6	58,3	60,9



Rys. 6.2. Częstość względna kierunku adwekcji mas powietrza nad Polską w poszczególnych porach roku w latach 2008–2009

Fig. 6.2. Relative frequency of the air masses advection directions in Poland in different seasons of the year in 2008–2009



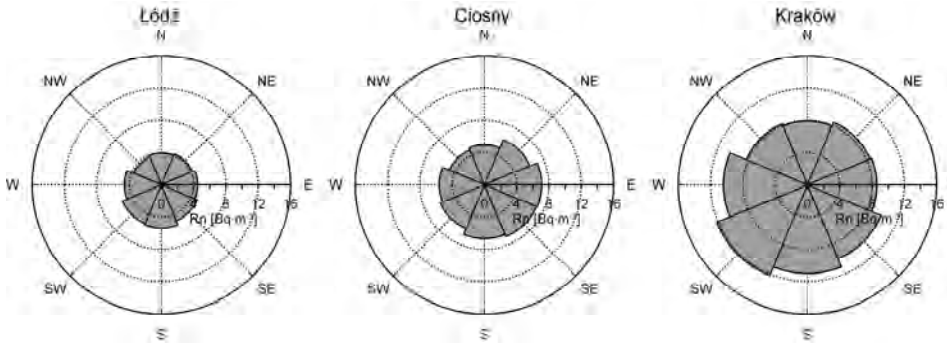
Rys. 6.3. Częstość względna kierunku adwekcji mas powietrza nad Polską w poszczególnych porach roku podczas cyrkulacji antycyklonalnej (a) i cyklonalnej (c) w latach 2008–2009

Fig. 6.3. Relative frequency of the air masses advection directions in Poland in different seasons of the year during antycyclonic and cyclonic circulation in 2008–2009

Rysunek 6.3 przedstawia sezonową zmienność częstości adwekcji z 8 kierunków podczas cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej w latach 2008–2009 (rys. 6.3). We wszystkich porach roku z wyjątkiem wiosny największą częstością cechowała się adwekcja Wa (19,0% - lato, 23,0% - jesień, 16,7% - zima). Wiosną maksimum częstości napływu mas powietrza przypadało na kierunek NWc (9,8%), a frekwencja kierunku Wa wynosiła 6%. Zakres wahań częstości

poszczególnych typów cyrkulacji zmieniała się od 0,6% zimą (NWc) do 23,0% jesienią (Wa). Wśród sytuacji antycyklonalnych dominowały w roku w roku kierunki Wa, SWa, NWa, Sa. Pogodom cyklonalnym najczęściej towarzyszyły kierunki adwekcji z NWc, SWc, Wc, Sc. Kierunek N dla sytuacji antycyklonalnych i cyklonalnych cechował się najniższą frekwencją w roku (rys. 6.3).

W pierwszym etapie badań nad wpływem kierunku adwekcji mas powietrza i charakteru cyrkulacji na stężenie Rn-222 w dolnej troposferze w środkowej i południowej Polsce wykorzystano średnie godzinne i średnie dobowe wartości stężenia Rn-222 na stacjach w Łodzi, Ciosnach i Krakowie. Analiza średniego stężenia Rn-222 na tle kierunku adwekcji mas powietrza wskazuje, że najwyższe wartości były rejestrowane w centrum Łodzi dla kierunku S, w Ciosnach dla kierunku E, a w Krakowie dla kierunku SW (rys. 6.4). Najniższe przeciętne stężenie Rn-222 na stacjach w środkowej Polsce wystąpiło w czasie adwekcji z kierunku NW, a w Krakowie z kierunku N. Wymienione, uprzywilejowane kierunki adwekcji dla wzrostu stężenia Rn-222 wskazują na kontynentalny rodowód mas powietrza, podczas gdy najniższa przeciętna aktywność tego radionuklidu wystąpiła w masach powietrza napływających z sektorów o przewadze podłoża wodnego.

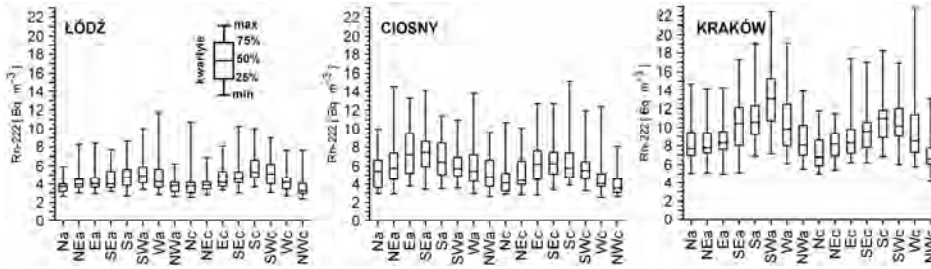


Rys. 6.4. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009

Fig. 6.4. Average Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2009

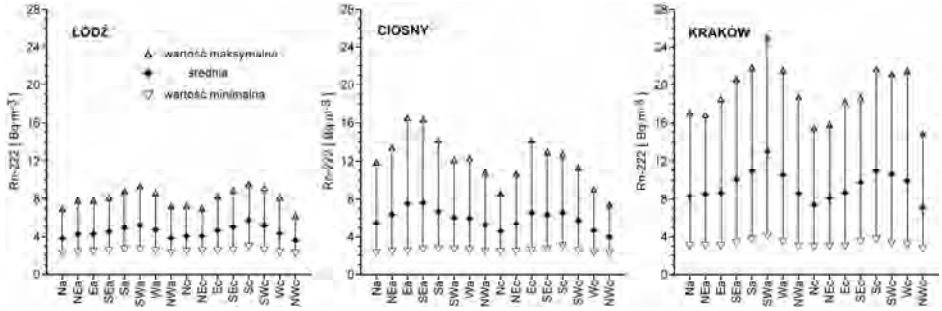
Najmniejszym zróżnicowaniem średniej wartości stężenia Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza charakteryzowała się stacja w centrum Łodzi, od 3,7 $Bq \cdot m^{-3}$ dla NW do 5,4 $Bq \cdot m^{-3}$ dla S. W Ciosnach zakres wahań średniego stężenia Rn-222 wynosił od 4,7 $Bq \cdot m^{-3}$ dla NW do 7,1 $Bq \cdot m^{-3}$ dla E. W Krakowie przeciętne stężenie Rn-222 było najniższe dla adwekcji z kierunku N, 7,9 $Bq \cdot m^{-3}$, a najwyższe podczas adwekcji z kierunku SW,

12,2 Bq·m^{-3} (rys. 6.4). Badania nad zmiennością średniego dobowego stężenia Rn-222 na trzech stacjach w zależności od kierunku adwekcji podczas cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej wykazało na wszystkich stacjach uprzywilejowanie sektora południowego (rys. 6.5 i 6.6). Na wszystkich stacjach podczas cyrkulacji cyklonalnej najwyższe średnie dobowe stężenia Rn-222 i najwyższe minimalne średnie dobowe wartości były rejestrowane podczas adwekcji z kierunku S. Wymienione wartości wynosiły w Łodzi 5,8 Bq·m^{-3} (średnie) i 3,7 Bq·m^{-3} (minimalne średnie), w Ciosnach odpowiednio 6,6 Bq·m^{-3} i 3,9 Bq·m^{-3}, a w Krakowie 11 Bq·m^{-3} i 6,7 Bq·m^{-3} (rys. 6.5).



Rys. 6.5. Wykres pudełkowy dla średnich dobowych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem na tle poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza podczas cyrkulacji antycyklonalnej (a) i cyklonalnej (c) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009

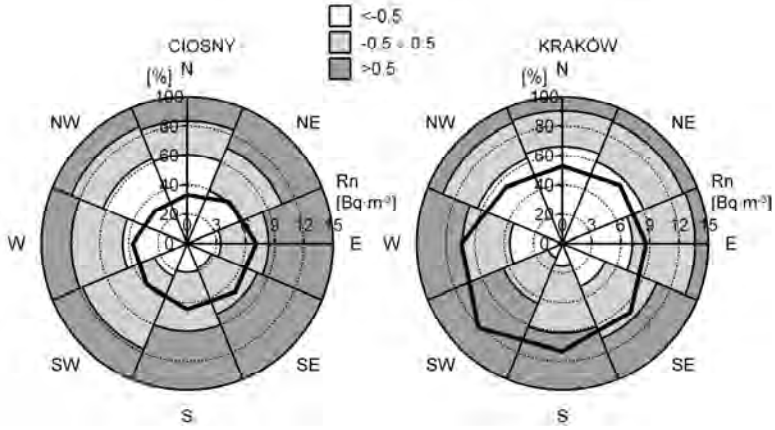
Fig. 6.5. Box-chart for average daily Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground on the background of each air masses advection directions during anticyclonic circulation (a) and cyclonic (c) in Łódź, Ciosny and and Kraków in 2008–2009



Rys. 6.6. Średnie dobowe stężenie Rn-222 i średnie dobowe wartości ekstremalne dla poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza podczas cyrkulacji antycyklonalnej (a) i cyklonalnej (c) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009

Fig. 6.6. Average daily Rn-222 concentration and average daily extreme values for each air masses advection directions during anticyclonic circulation (a) and cyclonic (c) in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2009

W czasie, kiedy to pogoda w Polsce była kształtowana przez antycyklon, średnia najwyższa koncentracja tego radionuklidu w powietrzu na stacji w Łodzi była rejestrowana dla kierunku SWa (5,2 Bq·m^{-3}), podczas gdy w Ciosnach dla kierunku SEa (7,6 Bq·m^{-3}). W Krakowie w czasie pogody antycyklonalnej największym przeciętnym stężeniem charakteryzowała się adwekcja z kierunku SWa (13,0 Bq·m^{-3}), rys. 6.6. Absolutne maksimum średniej dobowej wartości stężenia Rn-222 podczas sytuacji antycyklonalnej i cyklonalnej było odnotowane w Łodzi odpowiednio dla kierunku Wa (11,7 Bq·m^{-3}) i Nc (10,7 Bq·m^{-3}), rys. 6.5. W Ciosnach absolutne maksimum średniej dobowej aktywności Rn-222 wystąpiło dla kierunku NEa (14,5 Bq·m^{-3}) i Sc (15,1 Bq·m^{-3}). W Krakowie kierunki uprzywilejowane dla wystąpienia absolutnie najwyższej średniej dobowej aktywności promieniotwórczej Rn-222 to SWa (22,5 Bq·m^{-3}) i Wc (22,8 Bq·m^{-3}), rys. 6.5.

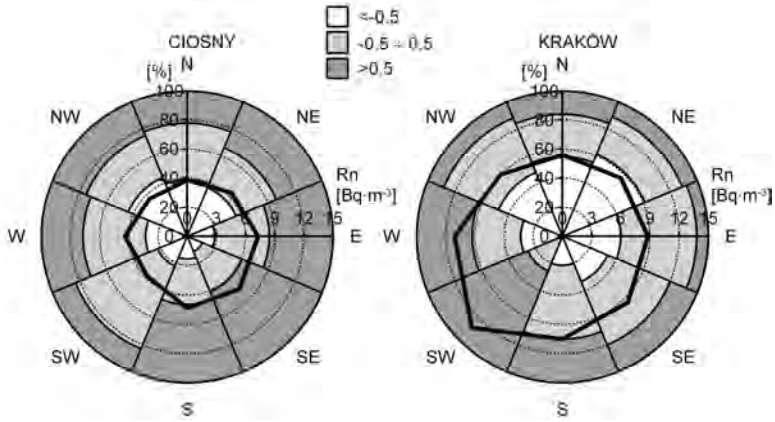


Rys. 6.7. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009

Fig. 6.7. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in Kraków and Ciosny in 2008–2009

Analiza średnich godzinnych wartości ekstremalnych stężenia Rn-222 w zależności od typu cyrkulacji na badanych stacjach wykazała, że najwyższe godzinne minima pojawiały się w środkowej Polsce podczas cyrkulacji Sc, a w Krakowie podczas cyrkulacji SWa i Sc. Średnie najwyższe godzinne stężenia Rn-222 były notowane w Łodzi podczas cyrkulacji Sc (9,5 Bq·m^{-3}), w Ciosnach w typie Ea (16,4 Bq·m^{-3}), a w Krakowie w typie SWa (25,0 Bq·m^{-3}), rys. 6.6. Generalnie wśród wymienionych kierunków napływu mas powietrza,

kiedy to rejestrowano wzrost stężenia Rn-222 dominuje sektor południowy - kontynentalny, co może być potwierdzeniem istotnej roli składowej transportu dla poziomu aktywności promieniotwórczej radonu na danej stacji.

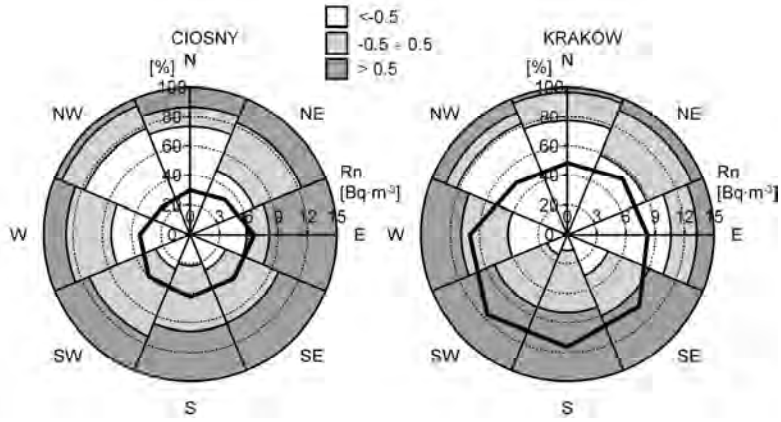


Rys. 6.8. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Krakowie i Ciosnach w półroczu ciepłym (IV–IX) w latach 2008–2009

Fig. 6.8. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in the warm half-year (April–September) in Kraków and Ciosny in 2008–2009

W kolejnym etapie badań nad wpływem kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji atmosferycznej na stężenie Rn-222 zastosowano kryterium zmiennej standaryzowanej stężenia tego radionuklidu, którą ujęto w następujących przedziałach: < –0,5; od –0,5 do +0,5; > +0,5. Dokonano analizy skumulowanej częstości względnej standaryzowanych wartości stężenia Rn-222 w wymienionych przedziałach w zależności od 8 kierunków napływu mas powietrza. Obliczenia wykonano dla całego roku, półrocza ciepłego (IV–IX) i chłodnego (X–III), cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej, wykorzystując dane doświadczalne ze stacji Ciosny i Kraków z lat 2008–2009 (rys. 6.7–6.11). Wnioskując na podstawie danych dla całego okresu badawczego stwierdzono, iż największa częstość dodatnich odchyleń stężenia Rn-222, > +0,5, w Ciosnach wystąpiła podczas adwekcji z kierunku SE (48%) i E (40,2%), podczas gdy w Krakowie z kierunków SW (56,1%) i S (38,8%). Największe odchylenia ujemne (< –0,5) na obu stacjach były notowane dla kierunków N (60,4% - Ciosny i 66,1% - Kraków) oraz NW (62,6% Ciosny i 63,0% - Kraków), rys. 6.7.

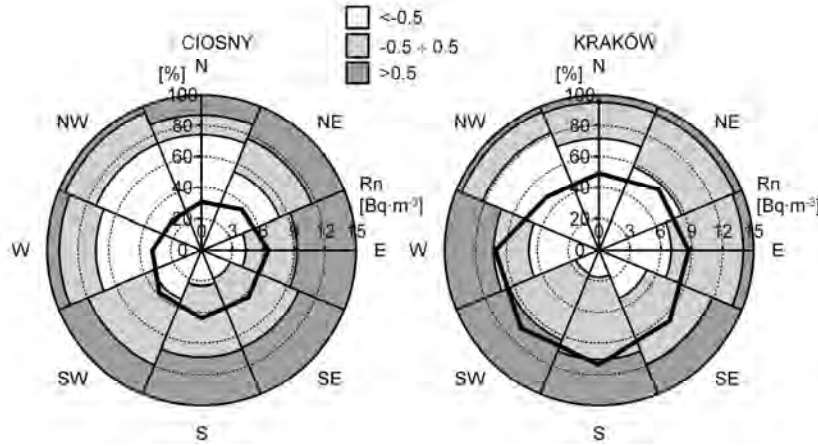
Porównanie danych dla półrocza ciepłego i chłodnego ujawnia zmienność roczną częstości poszczególnych przedziałów zmiennej standaryzowanej na tle 8 kierunków adwekcji (rys. 6.8 i 6.9). W miesiącach od kwietnia do września wyraźnie wzrasta udział zmiennej standaryzowanej z przedziałów > +0,5 i od –0,5 do +0,5 w porównaniu z porą chłodną, gdzie zaznacza się istotny wzrost udziału ujemnych odchyleń stężenia Rn-222. W półroczu ciepłym największa frekwencja dodatnich odchyleń > +0,5 przypada w Ciosnach podczas adwekcji z kierunków SE (59,3%) i S (53,8%), a w Krakowie z kierunku SW (74,4%). W miesiącach od października do marca największa częstość dodatnich odchyleń stężenia Rn-222 w środkowej Polsce występuje podczas napływu powietrza z kierunku E (46,2%), a podczas kierunków adwekcji SE i S częstość odchyleń wynosi 34%. W Krakowie największa frekwencja odchyleń > +0,5 w tej porze roku wyróżnia cały sektor południowy z maksimum dla kierunku S (46,7%), rys. 6.9. W półroczu chłodnym częstość ujemnych odchyleń < –0,5 na obu stacjach jest największa. W Ciosnach i Krakowie maksimum częstości tego przedziału odchyleń stężenia Rn-222 występuje dla kierunków NW (78% - Ciosny, 81,6% - Kraków) oraz dla N (73,3% - Ciosny, 77,4% - Kraków). W południowej Polsce wysoki udział ujemnych odchyleń stężenia Rn-222 przypada także na kierunek E (70,6%), rys. 6.9.



Rys. 6.9. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Krakowie i Ciosnach w półroczu chłodnym (X–III) w latach 2008–2009

Fig. 6.9. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in the cold half-year (X–III) in Kraków and Ciosny in 2008–2009

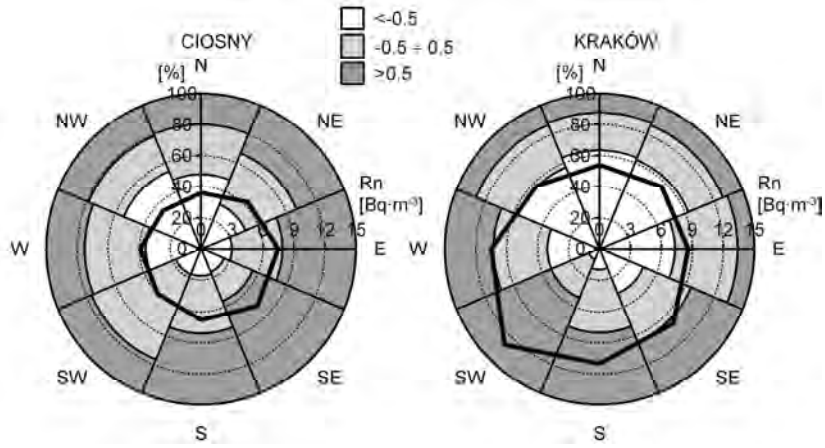
Analiza wartości zmiennej standaryzowanej stężenia Rn-222 w dniach z pogodą cyklonalną i antycyklonalną ujawniła, że niezależnie od typu cyrkulacji największa częstość ujemnych odchyleń < –0,5 na obu stacjach występuje dla kierunków N i NW, rys. 6.10 i 6.11. Największa frekwencja zmiennej standaryzowanej o wartościach > 0,5 w Ciosnach występuje podczas adwekcji z kierunków E, SE, S, zarówno w dniach z typem cyrkulacji antycyklonalnej, jak i cyklonalnej. W Krakowie takie wartości zmiennej standaryzowanej najczęściej pojawiały się w czasie napływu powietrza z SE, S, SW podczas cyrkulacji antycyklonalnej i z kierunków S, SW i W w czasie cyrkulacji cyklonalnej (rys. 6.10 i 6.11). Stałość kierunków adwekcji wyróżniających się skrajnymi wartościami odchyleń stężenia Rn-222 świadczy o znaczącej roli rodzaju masy powietrza (jej „historii", cech jakie nabywa powietrze poprzez kontakt z podłożem w drodze nad punkt pomiarowy) dla stężenia Rn-222 zmierzonego na danej stacji. Wymienione kierunki adwekcji dla ujemnych odchyleń stężenia Rn-222 wskazują na morskie masy powietrza, o znacznie mniejszym stężeniu tego radionuklidu niż masy lądowe, napływające w czasie rejestrowanych dodatnich odchyleń stężenia Rn-222.



Rys. 6.10. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza podczas sytuacji cyklonalnych w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009

Fig. 6.10. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on advection directions during cyclonic circulation in Kraków and Ciosny in 2008–2009

Na rysunkach 6.10 i 6.11 oprócz skumulowanych odchyleń zmiennej standaryzowanej przedstawiono także bezwzględne, średnie stężenie Rn-222 na tle kierunków adwekcji. Na obu stacjach niższe stężenia są notowane w czasie cyrkulacji cyklonalnej. Jest to konsekwencją większej dynamiki atmosfery podczas cyklonalnego typu pogody, kiedy to notowano, wyższe niż w dniach z cyrkulacją antycyklonalną, prędkości wiatru geostroficznego o 15,5% (Kraków) i 11,2% (Ciosny). Generalnie wnioski uzyskane z analiz w drugim etapie badań są potwierdzeniem prawidłowości, jakie ujawniła pierwsza część prezentowanych wyników –- potwierdzono m.in. opisane wcześniej kierunki adwekcji w środkowej i południowej Polsce uprzywilejowane pod względem wzrostu i spadku stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza.

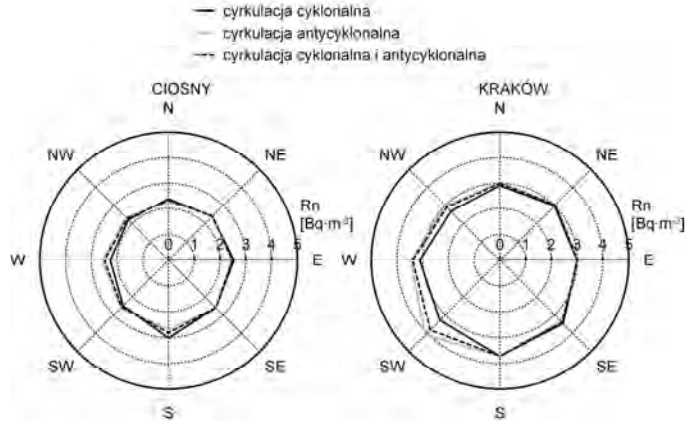


Rys. 6.11. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza podczas sytuacji antycyklonalnych w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009

Fig. 6.11. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on advection directions during anticyclonic circulation in Kraków and Ciosny in 2008–2009

Oceny wpływu transportu atmosferycznego Rn-222 z dalszych obszarów do miejsca pomiaru na poziom rejestrowanych wartości stężenia tego radionuklidu dokonano także na podstawie analizy uśrednionych najniższych wartości dobowych stężenia w zależności od kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji (rys. 6.12). Wnioskując na podstawie wszystkich danych, bez wyróżnienia charakteru cyrkulacji, największe minima dobowe odnotowano w Ciosnach i Krakowie dla kierunków SE, S i SW. Podczas cyrkulacji cyklonalnej w Cio-

snach dominującymi kierunkami pod względem najwyższych minimów dobowych stężenia Rn-222 były E, S, SW, a w czasie pogody antycyklonalnej - SE, S i SW. Południowy kierunek adwekcji wyróżniał się największym minimalnym stężeniem Rn-222 w obu typach cyrkulacji. W Krakowie w czasie cyrkulacji cyklonalnej uprzywilejowanym kierunkiem adwekcji pod względem wysokości minimalnego stężenia Rn-222 jest S, a w czasie cyrkulacji antycyklonalnej SW (rys. 6.12). Najniższe minima dobowe stężenia Rn-222 cechują kierunki napływu powietrza z sektora NW i N w Ciosnach i Krakowie (rys. 6.12).



Rys. 6.12. Średnie minimalne stężenia radonu w ciągu doby w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza oraz cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009

Fig. 6.12. Daily average minimum of radon concentration depending on the air masses advection directions and cyclonic and antycyclonic circulation in Kraków and Ciosny in 2008–2009

Kolejnym etapem analizy, zmierzającym do pełnego potwierdzenia wyżej opisanych wyników, było wyznaczenie na badanych stacjach częstości najwyższego dobowego stężenia Rn-222 w dwóch grupach dni, tj. w dniach ze stężeniem przekraczającym o 25% wartość przeciętną obliczoną z dobowych maksimów i w dniach ze stężeniem nie przekraczającym 25% wartości przeciętnej, w zależności od 8 kierunków wiatru geostroficznego i charakteru cyrkulacji w ciepłej i chłodnej porze roku w latach 2008 i 2009. Dla poszczególnych typów cyrkulacji sprawdzono stosunek częstości wysokich wartości stężenia Rn-222 do wartości niskich (tab. 6.2). W Krakowie w okresie kwiecień–wrzesień typem cyrkulacji wyróżniającym się znaczną przewagą frekwencji (7,5–krotną w 2008 r. i 4,5–krotną w 2009 r.) wysokiego stężenia Rn-222 > 125% przyjętej wartości nad frekwencją niskiego stężenia ≤ 25% przyjętej wartości był typ

SWa. Ponadto typy cyrkulacji Sa, Wa i SWc w tej porze roku w obu latach analizowanego okresu cechowały się większą częstością wysokiego stężenia Rn-222 w stosunku do wartości niskich (tab. 6.2). W Ciosnach, w ciepłej porze 2008 r. zdecydowana przewaga frekwencji wysokiego stężenia Rn-222 > 125% przyjętej wartości cechowała typy cyrkulacji SEa i Ea (4– i 3–krotna przewaga nad wartościami niskimi), a w 2009 r. typy cyrkulacji NEc i Na (4– i 3–krotna przewaga).

Tabela 6.2

Stosunek częstości wysokich wartości stężenia Rn-222 do wartości niskich dla poszczególnych kierunków adwekcji podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Ciosnach i Krakowie w 2008 r. i 2009 r. (do wysokich wartości zaliczono stężenia > 25% średniej maksymalnej dobowej wartości, a do niskich stężeń zaklasyfikowano wartości < 25% przyjętej wartości). Podkreślenie - wartości skrajne

Table 6.2

Ratio of frequency of high Rn-222 concentration to a low value for each direction of advection in cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Ciosny and Kraków in 2008 and 2009 (to high values include the concentration > 25% of the average maximum daily value, and concentration of < 25% of the assumed value are classified into low). Underline - extreme values

	Nc	**NEc**	**Ec**	**SEc**	**Sc**	**SWc**	**Wc**	**NWc**	**Na**	**NEa**	**Ea**	**SEa**	**Sa**	**SWa**	**Wa**	**NWa**
Ciosny 2008																
IV–IX	0,3	0,3	1,0	2,0	2,0	0,8	0,4	-	1,7	0,8	3,0	4,0	1,0	0,6	0,8	0,3
X–III	0,5	-	0,3	0,7	0,6	0,6	0,4	0,1	0,2	0,4	1,2	0,7	0,3	0,4	0,5	0,7
Ciosny 2009																
IV–IX	0,3	4,0	2,0	0,4	0,4	0,3	-	0,3	3,0	1,7	2,3	1,8	0,6	0,6	0,9	0,2
X–III	0,1	-	0,2	0,5	0,3	0,2	-	0,1	0,5	0,3	0,8	-	0,9	0,6	0,6	0,4
Kraków 2008																
IV–IX	0,3	0,1	0,1	-	-	1,3	-	0,3	0,1	-	0,1	0,4	2,0	7,5	1,4	0,5
X–III	-	-	1,0	2,0	1,0	0,3	0,1	-	-	-	-	0,7	0,2	0,7	0,3	0,1
Kraków 2009																
IV–IX	-	0,3	0,1	0,2	0,4	1,0	0,3	-	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	4,5	0,5	0,4
X–III	-	-	-	-	0,3	0,2	2,0	-	-	-	0,1	-	-	0,6	0,3	0,1

W środkowej Polsce w ciepłej porze roku w latach 2008 i 2009 notowano przewagę częstości wysokiego stężenia Rn-222 nad wartościami niskimi dla sektora adwekcji z kierunków N, NE, E i SE. W okresie październik–marzec na obu stacjach wystąpiła niższa częstość wysokiej aktywności promieniotwórczej Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza, co mogło wynikać z większej dynamiki przepływu powietrza związanej ze zwiększoną aktywnością cyklo-

nalną o tej porze roku oraz rzadziej pojawiającymi się sytuacjami słabogradientowymi. W Krakowie w obu analizowanych latach najczęściej w półroczu chłodnym duże wartości stężenia Rn-222 pojawiały się podczas cyrkulacji SWa i Wa, natomiast relacje pomiędzy stężeniami > 125% i ≤ 25% przyjętej wartości trudno jest jednoznacznie ocenić ze względu na niezbyt liczna próbę statystyczną niektórych typów cyrkulacji. W środkowej Polsce w chłodnej porze 2008 i 2009 r. stężenia Rn-222 przekraczające 25% przyjętej wartości pojawiały się najczęściej podczas typów cyrkulacji Ea, SEa.

6.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na zmienność dobową stężenia Rn-222

Badając zależność między stężeniem Rn-222 w przygruntowych warstwach powietrza a cyrkulacją atmosferyczną przeanalizowano także wpływ kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji na przebieg dobowy aktywności promieniotwórczej radonu. Regularność zmian stężenia Rn-222 z maksimum w godzinach nocnych i porannych oraz minimum w godzinach popołudniowych, nawiązująca do procesów mieszania powietrza w warstwie granicznej atmosfery, na wszystkich stacjach ujawniała się wyraźniej podczas antycyklonalnej cyrkulacji atmosferycznej (rys. 6.13). Największy dobowy zakres wahań średnich godzinnych stężeń Rn-222 wystąpił na 3 stacjach w antycyklonalnym typie pogody - w Łodzi podczas cyrkulacji SEa i Wa (2,6 $Bq \cdot m^{-3}$), w Ciosnach w typie Ea (9,7 $Bq \cdot m^{-3}$), w Krakowie podczas adwekcji z kierunku SWa (9,8 $Bq \cdot m^{-3}$) - tab. 6.3, rys. 6.14 i 6.15.

Najmniej wyraźnym cyklem dobowym stężenia Rn-222 cechuje się Łódź, gdzie przeciętne dobowe amplitudy stężenia zmieniały się od 1,6 $Bq \cdot m^{-3}$ dla kierunku Sa do 2,6 $Bq \cdot m^{-3}$ dla kierunków SWa i Wa. Analiza wartości ekstremalnych wskazuje, że w czasie adwekcji z kierunku S podczas cyrkulacji cyklonalnej najwyższe dobowe wartości ekstremalne stężenia Rn-222 notowano w Łodzi.

Generalnie wzrost ekstremalnych dobowych wartości stężenia Rn-222 był notowany dla adwekcji z całego sektora południowego, bez względu na charakter cyrkulacji, a szczególnie dla kierunku SW (tab. 6.3, rys. 6.14 i 6.15). Najniższe wartości ekstremalne stężenia Rn-222 w Łodzi przypadały w dniach z cyrkulacją cyklonalną podczas adwekcji z kierunku NW. Ten sam kierunek napływu mas powietrza towarzyszył najniższym dobowym wartościom ekstremalnym stężenia Rn-222 w Ciosnach - podczas cyklonalnego typu pogody notowano najniższe maksimum dobowe, 3,8 $Bq \cdot m^{-3}$, a podczas typu antycyklonalnego wystąpiło najniższe dobowe minimum, 1,4 $Bq \cdot m^{-3}$. Najwyższe średnie

dobowe maksimum w Ciosnach zarejestrowano podczas typu cyrkulacji Ea, 12,5 Bq·m^{-3} i SWa, 11,5 Bq·m^{-3}. Najwyższe średnie dobowe minimum było zarejestrowane w dniach z adwekcją powietrza z kierunków SE i S podczas cyrkulacji cyklonalnej, 4,3 Bq·m^{-3}. W Krakowie najwyższe średnie wartości ekstremalne stężenia Rn-222 w ciągu doby występowały podczas adwekcji z kierunku SW w antycyklonalnym typie pogody, natomiast najniższe dobowe ekstrema średniego stężenia Rn-222 były notowane w dniach z typem cyrkulacji NEa i NEc. Generalnie w Krakowie dla wzrostu stężenia Rn-222 uprzywilejowanymi sektorami są SW, S i W, bez względu na charakter cyrkulacji (tab. 6.3, rys. 6.14 i 6.15). Na wszystkich stacjach najsilniej zredukowany dobowy rytm zmian stężenia Rn-222 był obserwowany w dniach z adwekcją powietrza z sektorów NW i N (rys. 6.14 i 6.15). Wyraźny rytm dobowy w Ciosnach cechował dni z typami cyrkulacji Ea, SEa, NEa, a w Łodzi w dniach z cyrkulacją SEa i Wa. W Krakowie zmienność dobowa występowała najwyraźniej podczas cyrkulacji SWa, SWc, SEa i Wc (rys. 6.14 i 6.15).

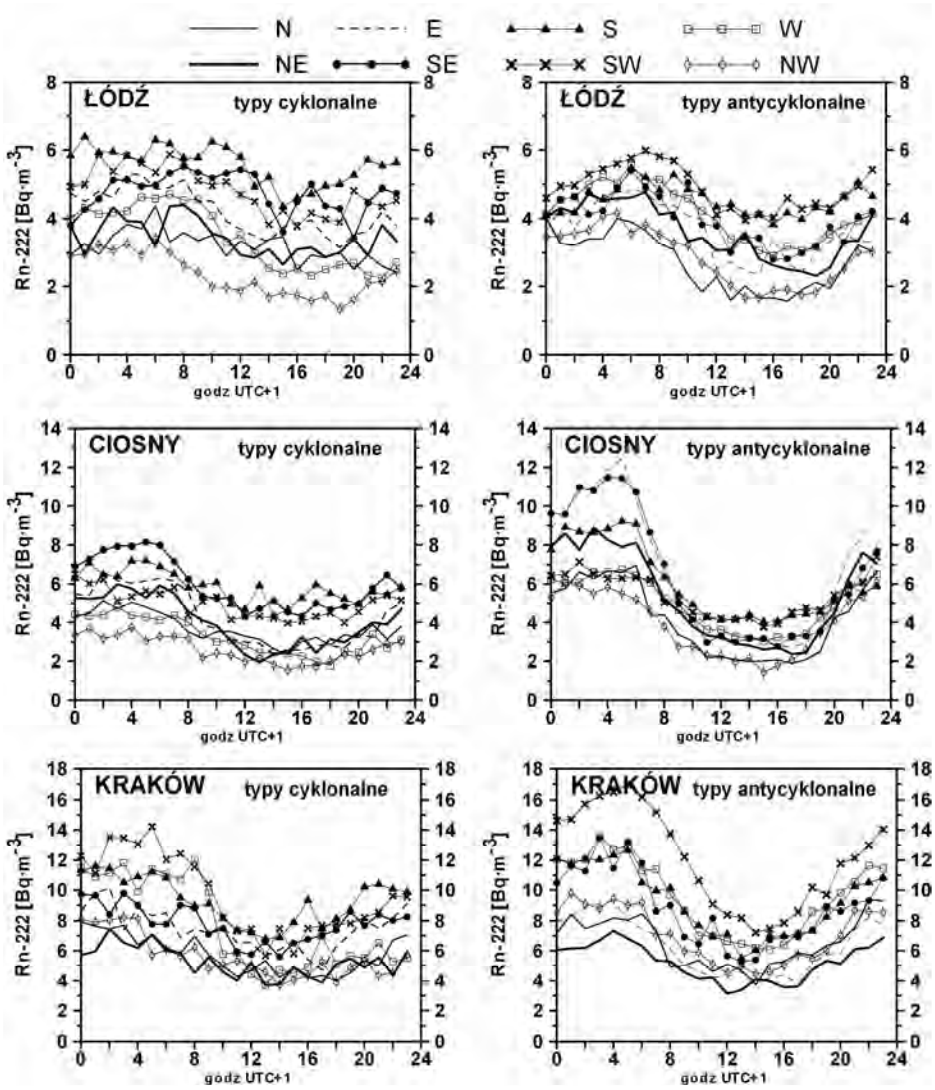
Tabela 6.3

Najwyższe i najniższe stężenie Rn-222 w średnim przebiegu dobowym oraz średni dobowy zakres wahań (ampl.) stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem dla poszczególnych kierunków wiatru geostroficznego podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009. Podkreślenie - wartości skrajne

Table 6.3

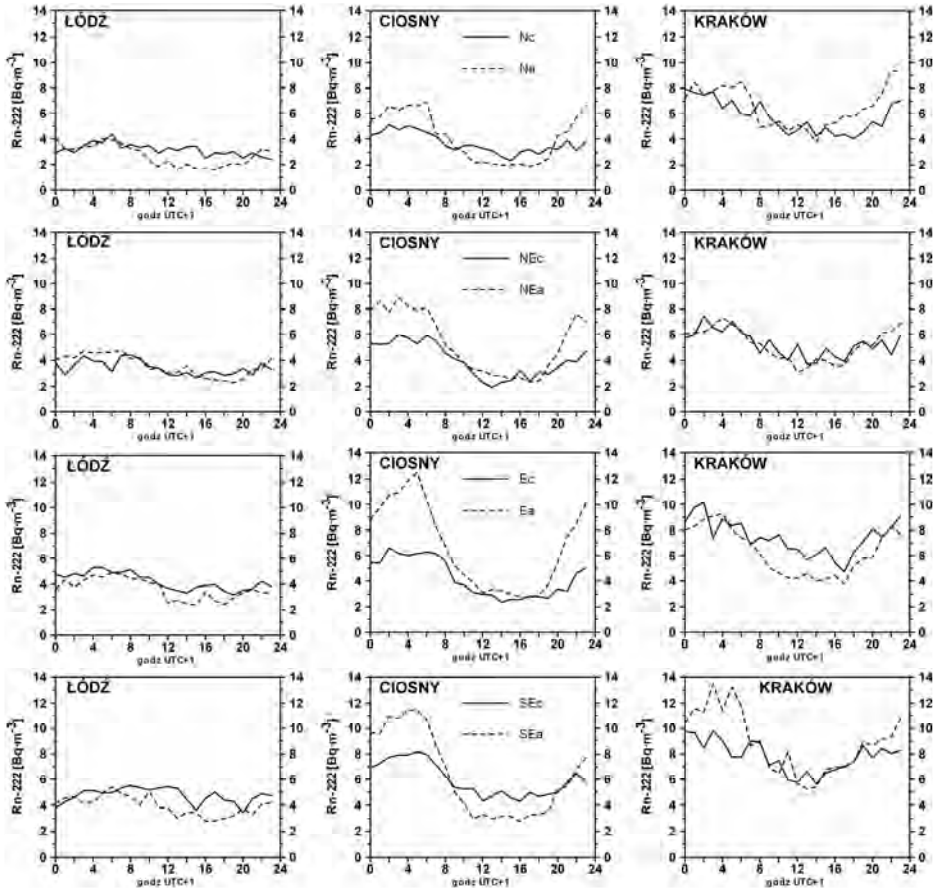
The highest and lowest Rn-222 concentration in the average daily course and the average daily range of fluctuation (ampl.) of radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above the ground for each geostrophic wind directions during cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Łódź Ciosny and Kraków in 2008–2009. Underline - extreme values

	Nc	**NEc**	**Ec**	**SEc**	**Sc**	**SWc**	**Wc**	**NWc**	**Na**	**NEa**	**Ea**	**SEa**	**Sa**	**SWa**	**Wa**	**NWa**
Łódź																
Max.	4,4	4,4	5,3	5,5	6,4	5,9	4,7	3,4	4,0	4,8	4,9	5,4	5,5	6,0	5,6	4,2
Min.	2,4	2,7	3,2	3,4	4,4	3,8	2,3	1,3	1,6	2,3	2,4	2,8	3,8	4,0	2,9	1,7
Ampl.	2,0	1,8	2,1	2,1	2,0	2,1	2,5	2,1	2,5	2,5	2,5	2,6	1,6	2,0	2,6	2,5
Ciosny																
Max.	5,1	6,0	6,6	8,2	7,2	6,5	4,8	3,8	7,0	8,9	12,5	11,5	9,2	7,4	6,8	6,1
Min.	2,3	2,0	2,4	4,3	4,3	4,0	1,8	1,6	1,9	2,4	2,7	2,8	4,0	3,8	3,0	1,4
Ampl.	2,8	4,0	4,3	3,8	2,9	2,5	3,0	2,2	5,1	6,5	9,7	8,7	5,2	3,6	3,7	4,7
Kraków																
Max.	7,9	7,5	10,2	9,8	11,6	14,2	12,1	8,2	9,4	7,4	9,3	13,5	12,6	17,0	13,5	9,8
Min.	4,0	3,7	4,7	5,6	6,8	5,7	3,7	3,7	3,7	3,1	3,8	5,3	5,5	7,2	6,1	4,5
Ampl.	3,9	3,8	5,5	4,2	4,7	8,5	8,3	4,5	5,6	4,2	5,5	8,2	7,1	9,8	7,4	5,3



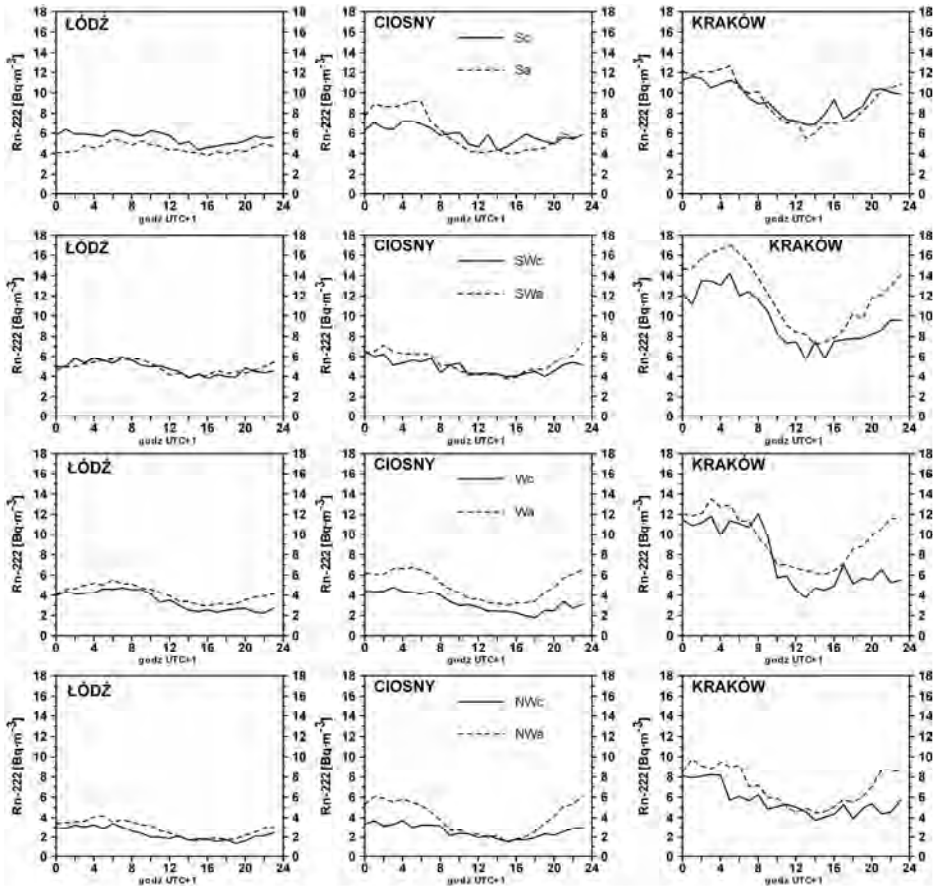
Rys. 6.13. Średnie przebiegi dobowe stężenia Rn-222 dla poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza podczas cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009

Fig. 6.13. Average daily course of Rn-222 concentration for each air masses advection directions during cyclonic and anticyclonic circulation in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2009



Rys. 6.14. Średnie przebiegi dobowe stężenia Rn-222 dla kierunku adwekcji mas powietrza N, NE, E, SE podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009

Fig. 6.14. Average daily course of Rn-222 concentration for the air masses advection directions N, NE, E, SE during cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Ciosny and Kraków in 2008–2009

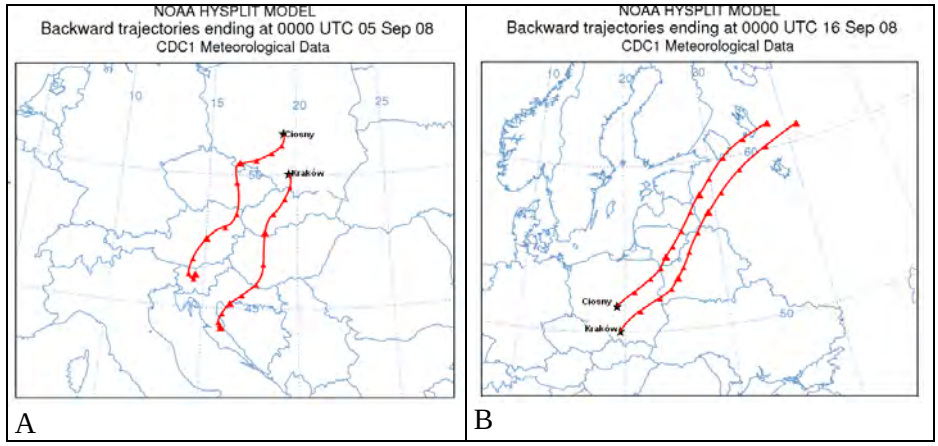


Rys. 6.15. Średnie przebiegi dobowe stężenia Rn-222 dla kierunku adwekcji mas powietrza S, SW, W, NW podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009

Fig. 6.15. Average daily course of Rn-222 concentration for the air masses advection directions S, SW, W, NW during cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Ciosny and Kraków in 2008–2009

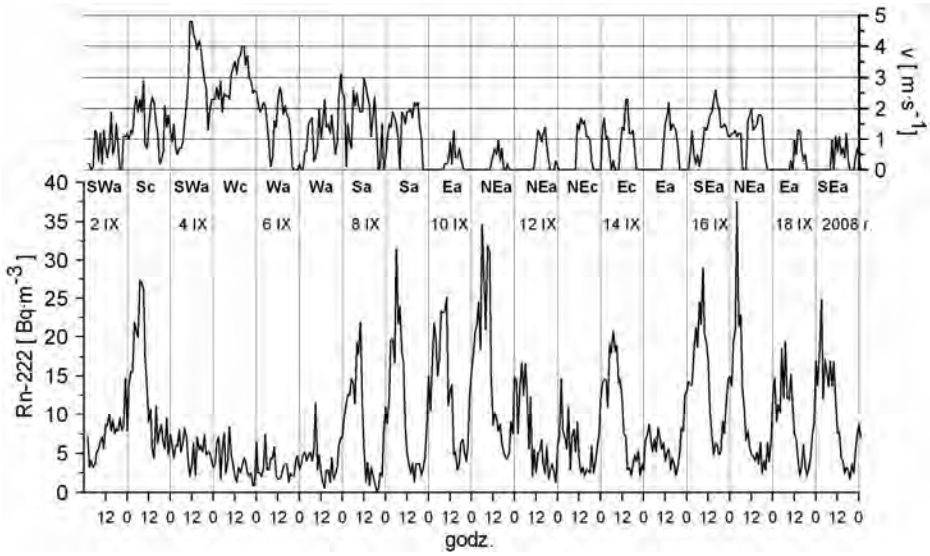
W celu pełniejszego zobrazowania wpływu charakteru cyrkulacji i kierunku adwekcji powietrza na zmienność dobową stężenia Rn-222 przeanalizowano aktywność promieniotwórczą tego radionuklidu w wybranych okresach wyróżniających się zmiennością kierunków adwekcji i typu cyrkulacji ze szczególnym uwzględnieniem obszaru źródłowego mas powietrza. Na rys. 6.17 i 6.18 przedstawiono stężenie Rn-222 na stacjach w Ciosnach i Krakowie w dniach od 2 do 19 września 2008 r. Przez pierwszą połowę badanego okresu w Kra-

kowie generalnie dominował napływ powietrza z sektora SW, a w środkowej Polsce z kierunków SW, W i S. W pozostałych dniach przeważała adwekcja z kierunków NE i E. Mapy ilustrujące wcześniejsze o 72 godz. położenie mas powietrza dla dwóch wybranych dni, wskazują na obszary kontynentalne (sektor S i E), gdzie powietrze „nasycało się" radonem, zanim dotarło do badanych stacji (rys. 6.16). Występują istotne różnice w charakterze przebiegu dobowego stężenia Rn-222 między środkową a południową Polską. W Krakowie maksimum stężenia Rn-222, 37,2 $Bq \cdot m^{-3}$, zarejestrowano na początku badanego okresu, tj. 03.09.2008 r., podczas cyrkulacji SWa, a w Ciosnach maksimum stężenia Rn-222 wystąpiło 17.09.2008 r. podczas cyrkulacji NEa, 37,5 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 6.17 i 6.18). W dniach od 03 do 07.09.2008 r. w południowej Polsce obserwowano regularny rytm dobowy stężenia Rn-222 z maksimum wczesnym rankiem i minimum popołudniu, o znacznych amplitudach stężenia rzędu 20–35 $Bq \cdot m^{-3}$. W tym czasie w Ciosnach przeważały niskie stężenia Rn-222, poniżej 10 $Bq \cdot m^{-3}$ bez wyraźnego rytmu dobowego, co mogło być konsekwencją dużych prędkości wiatru w przygruntowej warstwie powietrza (rys. 6.17 i 6.18).



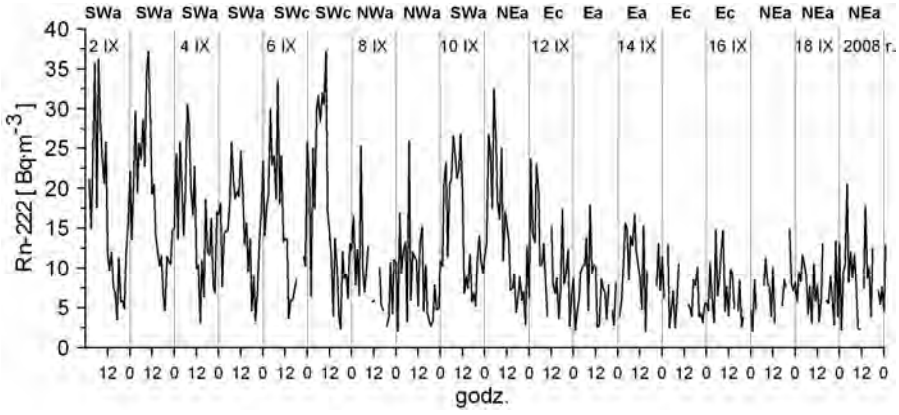
Rys. 6.16. Trajektorie wsteczne prezentujące o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza, przed napływem do stacji Ciosny i Kraków w dniach 5 (A) i 16 (B) września 2008 r. Trajektorie wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010)

Fig. 6.16. Backward trajectories presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny station and Kraków on 5th (A) and 16th (B) September 2008. Trajectories were determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010)



Rys. 6.17. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 oraz prędkości wiatru na wysokości 2 m nad gruntem na tle kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji (c - cyklonalna, a - antycyklonalna) w Ciosnach w okresie 2–19 września 2008 r.

Fig. 6.17. Daily course of Rn-222 concentration and wind speed at a height of 2 m above the ground on the background direction of advection and circulation type (c - cyclonic and a - anticyclonic) in Ciosny in the period 2nd–19th September 2008

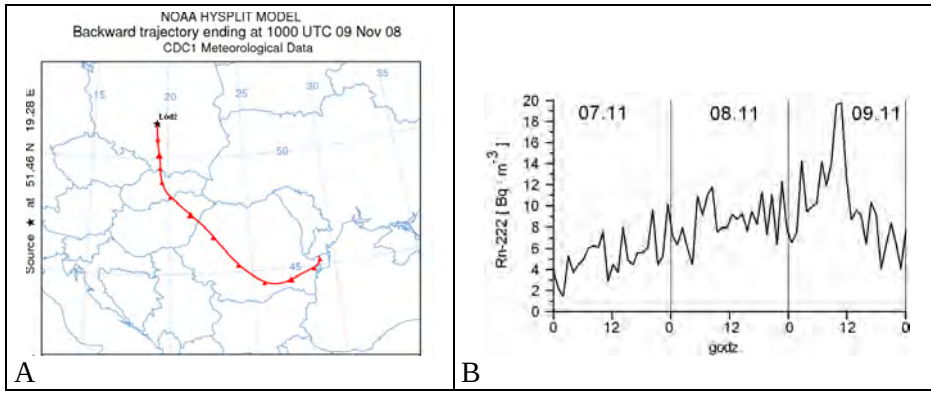


Rys. 6.18. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji (c - cyklonalna, a - antycyklonalna) w Krakowie w okresie 2–19 września 2008 r.

Fig. 6.18. Daily course of Rn-222 concentration on the background direction of advection and circulation type (c - cyclonic and a - anticyclonic) in Kraków in the period 2–19 September 2008

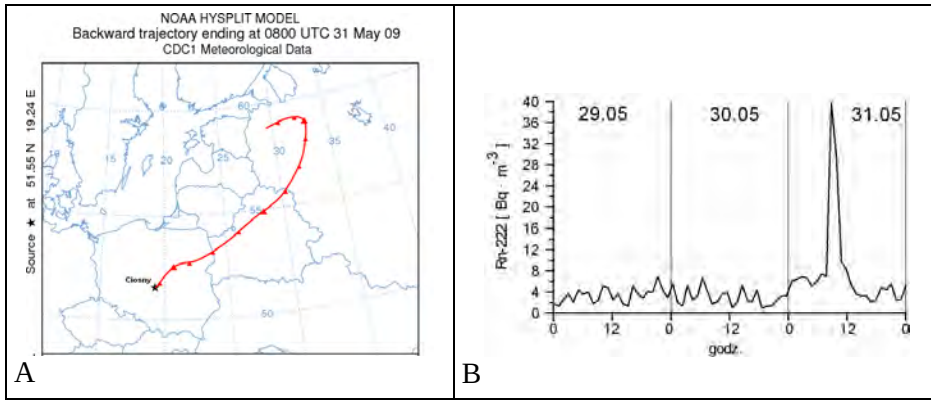
W dniach od 08 do 12.09.2008 r. na obu stacjach obserwowano dobrze zaznaczony cykl dobowy, a wyższe amplitudy dobowe cechowały stację Ciosny. Po 12.09.2008 r., kiedy to dominował nad Polską kierunek E i NE napływu powietrza, w Krakowie wystąpił spadek wartości stężenia Rn-222 i duża zmienność z godziny na godzinę, natomiast w środkowej Polsce rytm dobowy zmienności był wyraźny, z amplitudą rzędu 15–35 $Bq \cdot m^{-3}$. Przyczyną odmiennego oddziaływania kierunku adwekcji powietrza na poziom stężenia Rn-222 na stacjach w środkowej i południowej Polsce może być wpływ lokalnych warunków meteorologicznych, szczególnie ruchu powietrza w przyziemnej warstwie atmosfery. Na rysunku 6.17 przedstawiono stężenie Rn-222 w Ciosnach na tle rejestrowanej synchronicznie prędkości wiatru na wysokości 2 m nad gruntem. Przebieg tych dwóch elementów ilustruje wyraźną, odwrotną zależność koncentracji Rn-222 przy gruncie od intensywności ruchów powietrza. Na początku badanego okresu w Ciosnach rejestrowano największe prędkości wiatru, powyżej 3 $m \cdot s^{-1}$, co mogło być główną przyczyną redukcji stężenia Rn-222 i zaniku rytmu dobowego. Od 10.09.2008 roku, kiedy to nastąpiła zmiana kierunku adwekcji na wschodni, regularnemu rytmowi dobowemu prędkości wiatru z zanikiem ruchu powietrza w godzinach nocnych towarzyszył przeciwny rytm zmian stężenia Rn-222 z maksimum podczas cisz. Rola wiatru przyziemnego wydaje się być istotnym czynnikiem modyfikującym przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w badanym okresie. Brak danych z tego okresu o prędkości wiatru dla Krakowa uniemożliwiło zbadanie czy istnieją podobne zależności również na tej stacji.

W dalszej części analizy zbadano trajektorie mas powietrza napływających nad stacje w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w dniach z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 odpowiednio 20 $Bq \cdot m^{-3}$, 40 $Bq \cdot m^{-3}$ i 86 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 6.19–6.21). Na wszystkich stacjach ekstremum stężenia przypada na adwekcję powietrza z sektorów kontynentalnych (S i E) o podwyższonym potencjale radonowym (większa zawartość radu w podłożu). W przypadku Łodzi i Krakowa była to adwekcja z kierunku S, a w Ciosnach z kierunku NE. Na rysunku 6.22 przedstawiono przykład trajektorii masy powietrza napływającej znad Atlantyku do Polski w dniu 18.03.2009 r., kiedy to na 3 badanych stacjach notowano niskie wartości stężenia Rn-222. W dniach od 16.03 do 18.03.2009 r. wystąpiła cyrkulacja cyklonalna i do Polski napływało powietrze polarnomorskie z sektorów NW i N. W środkowej i południowej Polsce notowano wówczas niskie średnie stężenia Rn-222, odpowiednio 3,8 $Bq \cdot m^{-3}$ i 7,3 $Bq \cdot m^{-3}$ (rys. 6.22). Można przypuszczać, że w analizowanych dniach składowa transportu radonu wraz z masami powietrza morskiego ubogiego w ten radionuklid, podczas dynamicznej cyrkulacji cyklonalnej miała marginalne znaczenie dla rejestrowanych stężeń Rn-222.



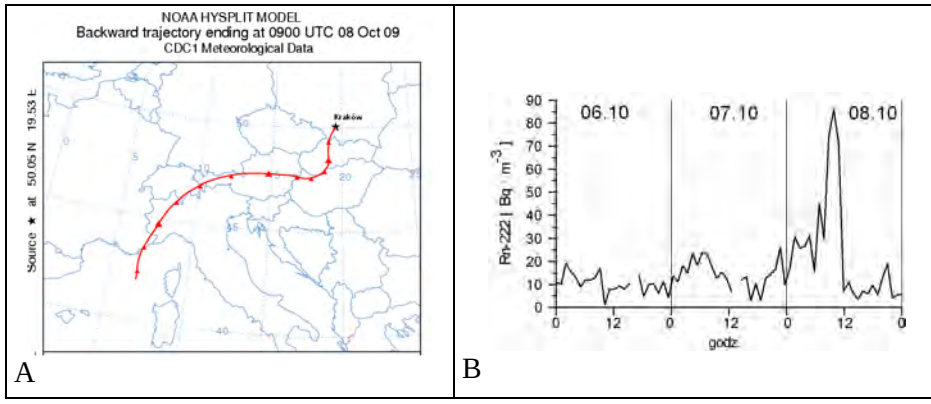
Rys. 6.19. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Łodzi w dniu 09.11.2008 r. - dzień z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 w latach 2008–2010. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi w dniach 07–09.11.2008 r.

Fig. 6.19. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Łódź on 9th November 2008 - day with the highest absolute hourly Rn-222 concentration in 2008–2010. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. Daily course of Rn-222 concentration in Łódź in the period 7th–9th November 2008



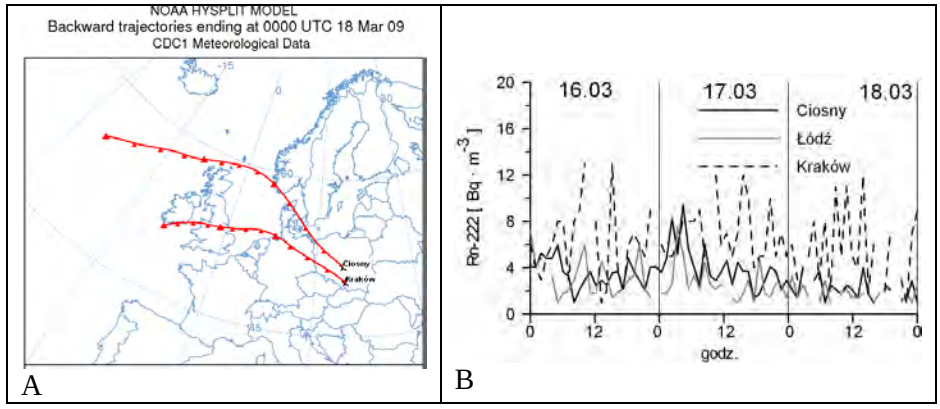
Rys. 6.20. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Ciosen w dniu 31.05.2009 r. - dzień z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 w latach 2008–2010. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w dniach 29–31.05.2009 r.

Fig. 6.20. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny on 31st May 2009 - day with the highest absolute hourly Rn-222 concentration in 2008–2010. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. Daily course of Rn-222 concentration in Ciosny in the period 29th–31st May 2009



Rys. 6.21. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Krakowa w dniu 08.10.2009 r. - dzień z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 w latach 2008–2010. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Krakowie w dniach 06–08.10.2009 r.

Fig. 6.21. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Kraków on 8th October 2009 - day with the highest absolute hourly Rn-222 concentration in 2008–2010. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. The daily course of Rn-222 concentration in Kraków in the period 6th–08th October 2009

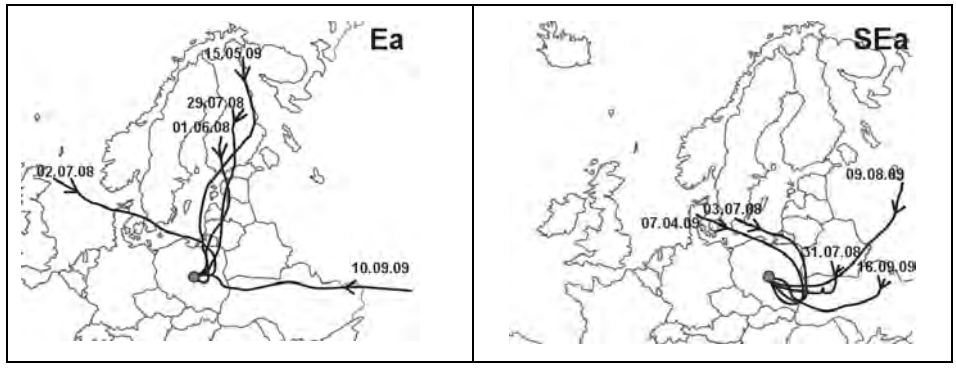


Rys. 6.22. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Ciosen i Krakowa w dniu 18.03.2009 r. - okres z cyrkulacją cyklonalną z sektora NW i N i niskim stężeniem Rn-222 bez rytmu dobowego na 3 stacjach. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na stacjach w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w dniach 16–18.03.2009 r.

Fig. 6.22. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny and Kraków on 18th March 2009 - period of cyclonic circulation in the sector S and N, and low Rn-222 concentration without a daily rhythm for 3 stations. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. Daily course of Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in the period 16th–18th March 2009

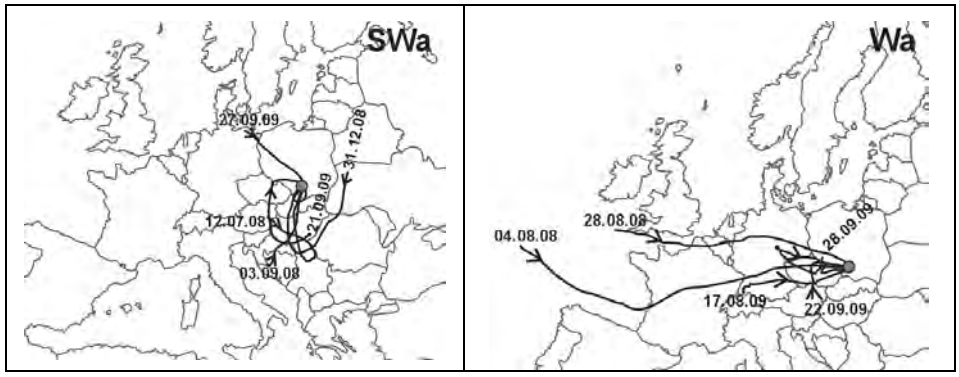
Trajektorie wsteczne mas powietrza wyznaczono także dla stacji Ciosny i Kraków podczas dwóch typów cyrkulacji atmosferycznej, wyróżniających się najwyższym maksymalnym dobowym stężeniem Rn-222. Do analizy wybrano 20 przypadków o najwyższym rejestrowanym stężeniu Rn-222. Najwyższe średnie maksymalne stężenie Rn-222 w środkowej Polsce jest charakterystyczne dla typu cyrkulacji SEa i Ea. W przypadku cyrkulacji SEa przemieszczanie się mas powietrza w ciągu 72 godzin przed wystąpieniem analizowanego maksimum odbywało się głównie nad obszarami lądowymi położonymi na wschód od Polski oraz nad terenami wzdłuż północnych i wschodnich granic Polski (rys. 6.23). Ostatnia z wymienionych trajektorii pojawia się także podczas cyrkulacji typu Ea. W innych przypadkach, podczas występowania tego typu cyrkulacji, trasa przemieszczania się mas powietrza przebiega od Finlandii poprzez wschodnie wybrzeża Bałtyku do środkowej Polski. W Krakowie najwyższe stężenia Rn-222 były rejestrowane podczas typów cyrkulacji SWa i Wa. Szlak przemieszczania się mas powietrza nad Kraków podczas cyrkulacji SWa biegnie głównie przez obszary lądowe na południe od Polski (rys. 6.24). Nieco inne trasy mas powietrza występują w przypadku cyrkulacji Wa - zazwyczaj masy powietrza przemieszczają się wzdłuż obszarów górskich położonych na południowy zachód od Krakowa.

Analizując budowę geologiczną i potencjał radonowy Europy na trasach przepływu powietrza nad badane stacje można przypuszczać, że transport atmosferyczny, obok składowej lokalnej, mógł być istotną składową rejestrowanego stężenia Rn-222. Obszary Czech i Słowacji oraz południowej Polski, skąd powietrze kierowało się bezpośrednio nad Kraków i Łódź to obszary o większych wartościach współczynnika ekshalacji radonu w stosunku do centralnej Polski (Strzelecki i Wołkowicz 1993). Obszar północno-wschodniej Polski, skąd napływało powietrze do stacji Ciosny, podobnie jak południe Polski, cechuje się większą zawartością radu, prekursora radonu w podłożu (*Radiologiczny Atlas Polski* 2006). Trudno jednak o dokładną ocenę siły oddziaływania czynnika makroskalowego w postaci transportu atmosferycznego na stężenie Rn-222 przy gruncie w obliczu jednoczesnego oddziaływania wielu czynników, m.in. turbulencji w atmosferze oraz braku informacji o rozkładzie stężenia w profilu pionowym troposfery.



Rys. 6.23. Trajektorie wsteczne mas powietrza prezentujące o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Ciosen podczas cyrkulacji Ea i SEa w przypadkach, gdy maksimum dobowe stężenia Rn-222 stanowiło odpowiednio > 140% i > 100% średniej wartości maksymalnej stężenia Rn-222. Trajektorie wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010)

Fig. 6.23. Backward trajectories presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny during the circulation of Ea and SEa, where maximum daily Rn-222 concentration constituted > 140% and > 100% of maximum value of Rn-222 concentration. Trajectories were determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010)



Rys. 6.24. Trajektorie wsteczne mas powietrza prezentujące o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Krakowa podczas cyrkulacji SWa i Wa w przypadkach, gdy maksimum dobowe radonu Rn-222 stanowiło odpowiednio > 75% i > 70% średniej wartości maksymalnej Rn-222. Trajektorie wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010)

Fig. 6.24. Backward trajectories presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Kraków during the circulation of SWa and Wa, where maximum daily Rn-222 concentration constituted > 75% and > 70% of maximum value of Rn-222 concentration. Trajectories were determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010)

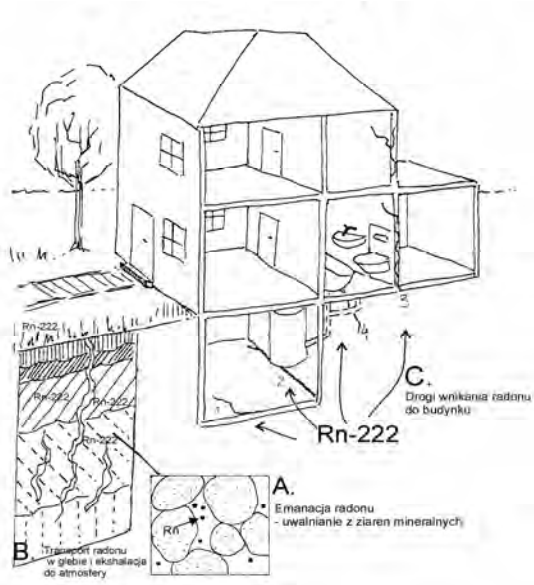
6.4. Radon w budynkach. Wpływ pogody antycyklonalnej i cyklonalnej na stężenie Rn-222 w domu dwukondygnacyjnym w Łodzi

Na podstawie intensywnych badań promieniotwórczości powietrza w budynkach w latach 70. i 80. XX w. uznano, że podłoże geologiczne jest głównym źródłem Rn-222 w pomieszczeniach mieszkalnych. Udział procentowy poszczególnych źródeł radonu w budynkach określony przez Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego - UNSCEAR (1988) przedstawia się następująco: podłoże - 77,9%, materiały budowlane - 12%, powietrze atmosferyczne - 9,3%, woda - 0,2%, gaz ziemny - 0,6%.

Migracja radonu w glebie ku powierzchni ziemi zachodzi głównie w wyniku procesów dyfuzji wywołanej gradientem stężenia oraz konwekcji wywołanej gradientem temperatury i ciśnienia (rys. 6.25). Czynniki determinujące stężenie Rn-222 w przypowierzchniowej warstwie gleby, skąd ten radionuklid będzie przedostawał się do atmosfery, to m.in. zawartość radu w podłożu, porowatość i przepuszczalność skał - np. utwory gruboklastyczne, tj. piaski z niewielką domieszką frakcji ilastej, żwiry, lessy ułatwiają migrację radonu i mogą gromadzić duże ilości gazu w przestrzeniach porowych. Inne determinanty to wilgotność gleby, położenie zwierciadła wód gruntowych (najwyższe wiosną, zmniejszające wartości stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym), budowa tektoniczna podłoża - spękania w skałach ułatwiają transport radonu, cechy sedymentacyjne podłoża - nieciągłości warstw skalnych sprzyjają migracji radonu. Ważną rolę dla koncentracji Rn-222 w przypowierzchniowej warstwie gleby pełnią czynniki meteorologiczne, tj. rozkład temperatury w profilu pionowym gleby, warunkujący intensywność przepływu powietrza, ciśnienie atmosferyczne - wzrost ciśnienia zatrzymuje Rn-222 w glebie, podobnie jak występowanie pokrywy śnieżnej i przemarznięcie gleby. Spadek stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym jest notowany po opadach atmosferycznych i roztopach wiosennych (UNSCEAR 2000, Winkler i in. 2001, Janik 2005, Fujiyoshi i in. 2006).

Radon migruje z gleby do budynków na drodze dyfuzji i konwekcji potęgowanej tzw. „efektem kominowym”. Ujemna różnica ciśnienia powietrza między wnętrzem budynku a otoczeniem (rzędu kilku Pa) jest uważana za główny mechanizm transportu radonu z gruntu do budynków. Powietrze z radonem jest „zasysane” z podłoża na skutek różnicy ciśnienia między budynkiem a gruntem przez szczeliny w fundamentach, podłodze, ścianach, przez złącza konstrukcyjne, otwory wokół rur kanalizacyjnych itp. (rys. 6.25). Niższe ciśnienie panujące w budynku jest najczęściej wynikiem wyższej temperatury powietrza, działania wentylacji, zatem zimą najczęściej obserwowany jest wzrost stężenia Rn-222 w budynkach (Nazaroff i Nero 1988). Ciepłe powietrze

unosząc się w budynku działa jak pompa ssąca wyciągając radon z podłoża, a brak podpiwniczenia ułatwia przenikanie radionuklidu bezpośrednio do pomieszczeń mieszkalnych. W zimie na wzrost tzw. „efektu kominowego" nakłada się także słabsze przewietrzanie budynku w stosunku do okresu letniego, co dodatkowo przyczynia się do wzrostu stężenia Rn-222 w pomieszczeniach.



Rys. 6.25. A. Emanacja - proces uwalniania Rn-222 z ziaren mineralnych do przestrzeni międzyziarnowej; B. Schemat profilu glebowego, w którym odbywa się emanacja Rn-222, transport Rn-222 drogą dyfuzji i konwekcji oraz ekshalacja Rn-222, tj. uwalnianie radonu z podłoża do atmosfery; C. Drogi wnikania Rn-222 do budynku: 1 - pęknięcia i szczeliny w podłodze, 2 - nieszczelności wynikające z konstrukcji budynku, np. szczeliny na łączeniu ścian z podłogą, 3 - pęknięcia w ścianach, 4 - nieszczelności wokół rur kanalizacyjnych (opracowanie własne)

Fig. 6.25. A. Emanation - process of release of Rn-222 from mineral grains to intergranular space B. Soil profile scheme in which emanation of Rn-222 occurs, Rn-222 transport by diffusion and convection, and Rn-222 exhalation, ie. release radon from the substrate to the atmosphere; C. Routes of Rn-222 penetrating the building: 1 - cracks and fissures in the floor, 2 - leaks resulting from the construction of the building such as the walls of the slot to connect to the floor, 3 - cracks in the walls, 4 - leakage around pipes (own elaboration)

Efektywność transportu radonu z podłoża do budynków jest silnie uzależniona od przepuszczalności podłoża i konstrukcji budynku. Dla stężenia Rn-222 w pomieszczeniach oprócz transportu będzie miał znaczenie także system wentylacji budynku i sposób bytowania mieszkańców - m.in. częstość

otwieranie okien. Wyższe prawdopodobieństwo wzrostu stężenia Rn-222 cechuje nowoczesne budynki o konstrukcjach ograniczających emisję ciepła niż budynki o nieszczelnej konstrukcji np. wielkopłytowe (Majborn 1992, Łoskiewicz 1996, UNSCEAR 2000, Janik i in. 2007, De Francesco i in. 2010).

Standardy średniego rocznego stężenia Rn-222 w budynkach mieszkalnych dla ochrony przed promieniowaniem jonizującym obowiązujące w Unii Europejskiej zawierają się w granicach 200 $Bq \cdot m^{-3}$–600 $Bq \cdot m^{-3}$, a w miejscach pracy 1000 $Bq \cdot m^{-3}$. Przekroczenie tych norm wg Dyrektywy Unii Europejskiej wymaga podjęcia kroków w celu redukcji stężenia Rn-222 (Euratom 1996) Światowa Organizacja Zdrowia w publikacji z 2009 r. pt. *„The WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective”* rekomenduje wartość 100 $Bq \cdot m^{-3}$ jako krajową normę stężenia radonu w budynkach. W wymienionej publikacji radon wymieniany jest jako drugi po dymie tytoniowym czynnik ryzyka chorób nowotworowych płuc.

W Polsce nie ma przepisów dotyczących narażenia na promieniowanie jonizujące od radonu. W drugiej połowie lat 90. ubiegłego wieku Prezes Państwowej Agencji Atomistyki opublikował zarządzenie, według którego stężenie Rn-222 w budynkach istniejących nie mogło przekraczać 400 $Bq \cdot m^{-3}$, a w nowych 200 $Bq \cdot m^{-3}$. Ostatecznie zarządzenie to anulowano, po kilkakrotnym przesuwaniu terminu jego wejścia w życie. Nowelizacja „Prawa Atomowego” z 2004 r. zniosła wszystkie ograniczenia dotyczące dopuszczalnych stężeń Rn-222 w powietrzu w budynkach, traktując występowanie radonu jako narażenie naturalne, rozumiane jako nie podlegające ograniczeniom (*Ustawa* … 2000). Proces migracji i gromadzenia się Rn-222 w budynkach, uwarunkowany m.in. „efektem kominowym” trudno kwalifikować jako naturalny, zatem wycofanie norm stężenia Rn-222 w pomieszczeniach mieszkalnych nasuwa pewne wątpliwości (Przylibski 2005). Jedynym aktem prawnym aktualnie obowiązującym w Polsce i pośrednio związanym z narażeniem na radon jest Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2 stycznia 2007 r. dotyczące zawartości izotopów promieniotwórczych potasu K-40, toru Th-228 i radu Ra-226 w materiałach budowlanych (Dziennik Ustaw z 2007 Nr. 04 poz. 29). Zagadnienie stężenia Rn-222 w pomieszczeniach nie powinno być marginalizowane, z uwagi na fakt, iż w naszej strefie klimatycznej proporcja czasu ekspozycji na radon i jego pochodne to 80% przebywania w budynkach i 20% na wolnym powietrzu (UNSCEAR 2000).

Pomiary stężenia Rn-222 w domach mieszkalnych są wykonywane od wielu lat w wielu krajach na świecie (UNSCEAR 2000), a także w Polsce (np. Biernacka i in. 1991, Niewiadomski 1995, Nowina-Konopka 1995, Mamont-Cieśla i in. 1995, 2010, Łoskiewicz 1996, Bem i in. 1999, Skowronek i in.

1999, Ostrowska 2002, Karpińska i in. 2004a, 2004b, Wysocka i in. 2004, Kozak i in. 2011, Olszewski i Skubalski 2011).

Według Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR 2000) średnie stężenie Rn-222 w budynkach dla całej kuli ziemskiej wynosi 39 $Bq \cdot m^{-3}$. Organizacja ta podaje, iż rekordowo wysokie wartości stężenia w budynku zarejestrowano w Szwecji, tj. 85 000 $Bq \cdot m^{-3}$. W Europie podwyższonym przeciętnym stężeniem Rn-222 w budynkach w stosunku do średniej światowej wyróżniają się m.in. Czechy (140 $Bq \cdot m^{-3}$), państwa skandynawskie, alpejskie oraz części południowej kontynentu.

W Polsce średnia krajowa stężenia tego radionuklidu w budynkach wg *Radiologicznego Atlasu Polski* (2006) wynosi 49 $Bq \cdot m^{-3}$ i zmienia się od 21 $Bq \cdot m^{-3}$ w woj. zachodniopomorskim do 70 $Bq \cdot m^{-3}$ w woj. małopolskim. Średni poziom stężenia Rn-222 w woj. łódzkim wynosi 43 $Bq \cdot m^{-3}$. Przedstawione dane to wartości uśrednione dla większego obszaru nie odzwierciedlające w pełni poziomu stężenia w poszczególnych budynkach, które jest silnie uzależnione od szeroko rozumianego środowiska geologicznego.

W Polsce badania stężenia Rn-222 w budynkach na szerszą skalę w różnych regionach kraju były prowadzone w latach 90. XX w. i są kontynuowane przez różne zespoły badawcze, m.in. Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, Główny Instytut Górnictwa, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Instytut Medycyny Pracy w Łodzi, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku, Instytut Fizyki Uniwersytetu Ślaskiego. Jednym z obszarów intensywnych badań stężenia Rn-222 w budynkach w latach 90. XX w. była Polska Południowo-Wschodnia (Niewiadomski 1995, Łoskiewicz 1996).

Jak podaje Niewiadomski (1995) średnie stężenie radonu w tej części Polski (główne miasta, w których wykonano pomiary to Bielsko-Biała, Kielce, Kraków, Krosno, Nowy Sącz, Przemyśl, Rzeszów) w I i II serii pomiarów wynosiło odpowiednio 70 $Bq \cdot m^{-3}$ i 85 $Bq \cdot m^{-3}$, a zakres wyników pomiarów to 12–756 $Bq \cdot m^{-3}$. Chwilowe stężenia Rn-222 mogą być dużo wyższe od średniej. Przykładem może być chwilowe stężenie Rn-222 w budynku w okolicy Krakowa, tj. 2 500 $Bq \cdot m^{-3}$, zarejestrowane w czasie badań radiometrycznych w woj. małopolskim przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych PAN (Janik 2005). Drugim regionem intensywnych badań stężenia radonu w budynkach mieszkalnych była Polska Północno-Wschodnia (Zalewski i in. 1997a, Karpińska i in. 2004a, 2004b, Karpińska 2007). Według Zalewskiego i in. (1997a) stężenie w tej części Polski zmieniało się od 1 do 1 100 $Bq \cdot m^{-3}$, a średnia to 36,6 $Bq \cdot m^{-3}$. Stężenie 1 100 $Bq \cdot m^{-3}$ było zarejestrowane w miejscowości Sidra, w piwnicy 100–letniego domu z cegły. Na Suwalszczyźnie, na terenie jednej wsi, wyniki pomiarów stężenia Rn-222 w domach zmieniały się od 24 $Bq \cdot m^{-3}$ do 2 178 $Bq \cdot m^{-3}$. Tak duża zmienność przestrzenna stężenia promienio-

twórczego tego radionuklidu na niewielkim obszarze wynika głównie z konstrukcji budynków, a także sposobów ich użytkowania oraz nierównomiernego rozkładu radu, prekursora radonu, w skorupie ziemskiej, budowy geologicznej (Karpińska 2007). Podobną dużą zmienność stężenia Rn-222 w budynkach rejestrowano na terenie południowo–zachodniej Polski, tj. Sudetów, okolic Kowar, Jeleniej Góry, Wałbrzycha. W Świeradowie Zdroju rozpiętość przedziału stężenia Rn-222 w piwnicach domów wynosiła od 13,6 $Bq \cdot m^{-3}$ do 5 723,9 $Bq \cdot m^{-3}$, a na parterze od 14,8 $Bq \cdot m^{-3}$ do 2 837,9 $Bq \cdot m^{-3}$ (Karpińska 2007). Rekordowo wysokie stężenie Rn-222 zarejestrowali pracownicy Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN w budynku w okolicach Jeleniej Góry, tj. 15 000 $Bq \cdot m^{-3}$ (Janik 2005). Na podstawie badań przeprowadzonych w latach 90. XX w. na terenie Dolnego Śląska i Sudetów stwierdzono, że właśnie w tym regionie Polski najwięcej jest domów ze średnim rocznym stężeniem Rn-222 powyżej 200 $Bq \cdot m^{-3}$. Szczególnie wysokimi stężeniami z zakresu 200–500 $Bq \cdot m^{-3}$ cechowały się domy w Kotlinie Kłodzkiej, Świeradowie Zdroju, Czerniawie Zdroju (za Przylibskim 2005).

Również w latach 90. XX w. przeprowadzono akcję pomiarów stężenia Rn-222 w 505 budynkach Polski Północno-Zachodniej. Zakres rejestrowanych stężeń to 10,9 $Bq \cdot m^{-3}$–231,9 $Bq \cdot m^{-3}$, ze średnią wartością odpowiadającą średniej dla kuli ziemskiej, 39,8 $Bq \cdot m^{-3}$. Stężenie Rn-222 powyżej 200 $Bq \cdot m^{-3}$ wystąpiło tylko w dwóch budynkach spośród 505 przebadanych (Nowina-Konopka 1995).

W latach 90. XX w. Wydział Chemiczny Politechniki Łódzkiej przeprowadził badania stężenia radonu w około 1000 budynkach aglomeracji łódzkiej (Łódź, Pabianice, Zgierz). Wyniki pomiarów wykazały zmienność wartości od 3 $Bq \cdot m^{-3}$ do 190,7 $Bq \cdot m^{-3}$, a średnie stężenie Rn-222 wynosiło 21,2 $Bq \cdot m^{-3}$. 90% uzyskanych wyników pomiarów w Łodzi nie przekraczało 40,8 $Bq \cdot m^{-3}$. W pomieszczeniach na parterze, I i II kondygnacji przeciętne stężenie Rn-222 wynosiło 23,9 $Bq \cdot m^{-3}$, a powyżej II piętra poziom stężeń był niższy i wynosił 15,2 $Bq \cdot m^{-3}$ (Bem i in. 1999, Ostrowska 2002, Bem 2005). Instytut Medycyny Pracy w Łodzi prowadził badania stężenia Rn-222 w ok. 10 mieszkaniach na terenie Łodzi na przełomie lat 1998/1999, 2008/2009 oraz przez 6 miesięcy w 2005 r. Średnie roczne stężenie radonu w dwóch pierwszych okresach wynosiło odpowiednio 91 $Bq \cdot m^{-3}$ i 75 $Bq \cdot m^{-3}$, a średnia za pół roku wyniosła 52 $Bq \cdot m^{-3}$ (Olszewski i Skubalski 2011)

Najnowsze, obejmujące okres od marca 2008 r. do lutego 2009 r., ogólnopolskie badania stężenia Rn-222 były wykonane równocześnie przez kilka zespołów badawczych w 132 domach rozmieszczonych we wszystkich regionach Polski (okolice Szczecina, Gdańska, Olsztyna, Białegostoku, Poznania, Łodzi, Warszawy, Wrocławia, Katowic, Krakowa i Rzeszowa) - Kozak i in. 2011.

Celem tych badań było wyznaczenie miesięcznych współczynników korekcyjnych do szacowania rocznej dawki stężenia Rn-222 w budynkach w Polsce. Współczynniki te wyznaczono na podstawie sezonowej zmienności rejestrowanych stężeń radonu. Zakres zmienności stężenia Rn-222 w 132 analizowanych budynkach wynosił od 5 $Bq \cdot m^{-3}$ do 1 769 $Bq \cdot m^{-3}$. Najniższe stężenia rejestrowano latem, a najwyższe w listopadzie. Generalnie wysokie stężenia Rn-222 cechowały miesiące zimowe (grudzień, styczeń i luty) oraz wczesną wiosnę (marzec i kwiecień). Średnia dla poszczególnych miesięcy zmieniała się od 82 $Bq \cdot m^{-3}$ (sierpień) do 167 $Bq \cdot m^{-3}$ (listopad), a największym zakresem wahań wyróżniał się luty i marzec odpowiednio 1 359 $Bq \cdot m^{-3}$ i 1 761 $Bq \cdot m^{-3}$ (Kozak i in. 2011).

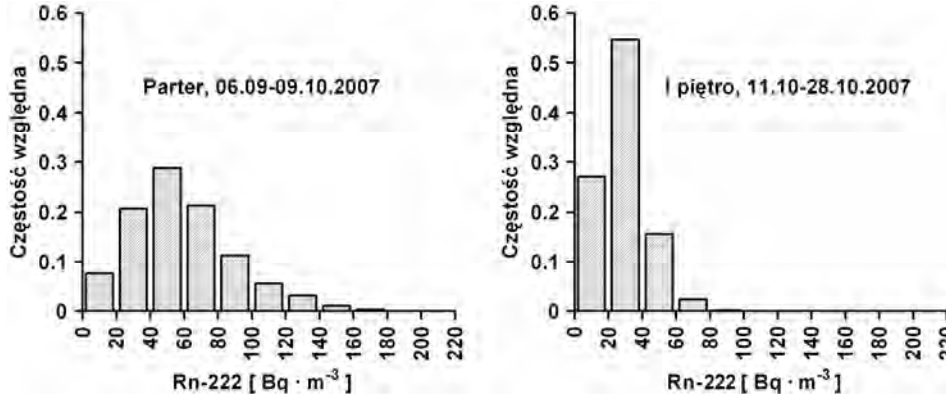
Główny Instytut Górnictwa prowadził pomiary stężenia radonu w budynkach na Górnym Śląsku ze szczególnym uwzględnieniem oceny wpływu na poziom rejestrowanych stężeń cech podłoża - tektoniki i stratygrafii oraz działalności górniczej (Skowronek i in. 1999, Wysocka i Chałupnik 2003, Wysocka i in., 2003, Wysocka i in. 2004, 2005). W północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) średnie stężenie radonu zmieniało się od 8 $Bq \cdot m^{-3}$ do 362 $Bq \cdot m^{-3}$, przy średniej wartości 60 $Bq \cdot m^{-3}$. W części południowej i zachodniej GZW (obszar występowania nieprzepuszczalnych iłów mioceńskich utrudniających migracje gazów) zarejestrowano wartości stężeń Rn-222 w budynkach w zakresie 8 $Bq \cdot m^{-3}$–128 $Bq \cdot m^{-3}$ (średnio 42 $Bq \cdot m^{-3}$). Autorzy potwierdzili tezę o decydującym wpływie warunków geologicznych i odległości od podłoża na poziom stężeń Rn-222 w powietrzu w pomieszczeniach mieszkalnych (za Skowronek i in. 1999). Badania przeprowadzone w latach 2000–2001 przez zespół Głównego Instytutu Górnictwa w 300 budynkach na terenie północnej i północno-wschodniej części Górnego Śląska (obszar o złożonej tektonice i wychodniach różnorodnych jednostek stratygraficznych) jednoznacznie potwierdziły silny wpływ budowy geologicznej na wartości rejestrowanych stężeń w budynkach. W budynkach zlokalizowanych na obszarach wychodni skał triasowych, o lepszych warunkach migracji gazów poprzez istnienie licznych spękań, pustek krasowych, rejestrowano wyższe średnie stężenia Rn-222 (51 $Bq \cdot m^{-3}$, pomiar metodą detektorów śladowych) niż w budynkach położonych na skałach karbońskich (29 $Bq \cdot m^{-3}$) i czwartorzędowych (21 $Bq \cdot m^{-3}$) - Wysocka i in. 2004.

Przed rozpoczęciem ciągłego monitoringu stężenia Rn-222 na stacjach w Łodzi i Ciosnach, w okresie od 06.09.2007 do 28.10.2007, prowadzono pilotażowe pomiary stężenia Rn-222 w domu jednorodzinnym położonym w północnej części Łodzi, na osiedlu Radogoszcz. W badanym okresie, w dniach 14–19.09.2007 r., wykonano także pomiar stężenia Rn-222 w powietrzu przed budynkiem. Zastosowano metodę aktywną pomiarów z 10–

minutowym krokiem czasowym przy użyciu miernika AlphaGUARD® PQ2000PRO. Celem eksperymentu było rozpoznanie średniego poziomu oraz czasowej zmienności stężenia tego radionuklidu w powietrzu wewnątrz budynku i w warunkach zewnętrznych podczas dwóch typów pogody - antycyklonalnej ze słabym wiatrem i cyklonalnej z silnym wiatrem.

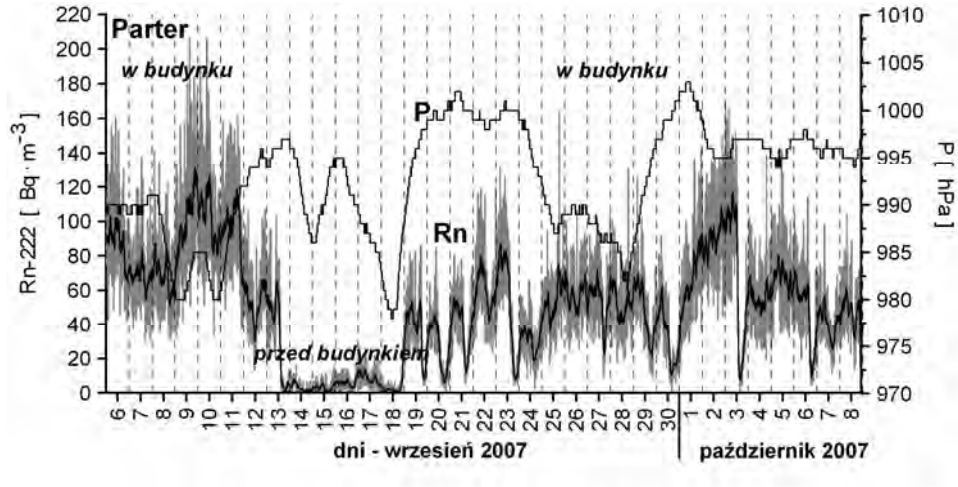
Budynek mieszkalny wybrany dla celów eksperymentu w Łodzi to jednorodzinny, wolnostojący w zabudowie szeregowej, dwukondygnacyjny dom bez piwnicy. Badany dom zbudowano w połowie lat 90. z następujących materiałów: cegły, styropianu przykrytego na ścianach tynkiem mineralnym, betonowej wylewki na podłodze. Pierwsza warstwa betonowej wylewki jest usytuowana bezpośrednio na gruncie zbudowanym do głębokości 2 m z osadów piaszczystych, poniżej zalega glina. Wylewkę uszczelniono smołą, warstwą papy i styropianu, który został przykryty kolejną warstwą betonu. W miejscach łączenia ścian z podłogą nie zastosowano uszczelnienia, co stwarza warunki łatwiejszej migracji radonu z podłoża do wnętrza budynku. Dom był wyposażony w drewniane, niezbyt szczelne okna. Miernik radonu AlphaGUARD® PQ2000PRO ustawiono na wysokości 0,5 m nad podłogą w pokojach o powierzchni 15 m^2 na parterze i na piętrze. Pokoje nie były użytkowane i wietrzone przez okres pomiarów. Przed budynkiem miernik radonu był umieszczony na wysokości 0,5 m nad powierzchnią trawiastą, na terenie wewnętrznego patio otoczonego ze wszystkich stron ścianami budynków. Takie usytuowanie miernika izolowało przyrząd od silnych podmuchów wiatru.

Zakres wahań stężenia Rn-222 na parterze badanego domu wynosił od 2 $Bq \cdot m^{-3}$ do 207 $Bq \cdot m^{-3}$ (10.09.2007, godz. 14.30), a na I piętrze od 2 $Bq \cdot m^{-3}$ do 108 $Bq \cdot m^{-3}$ (16.10.2007, godz. 14.00), rys. 6.27 i 6.28. Średni poziom aktywności promieniotwórczej tego gazu na pierwszej kondygnacji wynosił 60 $Bq \cdot m^{-3}$, a na drugiej kondygnacji był o połowę niższy, tj. 30 $Bq \cdot m^{-3}$. Według *Radiologicznego Atlasu Polski* (2006) średnia wartość stężenia tego radionuklidu w budynkach w Polsce wynosi 49 $Bq \cdot m^{-3}$, a w województwie łódzkim 43 $Bq \cdot m^{-3}$. Na parterze budynku największy udział w zarejestrowanych stężeniach Rn-222 miały wartości z przedziału 40–60 $Bq \cdot m^{-3}$ (ok. 30%), podczas gdy na I piętrze największą częstością cechowały się stężenia Rn-222 z przedziału 20–40 $Bq \cdot m^{-3}$ (55%), rys. 6.26. Średnie stężenie Rn-222 w powietrzu przed budynkiem wynosiło 6 $Bq \cdot m^{-3}$, a maksymalne 27 $Bq \cdot m^{-3}$ (17.09.2007, godz. 23.30), rys. 6.32.



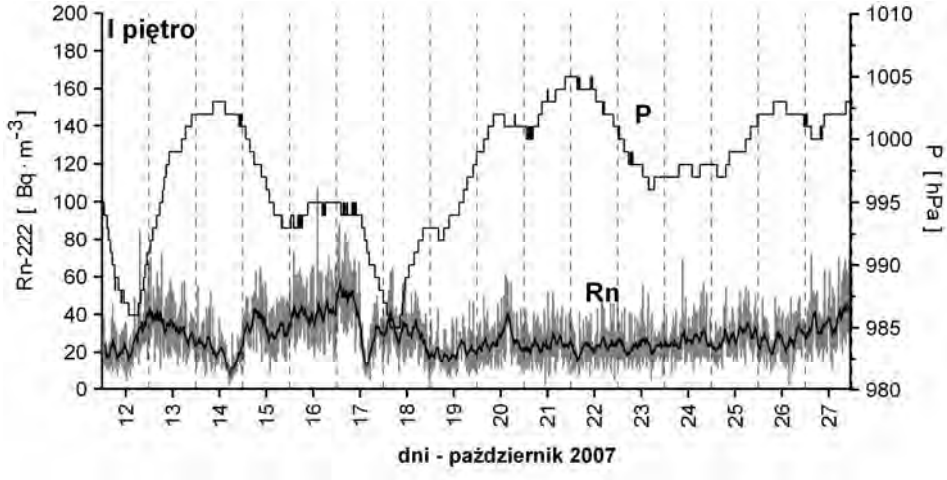
Rys. 6.26. Rozkład częstości stężenia Rn-222 na parterze i na I piętrze w domu jednorodzinnym w Łodzi w okresie 06.09.–28.10.2007 r.

Fig. 6.26. Frequency distribution of Rn-222 concentration on the ground floor and the first floor of a single family house in Łódź in the period 6th September–28th October 2007



Rys. 6.27. Stężenie Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinnym w Łodzi (parter) i przed budynkiem na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (*p*)

Fig. 6.27. Rn-222 concentration in the air in a single family house in Łódź (ground floor) and in the front of the house, in the background of atmospheric pressure variability (*p*)



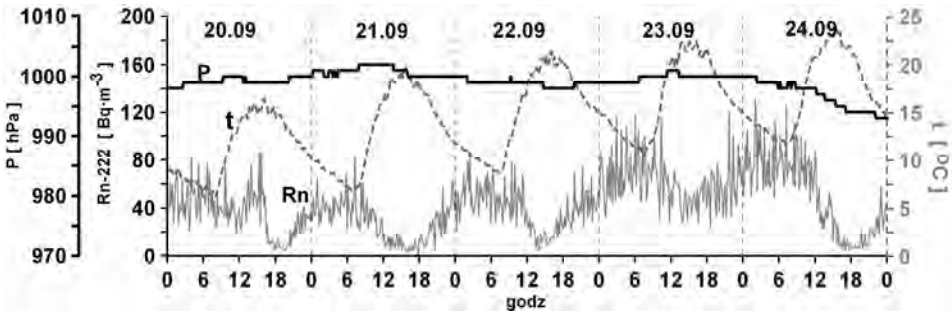
Rys. 6.28. Stężenie Rn-222 w powietrzu na I piętrze domu jednorodzinnego w Łodzi na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (*p*)

Fig. 6.28. Rn-222 concentration in the air on the first floor in a single family house in Łódź in the background of atmospheric pressure variability (*p*)

Analiza wartości stężenia Rn-222 na tle makroskalowych warunków meteorologicznych oraz na tle zmian ciśnienia atmosferycznego potwierdziła związek charakteru dobowego przebiegu i poziomu rejestrowanej aktywności promieniotwórczej tego radionuklidu z typem pogody.

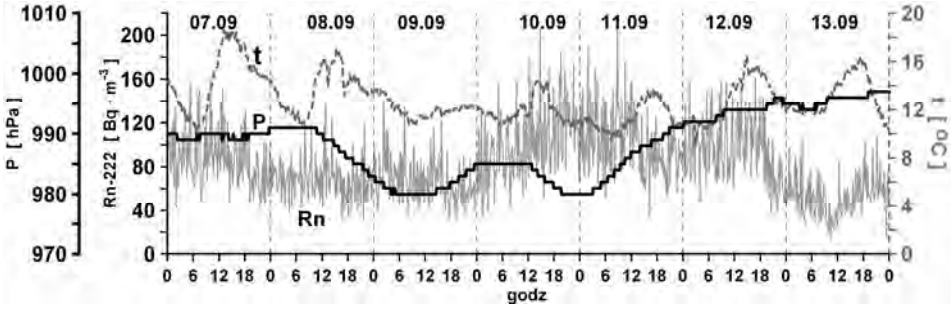
Rysunek 6.27 przedstawia wyniki pomiarów stężenia Rn-222 wykonanych na parterze budynku oraz przed domem na tle zmian ciśnienia powietrza. Czasowy przebieg aktywności promieniotwórczej tego gazu wskazuje na istnienie okresów z wyraźnym rytmem dobowym zmian stężenia Rn-222 z maksimum w godzinach nocnych i minimum w godzinach popołudniowych (np. w dniach 18–24.09.2007 r.) oraz okresów z brakiem zmienności dobowej. Wyraźny rytm zmian dobowych był obserwowany najczęściej przy tendencji wzrostowej ciśnienia atmosferycznego, w czasie pogody antycyklonalnej, bezchmurnej z małym wiatrem ogólnej cyrkulacji (rys. 6.27, 6.28 i 6.31.a). W tym czasie przebieg dobowy stężenia Rn-222 był odwrotny do przebiegu temperatury powietrza (rys. 6.29), a średnie stężenia nie przekraczały 40 $Bq \cdot m^{-3}$. Brak wyraźnego rytmu dobowego i wzrost stężenia Rn-222 był obserwowany w dniach z typem pogody kształtowanej przez ośrodek niskiego ciśnienia z aktywnym frontem atmosferycznym i silnym wiatrem - np. w dniach 08–12.09.2010 r., kiedy to zarejestrowano maksimum stężenia Rn-222 w budynku, 207 $Bq \cdot m^{-3}$, a średnia wartość stężenia tego gazu w wymienionych okresie wynosiła

82 Bq·m^{-3} (rys. 6.27, 6.30 i 6.31.b). Najwyższe stężenie Rn-222 było zarejestrowane podczas najniższego ciśnienia atmosferycznego, 983 hPa.



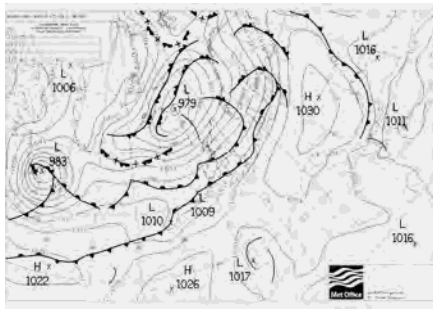
Rys. 6.29. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na parterze domu jednorodzinnego w Łodzi na tle zmienności temperatury powietrza (*t*) w warunkach zewnętrznych i ciśnienia atmosferycznego (*p*) w czasie pogody antycyklonalnej w okresie 20–24.09.2007 r.

Fig. 6.29. Daily course of Rn-222 concentration on the ground floor in a single family house in Łódź in the background of the air temperature variability (*t*) in the external environment and atmospheric pressure (*p*) during anticyclonic weather in the period 20th–24th September 2007

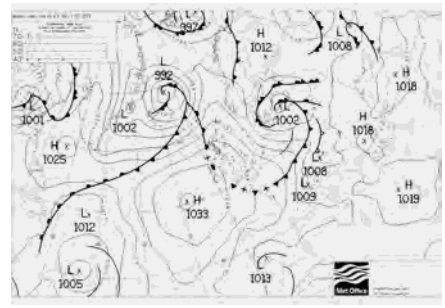


Rys. 6.30. Stężenie Rn-222 na parterze domu jednorodzinnego w Łodzi na tle zmienności temperatury powietrza (*t*) w warunkach zewnętrznych i ciśnienia atmosferycznego (*p*) w czasie pogody kształtowanej przez ośrodek niskiego ciśnienia z aktywnym frontem chłodnym w okresie 07–13.09.2007 r.

Fig. 6.30. Rn-222 concentration on the ground floor in a single family house in Łódź in the background of variability of the air temperature (*t*) in the external environment and atmospheric pressure (*p*) during the weather affected by low-pressure system with an active cold front in the period 7th–13rd September 2007



a. 00 UTC, 21.09.2007

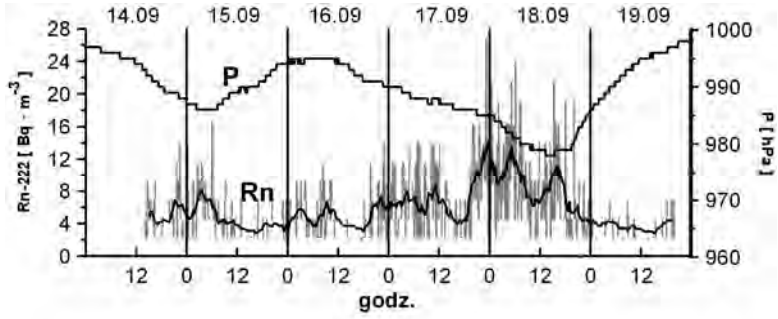


b. 00 UTC, 11.09.2007

Rys. 6.31. Mapa synoptyczna Met Office dla dnia z wyraźnym dobowym przebiegiem zmienności stężenia Rn-222 wewnątrz budynku - pogoda w Polsce kształtowana przez ośrodek wysokiego ciśnienia z centrum na pograniczu Białorusi i Ukrainy (a) i dla dnia z maksymalnym stężeniem Rn-222 w budynku, 210 $Bq \cdot m^{-3}$, i brakiem dobowego cyklu zmian stężenia Rn-222 - pogoda w Polsce kształtowana przez ośrodek niskiego ciśnienia z szybko przemieszczającym się frontem atmosferycznym (b) (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*)

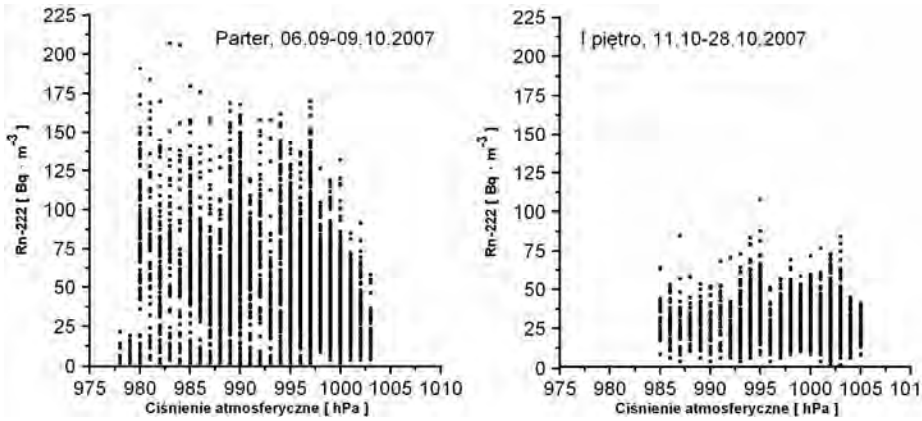
Fig. 6.31. Met Office synoptic chart for the day with a clear diurnal course of Rn-222 concentration variation inside the building - weather in Poland formed by the centre of a high-pressure system on the border between Belarus and Ukraine (a) and for the day, with maximum Rn-222 concentration in the house, 210 $Bq \cdot m^{-3}$, and the lack of diurnal rhytm of Rn-222 concentration - weather in Poland affected by a low pressure system with fast moving atmospheric fronts (b) (source: *http:// www.wetterzentrale.de / topkarten*)

Pomiary na I piętrze prowadzono w innym okresie niż na parterze budynku. Rytm dobowy stężenia Rn-222 na drugiej kondygnacji nie wystąpił tak wyraźnie jak na parterze, a przebieg zmian ciśnienia atmosferycznego w stosunku do tendencji zmian aktywności promieniotwórczej Rn-222 wskazuje podobne zależności, jakie obserwowano na pierwszej kondygnacji budynku. W dniach 13–17.10.2007 r. można zauważyć, że wzrostowi ciśnienia towarzyszył spadek stężenia Rn-222 w powietrzu. Wyraźny związek z ciśnieniem atmosferycznym ujawnia się tylko w kilku epizodach. Rysunek 6.33, przedstawiający stężenie Rn-222 w funkcji ciśnienia atmosferycznego, nie potwierdza istnienia statystycznej zależności korelacyjnej z tym elementem pogody. Relacje te wymagają badań na dłużnym ciągu obserwacyjnym. Wyniki pomiarów stężenia Rn-222 w warunkach zewnętrznych (5–dniowy ciąg obserwacyjny) na tle zmian ciśnienia atmosferycznego dobrze korespondują z wyżej opisanymi spostrzeżeniami dotyczącymi aktywności promieniotwórczej radonu we wnętrzu budynków - dobowa amplituda stężenia Rn-222 wzrastała wraz ze spadkiem ciśnienie powietrza (rys. 6.32). Najwyższe stężenia Rn-222 zarejestrowano w dniach z najniższym ciśnieniem atmosferycznym (rys. 6.32).



Rys. 6.32. Przebieg 10–minutowych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu na wysokości 0,5 m nad gruntem (podłoże pokryte trawą) przed domem jednorodzinnym w Łodzi na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (*p*) w okresie 14–19.09.2007 r.

Fig. 6.32. Course of 10–min. values of Rn-222 concentration in the air at a height of 0.5 m above the ground (soil covered with grass) in front of a single family house in Łódź in the background of atmospheric pressure variability (*p*) in the period 14th–19th September 2007



Rys. 6.33. Zależność 10–minutowych wartości stężenia Rn-222 w domu jednorodzinnym w Łodzi od ciśnienia atmosferycznego na dwóch kondygnacjach w okresie 06.09.–28.10.2007 r.

Fig. 6.33. The relationship 10–min. values of Rn-222 concentration in a single family home in Łódź and the atmospheric pressure on two floors in the period 6th September–28th October 2007

Wyniki tego krótkiego eksperymentu w budynku w Łodzi nawiązują do wyników opisywanych w literaturze (Allen i in. 1997, Marley 2001, Sun i in. 2002, Karpińska i in. 2004a, 2004b). Według studiów empirycznych nad wpływem zmian ciśnienia atmosferycznego na przepływ radonu z gleby do wnętrza

budynku opisanych przez Allena i in. (1997), wzrost intensywności przepływu tego gazu do budynku wystąpił podczas spadku ciśnienia atmosferycznego. Autorzy tego eksperymentu podkreślają, że stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym jest przeciętnie 1000 razy wyższe niż w powietrzu w budynkach i fluktuacje ciśnienia atmosferycznego sterują przepływem tego gazu z gleby do budynków (Allen i in. 1997). Wyniki badań prowadzonych przez Marleya (2001) nad wpływem warunków atmosferycznych na stężenie radonu i jego pochodnych wewnątrz budynku wykazały, iż wartość ciśnienia atmosferycznego i jego tendencja oraz ciśnienie pary wodnej i prędkość wiatru to główne czynniki meteorologiczne determinujące poziom aktywności promieniotwórczej Rn-222. Spadkowi ciśnienia atmosferycznego i prężności pary wodnej odpowiadał wzrost stężenia Rn-222 w budynku. Marley zwraca uwagę na rolę wiatru i turbulencji termicznej w atmosferze dla wzrostu stężenia Rn-222 w budynkach poprzez redukcję ciśnienia pary wodnej - komponentu ciśnienia atmosferycznego. Spadek prężności pary wodnej może przyspieszać przepływ Rn-222 z gleby do budynku. Badania przeprowadzone przez Marleya wykazały, analogicznie do opisanego wyżej eksperymentu, istnienie regularnych, dobowych zmian stężenia Rn-222 w budynku podczas wysokiego ciśnienia atmosferycznego, z brakiem tendencji zmian barycznych. Autor wskazuje na silną korelację aktywności promieniotwórczej Rn-222 z temperaturą powietrza w czasie pogody kształtowanej przez ośrodek wysokiego ciśnienia i jej brak w czasie pogody związanej z oddziaływaniem niżu barycznego (Marley 2001). Związek stężenia radonu w budynku ze zmianami ciśnienia atmosferycznego oraz temperatury powietrza w warunkach zewnętrznych potwierdzają także autorzy prowadzący przez okres 1 roku pomiary aktywności promieniotwórczej tego radionuklidu w północno-wschodniej Polsce (Karpińska i in. 2004). Stężenie Rn-222 w dwukondygnacyjnym, jednorodzinnym budynku było najwyższe w styczniu i listopadzie, a najniższe w lipcu i wykazało ujemną korelację z temperaturą powietrza i dodatnią korelację z miesięczną amplitudą ciśnienia atmosferycznego.

Wśród czynników meteorologicznych nadrzędną dla stężenia Rn-222 wewnątrz budynku rolę ciśnienia atmosferycznego, wilgotności względnej powietrza i wilgotności gleby podkreślają autorzy eksperymentu przeprowadzonego w Japonii, w mieście Chiba (Sun i in. 2002). Eksperyment polegał na pomiarach stężenia Rn-222 w jednopiętrowym, betonowym budynku o spękanej, słabo uszczelnionej podłodze na tle wybranych elementów meteorologicznych powietrza i gleby. Pomiary wykonano z 1–godz. krokiem czasowym w ciągu 48 godz. w dniach 15–16.09.1998 r. w czasie przechodzenia nad badanym obszarem tajfunu, kiedy to obserwowano dużą zmienność parametrów meteoro-

logicznych powietrza i gleby. Kompleksowa analiza uzyskanych wyników wykazała, że wśród badanych elementów pogody, tj. temperatury powietrza, prędkości wiatru, wilgotności względnej, wysokości opadów atmosferycznych, ciśnienia atmosferycznego, temperatury gleby na głębokości 10 cm i 30 cm, wilgotności gleby na głębokości 15 cm, 30 cm i 90 cm największą korelację stężenie Rn-222 w budynku wykazuje z ciśnieniem atmosferycznym, wilgotnością względną powietrza i wilgotnością gleby na głębokości 90 cm - 95% wariancji stężenia Rn-222 tłumaczy zmienność wymienionych 3 elementów meteorologicznych (Sun i in. 2002).

W przedstawionych przykładach prac badawczych nad meteorologicznymi uwarunkowaniami stężenia Rn-222 w budynkach można znaleźć analogię do wyników eksperymentu przeprowadzonego w domu jednorodzinnym w Łodzi we wrześniu i październiku 2007 r. Wyniki te dały ogólny pogląd na zmienność aktywności promieniotwórczej Rn-222 w budynku i stanowią przesłankę do dalszych badań w oparciu o dłuższą serię obserwacyjną.

Wnioski

Największe średnie stężenie radonu w centrum Łodzi, Ciosnach i Krakowie przypadało na następujące kierunki adwekcji mas powietrza rozpatrywane w 8 sektorach: odpowiednio S, E i SW. Najmniejsze przeciętne stężenie tego radionuklidu rejestrowano na stacjach w centralnej Polsce podczas napływu powietrza z kierunku NW, a w Krakowie z kierunku N.

Większa dynamika pogody podczas cyklonalnej cyrkulacji atmosfery, mogła być przyczyną mniejszych stężeń radonu notowanych przy gruncie w porównaniu z wartościami stężeń tego radionuklidu w antycyklonalnych typach pogody.

Największa częstość dodatnich odchyleń stężenia Rn-222, > 0,5 zmiennej standaryzowanej, w Ciosnach wystąpiła podczas adwekcji powietrza z kierunków SE i E, a w Krakowie z kierunków SW i S. Na obu stacjach ujemne odchylenia stężenia Rn-222, < 0,5 zmiennej standaryzowanej, najczęściej rejestrowano podczas napływu powietrza z kierunków N i NW. Wymienione kierunki adwekcji wyróżniały się wartością stężeń Rn-222, zarówno podczas cyrkulacji cyklonalnej, jak i antycyklonalnej. Częstość ujemnych odchyleń stężenia Rn-222 zwiększała się w okresie od października do marca, a dodatnich w okresie od kwietnia do września.

Kierunki adwekcji mas powietrza z całego sektora południowego, tj. SE, S i SW, charakteryzowały się największymi przeciętnymi minimami dobowymi stężenia Rn-222 rejestrowanymi w Ciosnach i Krakowie.

Największe stężenia Rn-222, powyżej 25% średniej maksymalnej dobowej rejestrowano w Krakowie podczas adwekcji z kierunków SW i W, podczas gdy w środkowej Polsce w czasie napływu mas powietrza z kierunku E.

Na wszystkich stacjach największy zakres zmian stężenia Rn-222 w ciągu doby obserwowano podczas antycyklonalnych typów pogody. Największa przeciętna dobowa amplituda stężenia Rn-222 wystąpiła w czasie adwekcji z kierunków SE i W (Łódź), E (Ciosny) oraz SW (Kraków). Na wszystkich stacjach mała zmienność dobowa stężenia Rn-222 cechowała dni z adwekcją powietrza z kierunków NW i N podczas cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej.

Analiza trajektorii mas powietrza w czasie 72 godz. przed rejestracją stężenia Rn-222 na badanych stacjach w wybranych dniach z wysokimi wartościami stężenia radonu wykazała dominację adwekcji z sektorów kontynentalnych. Obszary lądowe, nad którymi odbywała się transformacja mas powietrza cechują się podwyższonym potencjałem radonowym w stosunku do centralnej Polski oraz Krakowa (obecność w podłożu kwaśnych skał krystalicznych, z większą zawartością radu). Uzyskane wyniki mogą być potwierdzeniem prezentowanej w literaturze tezy o wpływie składowej transportu atmosferycznego radionuklidów z odległych obszarów na wzrost rejestrowanych stężeń Rn-222 w powietrzu w danym miejscu. Powietrze napływające z sektorów kontynentalnych „nasyca się” radonem od podłoża w procesie transformacji nad obszarem lądowym, a tym samym zwiększa się stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu w masie powietrza (np. Kopcewicz 1968, Carvalho 1995, Dueñas i in. 1996, Morizumi i in. 1996, Omori i in. 2009, Arnold i in. 2009).

Jednoznaczna ocena wpływu transportu atmosferycznego z odległych obszarów na stężenie Rn-222 na badanych stacjach jest zadaniem trudnym. Na tę ocenę nakłada się bowiem drugi aspekt oddziaływania cyrkulacji atmosferycznej - wpływ na lokalny przebieg elementów meteorologicznych (m.in. na gradient temperatury powietrza, prędkość wiatru) determinujących stężenie Rn-222 w dolnych warstwach atmosfery. Znaczenie tego oddziaływania cyrkulacji atmosferycznej potwierdzają różnice stężeń Rn-222 między stacją miejską i zamiejską w środkowej Polsce, najsilniej ujawniające się podczas warunków pogodowych kształtowanych przez ośrodek wysokiego ciśnienia (szczegółowy opis wpływu lokalnych warunków meteorologicznych przedstawiono w rozdziale 5). W takich warunkach meteorologicznych wydaje się, że mikroklimat otoczenia stacji odgrywa pierwszoplanową rolę dla wartości rejestrowanych stężeń badanego radionuklidu. Oczywiście transportu radonu z odległych obszarów do miejsc pomiaru nie można całkowicie wykluczyć.

Jednoznaczną ocenę wpływu adwekcji mas powietrza na stężenie Rn-222 w dolnej troposferze utrudnia także jednoczesne oddziaływanie procesów za-

chodzących w gruncie, kształtujących tempo ekshalacji radonu do atmosfery. Są to m.in. emanacja Rn-222 z ziaren minerałów i transport Rn-222 w glebie. Zatem przedstawiona w niniejszym rozdziale analiza związków stężenia Rn-222 z cyrkulacją atmosferyczną stanowi tło oraz przesłankę do dalszych badań nad wyodrębnieniem składnika adwekcyjnego w wartości stężenia tego radionuklidu w danym miejscu. Wymaga to jednak rozszerzenia obserwacji np. o pomiary ekshalacji Rn-222, a także pomiary stężenia radonu na kilku poziomach w profilu pionowym dolnej troposfery.

Drugi wątek badań prezentowany w rozdziale 6 wykazał związek typu pogody z charakterem zmienności dobowej oraz poziomem stężenia Rn-222 w dwukondygnacyjnym domu jednorodzinnym bez piwniczenia. Podczas pogody słabogradientowej, kształtowanej przez ośrodek wysokiego ciśnienia, obserwowano wyraźny rytm dobowy zmian stężenia Rn-222 przy średnim stężeniu Rn-222 40 $Bq \cdot m^{-3}$. W czasie pogody kształtowanej przez ośrodek niskiego ciśnienia z frontem atmosferycznym i silnym wiatrem średnie stężenia Rn-222 w budynku były dwukrotnie wyższe, a stężenia Rn-222 nie wykazywały rytmu dobowego.

Pomiary stężenia Rn-222 na I kondygnacji wykazały różnice wyników w stosunku do parteru budynku - zakres wahań dobowych na piętrze był mniejszy niż na parterze.

Zarówno na parterze, jak i na piętrze budynku, obserwowano tendencję spadkową stężenia Rn-222 wraz ze wzrostem ciśnienia atmosferycznego. To spostrzeżenie jest także adekwatne do charakteru zmian stężenia Rn-222 rejestrowanego w ciągu 5 dni w powietrzu przed budynkiem - najwyższe stężenie Rn-222 w warunkach zewnętrznych wystąpiło w dniach z najniższym ciśnieniem atmosferycznym.

Eksperyment dotyczący pomiarów stężenia Rn-222 na tle warunków pogodowych, przeprowadzony w domu jednorodzinnym w Łodzi, potwierdził pewne prawidłowości opisywane w literaturze, które wymagają weryfikacji w oparciu o dłuższą serię danych.

PODSUMOWANIE

1. W pracy przedstawiono dynamikę dobowej i rocznej zmienności wartości stężenia radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza w centrum Łodzi, na przedmieściach Krakowa (Kraków-Bronowice) oraz na terenie rolniczym w Ciosnach (25 km na północ od Łodzi) w latach 2008–2010. Synchronicznie do stężenia Rn-222 w środkowej Polsce monitorowano warunki mikroklimatyczne opisywane temperaturą powietrza na wysokości 2 m, różnicą temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem, prędkością wiatru, ciśnieniem atmosferycznym, strumieniem ciepła glebowego oraz wilgotnością gruntu. Długie serie danych o stężeniu Rn-222 w powietrzu synchroniczne do pomiarów elementów pogody nie są powszechne w Polsce. Prezentowane równoległe serie pomiarowe z trzech stacji w Polsce umożliwiły poznanie zmienności czasowej stężenia tego radionuklidu w przygruntowej warstwie powietrza.

2. Przeciętne stężenie Rn-222 na badanych stacjach mierzone w latach 2008–2010 jest reprezentatywne dla obszarów kontynentalnych, tj. 4,8 $Bq \cdot m^{-3}$ (Łódź), 5,8 $Bq \cdot m^{-3}$ (Ciosny), 10 $Bq \cdot m^{-3}$ (Kraków). Stwierdzono, że na wszystkich trzech stacjach najmniejsze średnie miesięczne stężenie Rn-222 występuje w marcu, co wyraźnie koreluje ze wzrostem prędkości wiatru ogólnej cyrkulacji atmosfery w związku z aktywnością cyklonalną o tej porze roku. W Krakowie największe średnie stężenie tego radionuklidu przypada na miesiące jesienne, w Łodzi - na jesienne lub zimowe. W Ciosnach obserwowane są dwa roczne maksima stężenia Rn-222 - pierwszorzędne występuje latem, a drugorzędne przypada jesienią lub zimą.

3. Najmniejszym zakresem wahań dobowych stężenia Rn-222 w powietrzu, z maksimum w godzinach porannych i minimum w godzinach popołudniowych, wyróżnia się stacja w centrum Łodzi. Średni roczny stosunek wartości dobowego maksimum stężenia Rn-222 do minimum, rejestrowanych na wysokości 2 m nad gruntem, na stacji w Łodzi wynosi 1,3, podczas gdy w Ciosnach i Krakowie relacja dobowego maksimum do minimum wynosi 1,8.

4. W środkowej Polsce od stycznia do marca brak jest rytmu dobowego stężenia Rn-222, podczas gdy w Krakowie rytm ten jest mało wyraźny. Średnia amplituda dobowa stężenia Rn-222 na wszystkich stacjach zaczyna zwiększać się od kwietnia z maksimum w czerwcu w Ciosnach (11 $Bq \cdot m^{-3}$), w sierpniu w Krakowie (12 $Bq \cdot m^{-3}$) i we wrześniu w Łodzi (3 $Bq \cdot m^{-3}$).

5. Stężenie Rn-222 na wysokości 2 m nad gruntem charakteryzuje się odwrotnym przebiegiem dobowym w stosunku do temperatury powietrza. Wartości ekstremalne stężenia tego radionuklidu przy gruncie występują z opóźnieniem w stosunku do minimum i maksimum temperatury powietrza. Na stacji zamiejskiej w Ciosnach stwierdzono silniejszy niż w Łodzi związek stężenia Rn-222 i temperatury powietrza, z maksimum korelacji w kwietniu i wrześniu. W Ciosnach największe przeciętne stężenie Rn-222 było obserwowane w przedziale temperatury powietrza od 10°C do 15°C, a w mieście w przedziale od –5°C do 0°C.

6. Warunki termiczne powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m na stacji w centrum Łodzi różnią się istotnie od warunków panujących za miastem, co może w znaczący sposób determinować poziom rejestrowanego stężenia Rn-222. W Łodzi w 96% przypadków różnice temperatury powietrza warstwie 1,8 m zawierają się w granicach od –1,0°C do 1,0°C, z przewagą różnic ujemnych. To świadczy o dominacji w ciągu całego roku chwiejnej i słabo chwiejnej równowagi termicznej powietrza, co sprzyja intensywnej turbulencji. W Ciosnach w ciągu całego roku występuje wyraźny dobowy cykl zmienności uwarstwienia termicznego przy gruncie. W ciągu dnia obserwowane są ujemne różnice temperatury w warstwie 1,8 m (stratyfikacja chwiejna), a w nocy występuje inwersja temperatury (stratyfikacja stała). Silne inwersje przygruntowe temperatury powietrza w Ciosnach (z maksimum ok. 6°C) obserwuje się w okresie od kwietnia do września z maksimum latem. Takie warunki termiczne w nocy sprzyjają zwiększaniu stężenia Rn-222. Inwersja temperatury powietrza stanowi „pułapkę” dla Rn-222, tj. proces dyfuzji turbulencyjnej (dyspersja substancji zawartych w powietrzu) wyraźnie słabnie przyczyniając się do gromadzenia tego radionuklidu przy gruncie. Maksimum stężenia Rn-222 rejestrowane na stacji zamiejskiej w latach 2008–2010 było dwukrotnie wyższe od maksimum notowanego w tym okresie w centrum Łodzi.

7. Ciśnienie atmosferyczne to element meteorologiczny, dla którego nie wykazano statystycznych związków ze stężeniem Rn-222 monitorowanym w Łodzi i Ciosnach. Zaobserwowano spadek stężenia Rn-222 przy niskim (1000 hPa) i wysokim (> 1040 hPa) ciśnieniu atmosferycznym. Badając poziom stężenia Rn-222 na tle zmienności prędkości wiatru w poszczególnych przedziałach ciśnienia atmosferycznego stwierdzono nadrzędną rolę ruchu powietrza dla rejestrowanych wartości stężenia radionuklidu. Oddziaływania ciśnienia atmosferycznego na stężenie Rn-222 nie można całkowicie wykluczyć. Ten element meteorologiczny jest ważnym wskaźnikiem zmian kompleksu pogodowego, z którego można wnioskować o wystąpieniu warunków sprzyjających (np. brak silnej turbulencji), bądź niesprzyjających (np. aktywna wymiana mas powietrza) do gromadzenia się radonu w dolnych warstwach troposfery.

8. Stężenie Rn-222 i prędkość wiatru cechuje odwrotna zależność, silniejsza na stacji zamiejskiej. Za miastem częściej występują okresy bezwietrzne, które charakteryzują się dwukrotnie większymi stężeniami Rn-222 niż centrum Łodzi.

9. Związek stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza ze strumieniem ciepła glebowego (*QG*) dotychczas nie był udokumentowany w literaturze krajowej i zagranicznej. Stwierdzono, że stężenie Rn-222 i *QG* wyróżniają się na tle pozostałych par zmiennych najsilniejszą zależnością korelacyjną, największą w okresie od kwietnia do października. Największe przeciętne stężenie Rn-222 były rejestrowane dla przedziału wartości $QG > 5$ Wm^{-2}, a najmniejsze średnie stężenia Rn-222 notowano podczas strumienia *QG* o wartościach < -10 Wm^{-2}. Przebieg dobowy *QG* jest quasi-synchroniczny w stosunku do przebiegu stężenia Rn-222 - występuje opóźnienie ekstremalnych wartości stężenia Rn-222 w stosunku do ekstremalnych wartości *QG*.

10. Stacje w Łodzi i Ciosnach różniły się poziomem wilgotności gruntu - w mieście gliniaste podłoże było średnio dwa razy bardziej wilgotne niż piaszczysta gleba na stacji w Ciosnach. W Łodzi nie obserwowano statystycznego związku stężenia Rn-222 ze zmianami wilgotności gruntu, natomiast w Ciosnach występuje ujemna zależność statystyczna między zmiennymi. W tej sytuacji trudno o jednoznaczny wniosek na temat relacji analizowanych zmiennych. Zapewne rozszerzenie zakresu monitoringu radonu na stacjach o pomiary szybkości ekshalacji

Rn-222 do atmosfery przy różnym stanie uwilgotnienia podłoża przyniosłoby znaczne poszerzenie wiedzy na temat roli tego elementu meteorologicznego dla stężenia radionuklidu w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem.

11. Jednoczesne oddziaływanie wielu elementów meteorologicznych, ich okresowa i nieokresowa (związana z wymianą mas powietrza) zmienność, ich wpływ na tempo ekshalacji oraz na dyfuzję turbulencyjną sprawia duże trudności interpretacyjne w ocenie wpływu poszczególnych składników pogody na stężenie Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza. Zatem autorka mając świadomość złożoności podjętej problematyki zachowuje dużą ostrożność w formułowaniu wniosków dotyczących nadrzędnego czynnika meteorologicznego determinującego poziom stężenia Rn-222 w powietrzu przy gruncie, a przedstawione w pracy spostrzeżenia traktuje jako bazę do rozszerzenia badań nad radonem w kontekście warunków meteorologicznych.

12. Rozpoznanie zmienności czasowej stężenia Rn-222 i wybranych elementów meteorologicznych posłużyło do stworzenia modelu statystycznego w celu estymacji stężenia tego radionuklidu w powietrzu na wysokości 2 m nad gruntem. Relacje stężenia Rn-222 i poszczególnych elementów meteorologicznych nie mają charakteru prostej zależności liniowej. Model powstał w oparciu o zależności funkcyjne stężenia Rn-222 i strumienia ciepła glebowego oraz temperatury powietrza. Wybrane elementy meteorologiczne cechowały się wyraźnym rytmem dobowym oraz najsilniejszym statystycznym związkiem ze stężeniem Rn-222. Do opisu związku zmiennych dla poszczególnych miesięcy wybrano funkcję eksponencjalną oraz funkcję eksponencjalną z pochodną po czasie zmiennej niezależnej w celu uwzględnienia efektu histerezy. Model z pochodną wykazał większą dokładność. Najsłabsze dopasowanie danych modelowych do empirycznych wystąpiło w miesiącach zimowych. W pozostałych porach roku oba modele, skonstruowane w oparciu o temperaturę powietrza i *QG*, cechowały się bardzo dużą dokładnością. Ograniczenie zastosowania *QG* do estymacji stężenia Rn-222 zaobserwowano jedynie zimą w przypadku wystąpienia pokrywy śnieżnej, która redukuje zmienność dobową *QG*.

13. Spostrzeżenia dotyczące relacji między zmiennymi meteorologicznymi a stężeniem Rn-222 sformułowane na podstawie dotychczas opisanych wyników badań potwierdziła analiza wieloparametryczna z zastosowaniem regresji krokowej wstecznej. Strumień ciepła glebowego, temperatura powietrza na wysokości 2 m nad gruntem i wilgotność gruntu to zmienne, których jednoczesne wprowadzenie do modelu predykcji stężenia Rn-222 dało bardzo dobre rezultaty. Zastosowanie w modelu stężenia Rn-222 tylko prędkości wiatru i różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m i 0,2 m cechowało się natomiast słabym stopniem dopasowania wartości estymowanych stężenia Rn-222 do pomiarowych.

14. Wątek badań dotyczący różnic stężenia Rn-222 między centrum Łodzi a stacją w Ciosnach potwierdził hipotezę o cechach mikroklimatu otoczenia stanowisk pomiarowych jako przyczynie zróżnicowania poziomu rejestrowanego stężenia Rn-222.

15. Największe ujemne różnice stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją zamiejską, < -20 $Bq \cdot m^{-3}$, były obserwowane w okresie od kwietnia do września. We wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy maksimum ujemnych różnic w przebiegu dobowym przypada w godzinach nocnych. W ciągu dnia, przez cały rok, różnice stężenia Rn-222 na stacjach nie występują.

16. Największe ujemne różnice stężenia Rn-222 między stacjami, < -10 $Bq \cdot m^{-3}$, występowały podczas cyrkulacji antycyklonalnej z kierunku E i S (prawdopodobny wpływ na wartość stężenia Rn-222 transportu atmosferycznego radionuklidu z obszarów kontynentalnych, o większym potencjale radonowym niż środkowa Polska). Podczas pogody antycyklonalnej, oprócz domniemanego wpływu kierunku adwekcji powietrza na różnice poziomu rejestrowanego na stacjach stężenia Rn-222, niewątpliwie ważną rolę miały silne nocne przygruntowe inwersje temperatury powietrza w Ciosnach, sprzyjające wzrostowi stężenia Rn-222. W tym czasie zjawisko inwersji temperatury powietrza w Łodzi nie występowało, czego powodem była intensywna turbulencja wynikająca z nadwyżki ciepła w mieście. Największe ujemne różnice stężenia Rn-222 występowały podczas zjawiska miejskiej wyspy ciepła o natężeniu $> 5{,}0°C$ w Łodzi.

17. Podczas dni z cyrkulacją cyklonalną, z aktywnymi frontami atmosferycznymi, silnym wiatrem ogólnej cyrkulacji i opadami deszczu nie obserwowano różnic stężenia Rn-222 między stacją w Łodzi a stacją w Ciosnach. W tych dniach na obu stacjach charakter przebiegu dobowego rejestrowanych wartości był podobny.

18. Poziom stężenia Rn-222 w powietrzu rejestrowany 2 m nad gruntem niewątpliwie podlega silnym wpływom lokalnych czynników determinujących jego wartość, związanych ze środowiskiem emisji tego gazu do atmosfery (m.in. zawartości radu w podłożu, tektoniki, właściwości gleby - temperatury, wilgotności, porowatości) oraz z warunkami mikroklimatycznymi panującymi w przygruntowej warstwie powietrza. Druga składowa stężenia Rn-222 związana z transportem tego radionuklidu wraz z masami powietrza z odległych obszarów do miejsca pomiaru jest trudna do określenia bez znajomości rozkładu stężenia Rn-222 w profilu pionowym, szczególnie z poziomu nie podlegającego bezpośrednim wpływom podłoża. W niniejszym opracowaniu, pomimo braku takich danych, podjęto próbę poszukiwania wpływu kierunku adwekcji mas powietrza oraz charakteru cyrkulacji na wartość stężenia tego radionuklidu w przygruntowej warstwie powietrza. Kierunek adwekcji (dla 8 sektorów) i typ cyrkulacji określono na podstawie wskaźników cyrkulacji atmosferycznej, tj. kierunku i wirowości wiatru geostroficznego (za Piotrowskim 2009). Zbadano także trajektorie mas powietrza przedstawiające położenie masy powietrza w ciągu 72 godz. przed dotarciem do stacji pomiaru Rn-222.

19. Stwierdzono, że największe przeciętne stężenie Rn-222 w Łodzi było rejestrowane podczas napływu powietrza z kierunku S, w Ciosnach z kierunku E, a w Krakowie z kierunku SW. Najmniejsze średnie stężenie Rn-222 w środkowej Polsce przypadało na adwekcje powietrza z sektora NW, a w Krakowie z sektora N.

20. Największe stężenia Rn-222, powyżej 25% średniej maksymalnej wartości dobowej rejestrowano w Krakowie podczas adwekcji z kierunków SW i W, podczas gdy w środkowej Polsce w czasie napływu mas powietrza z kierunku E.

21. Cyrkulacja antycyklonalna sprzyjała koncentracji Rn-222 przy gruncie - największy zakres wahań dobowych stężenia tego radionuklidu występował na wszystkich stacjach podczas typów pogody kształtowa-

nych przez ośrodek wysokiego ciśnienia. Największa przeciętna dobowa amplituda stężenia Rn-222 wystąpiła w czasie cyrkulacji antycyklonalnej z kierunków SE i W (Łódź), E (Ciosny) oraz SW (Kraków). W środkowej Polsce i w Krakowie najmniejszy zakres wahań dobowych stężenia Rn-222 obserwowano podczas cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej z adwekcją powietrza z kierunków NW i N.

22. Analiza odchylenia stężenia Rn-222 od wartości przeciętnej wykazała, zarówno podczas sytuacji cyklonalnych jak i antycyklonalnych, największą częstość dodatnich odchyleń stężenia Rn-222 w Ciosnach podczas adwekcji powietrza z kierunków SE i E, a w Krakowie z kierunków SW i S. Ujemne odchylenia stężenia Rn-222 na obu stacjach najczęściej rejestrowano podczas napływu powietrza z kierunków N i NW. Okres od kwietnia do września cechował się przewagą dodatnich odchyleń stężenia Rn-222, a w okresie od października do marca dominowały ujemne odchylenia stężenia Rn-222.

23. Inspiracją do podjęcia wątku badań trajektorii mas powietrza napływających nad badane stacje w odniesieniu do poziomu rejestrowanego stężenia Rn-222 była prezentowana w literaturze teza dotycząca roli transportu atmosferycznego dla wartości stężenia Rn-222 rejestrowanego w danym miejscu (np. Kopcewicz 1968, Carvalho 1995, Dueñas i in. 1996, Morizumi i in. 1996, Omori i in. 2009, Arnold i in. 2009). Ekshalacja radonu z obszarów kontynentalnych jest 1000 razy większa niż z akwenów, zatem masy kontynentalne powietrza są bogatsze w ten radionuklid w porównaniu z masami morskimi. Proces transformacji masy powietrza nad lądem, szczególnie nad terenami o podwyższonym potencjale radonowym (m.in. obecność w podłożu kwaśnych skał krystalicznych, z większą zawartością radu), przynosi wzrost stężenia Rn-222 w powietrzu. Długotrwałe przebywanie masy powietrza nad obszarami morskimi może przyczyniać się do zmniejszania koncentracji tego gazu w dolnych warstwach powietrza. Analiza szlaków przemieszczania mas powietrza w czasie 72 godz. przed rejestracją stężenia Rn-222 w Ciosnach i Krakowie w wybranych dniach z wysokimi wartościami radioaktywności radonu wykazała opisywane w literaturze prawidłowości - adwekcję powietrza z sektorów kontynentalnych, szczególnie znad obszarów o podwyższonym potencjałem radonowym w stosunku do centralnej Polski oraz Krakowa.

24. Jednoznaczna ocena wpływu transportu atmosferycznego z odległych obszarów na stężenie Rn-222 na badanych stacjach, jak już akcentowano w tej pracy, jest zadaniem trudnym. Na tę ocenę nakłada się drugi aspekt oddziaływania cyrkulacji atmosferycznej - wpływ na lokalny przebieg elementów meteorologicznych (m.in. ruchy turbulencyjne powietrza, warunki termiczne) determinujących stężenie Rn-222 w dolnych warstwach atmosfery. Dane o stężeniu Rn-222 z wysokości 2 m nad gruntem nie pozwalają na oddzielenie współwystępujących czynników meteorologicznych, tj. lokalnego oraz makroskalowego, i jednoznaczne określenie nadrzędnej roli jednego z nich dla zwiększania się stężenia Rn-222 na stacjach. Opisane spostrzeżenia są przesłanką do dalszych badań rozszerzonych m.in. o pomiary stężenia Rn-222 w profilu pionowym troposfery oraz pomiary tempa ekshalacji podczas różnych typów cyrkulacji atmosferycznej.

25. Przeprowadzona próba określenia roli czynnika makroskalowego - transportu atmosferycznego - dla wartości stężenia Rn-222 była tłem dla szczegółowej analizy stężenia Rn-222 w odniesieniu do lokalnych warunków meteorologicznych w Łodzi i Ciosnach. Celem badań było nie tylko poznanie relacji stężenia Rn-222 z wybranymi elementami meteorologicznymi, ale także poszukiwanie różnic w zmienności czasowej stężenia Rn-222 na obszarze miasta w stosunku do obszaru niezurbanizowanego.

26. Eksperyment dotyczący pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu przeprowadzony w domu jednorodzinnym w Łodzi jesienią 2007 r. (wrzesień–październik) wykazał różnice zmienności stężenia Rn-222 podczas dwóch typów cyrkulacji atmosferycznej. W badanym domu jednorodzinnym (bez podpiwniczenia) zaobserwowano m.in. wyraźny rytm dobowy zmian stężenia Rn-222, przy średnim stężeniu Rn-222 40 $Bq \cdot m^{-3}$, w czasie pogody ze słabym wiatrem, kształtowanej przez ośrodek wysokiego ciśnienia. Podczas przemieszczania się nad obszarem środkowej Polski układu niskiego ciśnienia z frontem atmosferycznym i silnym wiatrem średnie stężenie Rn-222 w budynku było dwukrotnie wyższe i nie wykazywało rytmu dobowego.

27. Pomiary stężenia Rn-222 na I kondygnacji domu jednorodzinnego wykazały różnice wyników w stosunku do parteru budynku – zakres wahań dobowych na piętrze był mniejszy niż na parterze. Tendencja spadkowa stężenia Rn-222 wraz ze wzrostem ciśnienia atmosferycznego była obserwowana na obu kondygnacjach. Prawidłowości w zmienności stężenia Rn-222 w budynku, które wykazał opisywany eksperyment wymagają weryfikacji w oparciu o dłuższą serię danych.

28. Prawidłowości sformułowane w niniejszej pracy wskazują na kierunki dalszych badań, w celu nie tylko lepszego poznania meteorologicznych uwarunkowań promieniotwórczości atmosfery związanej z radonem, ale również w celu wykorzystania tego radionuklidu jako znacznika procesów zachodzących w warstwie granicznej troposfery. Takie zamierzenia wymagają rozszerzenia badań o pomiary stężenia Rn-222 w profilu pionowym atmosfery. Badania przeprowadzone w latach 2008–2010 wskazują także na potrzebę rozszerzenia pomiarów o monitorowanie ekshalacji Rn-222, co mogłoby dopełnić, a także potwierdzić wnioski płynące z pomiarów stężenia Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza. Ze względów poznawczych potrzebna jest zatem kontynuacja środowiskowych badań nad radonem, nie tylko w ujęciu klimatologii miejskiej, ale także w ujęciu topoklimatycznym na obszarach niezurbanizowanych. Dotychczasowe analizy są traktowane jako przesłanka do dalszych badań dla lepszego poznania współoddziaływania warunków mikro-, topo- i makroklimatycznych na promieniotwórczość atmosfery - niewątpliwie jednego z ważniejszych bodźców biometeorologicznych.

SPIS LITERATURY

1. Allen L., Sextro R., Sextro R.G., 1997, Radon entry into building driven by atmospheric pressure fluctuations, *Environmental Science & Technology*, 31, s. 1742–1748.
2. Arnold D., Vargas A., Ortega X, 2009, Analysis of outdoor radon progeny concentration measured at the Spanish radioactive aerosol automatic monitoring network, *Applied Radiation and Isotopes*, 67, s. 833–838.
3. Arnold D., Vargas A., Vermeulen A.T., Verheggen B., Seibert P., 2010, Analysis of radon origin by backward atmospheric transport modelling, *Atmospheric Environment*, 44, s. 494–502.
4. Baciu A.C., 2005, Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania), *Journal of Environmental Radioactivity*, 83, s. 171–189.
5. Bem H., Bem E.M., Ostrowska M., 1999, Radon concentrations in kindergartens and schools in the Łódź region of Poland, *Radiation Protection Dosimetry*, 82, s. 147–149.
6. Bem H., Olszewski M., Kaczmarek A., 2004, Concentration of selected natural radionuclides in the thermal groundwater of Uniejów, Poland, *Nukleonika*, 49, s. 1–5.
7. Bem H., 2005, *Radioaktywność w środowisku naturalnym*, Polska Akademia Nauk, Łódź, 100 s.
8. Biernacka M., Henschke J., Jagielak J., Koczyński A., Mamont-Cieśla K., 1991, Preliminary measurements of the natura ionization radiation in three types of buildings in Poland, *Postępy Fizyki Medycznej*, 26, 1–2, s. 55–66.
9. Brost R., Chatfield R.B., 1989, Transport of radon in a three dimensional sub-hemispheric model, *Journal of Geophysical Research*, 94 (D4), s. 5095–5119.
10. Butterweck R., Reineking A., Kesten J., Porstendörfer J., 1994, The use of the natural radioactive noble gases radon and toron as a tracers for the study of turbulent exchange in the atmosphere boundary layer – case study in and above a wheat field, *Atmospheric Environment*, 28, s. 1963–1969.
11. Carvalho F.P., 1995, Origins and concentrations of ^{222}Rn, ^{210}Pb, ^{210}Bi, and ^{210}Pb in the surface air at Lisbon, Portugal, at the Atlantic edge of the European continental landmass, *Atmospheric Environment*, 29, s. 1809–1819.
12. Chałupnik S., Wysocka M., 2003, Measurement of radon exhalation from soil – development of the metod and preliminary results, *Journal of Mining Science*, 39, s. 191–198.
13. Chałupnik S., 2007, Rad w wodach kopalń węgla kamiennego na Górnym Śląsku – metody badań, ocena wpływu na środowisko, zapobieganie skażeniom. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa*, 870, 185 s.

14. Chambers S., Zahorowski W., Matsumoto K., Uematsu M., 2009, Seasonal variability of radon-derived fetch regions for Sado Island, Japan, based on 3 years of observations: 2002–2004, *Atmospheric Environment*, 43, s. 271–279.

15. Chan S.W., Lee C.W., Tsui K.C., 2010, Atmospheric radon in Hong-Kong, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, s. 494–503.

16. Chandrashekara M.S., Sannappa J., Paramesh L., 2006, Studies on atmospheric electrical conductivity related to radon and its progeny concentrations in the lower atmosphere at Mysore, *Atmospheric Environment*, 40, s. 87–95.

17. Chmielewska I., Chałupnik S., Mielnikow A., Hudzik G., Czapla B., 2011, Nuklidy promieniotwórcze w wodach pitnych na Śląsku, *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa*, 2, s. 29–38.

18. Ciba J., Trojanowska J., Ziłotajkin M., 1996, *Mała encyklopedia pierwiastków*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 196 s.

19. Ciężkowski M., 1978, Wstępne pomiary stężenia niektórych gazów i radioaktywności w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, No. 311, Studia Geograficzne, t. XXIV, s. 1–95.

20. Ciężkowski M., Ciężkowski W., 1981, Możliwość zastosowania wód radonowych sztolni Śnieżnik do celów leczniczych, *Problemy Uzdrowiskowe*, z. 9/12, s. 181–183.

21. Ciężkowski M., Marszałek H., Solecki A., 1993, Radon w wodach podziemnych i powietrzu glebowym obszaru granitu karkonoskiego, *Materiały konferencyjne „Geoekologiczne problemy Karkonoszy, Karpacz 11-13 X 1991*, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, s. 119–124.

22. Cohen F., Robertson L.B., 2002, Latitudinal distribution of radon-222 flux from continents, *Tellus*, 54 (B), s. 127–133.

23. Cothern C.R., Smith J.E., 1987, Environmental Radon, *Environmental Science Research*, 35, 373 s.

24. De Francesco S., Pascale Tommasone F., Cuoco E., Tedesco D., 2010, Indoor radon seasonal variability at different floors of buildings, *Radiation Measurements*, 45, s. 928–934.

25. Dobosz M., 2004, *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 452 s.

26. Domański T., Liniecki J., Olichwier-Holwek J., Andryszek C., 1970, Stężenie produktów rozpadu radonu w niektórych polskich kopalniach wegla, rud metali surowców chemicznych, *Medycyna Pracy*, 1, s. 23–35.

27. Doll R., 1992, Risk from radon, *Radiation Protection Dosimetry*, 42, s. 149–153.

28. Draxler, R.R., Rolph, G.D., 2010. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (*http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php*) NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

29. Dueñas C., Fernández M.C., Carretero J., Liger E., Pérez M., 1997, Release of ^{222}Rn from Some Soils, *Annales Geophysicae*, 15, s. 124–133.

30. Dueñas C., Perez M., Fernandez C., Carretero J., 1996a, Radon concentrations in surface air and vertical atmospheric stability of the lower atmosphere, *Journal of Environmental Radioactivity*, 31, s. 87–102.

31. Dueñas C., Fernandez C., Carretero J., Lieger E., 1996b, Natural Radioactivity Levels in Atmospheric Air in Malaga (Spain), *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 47, No. 9/10, s. 1077–1080.

32. Dueñas C., Fernandez M.C., Cañete S., Carretero J., Liger E., 1999, ^{222}Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave, *Atmospheric Environment*, 33, s. 501–510.

33. Dziennik Ustaw z 2007 Nr. 04 poz. 29, Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 02.01.2007, w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów.

34. Eisenbud M., 1987, *Environmental Radioactivity*, Third Edition, Academic Press, San Diego, 151 s.

35. EL-Hussein A., Mohamemed A., Abd EL-Hady M., Ahmed A.A., Ali A.E., Barakat A., 2001, Diurnal and seasonal variation of short-lived radon progeny concentration and atmospheric temporal variations of ^{210}Pb and ^{7}Be in Egypt, *Atmospheric Environment*, 35, s. 4305–4313.

36. EURATOM, 1996, EU Council Directive 96/29/Euratom, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, *Safety Series* No. 115, IAEA, Vienna, s. 279–354.

37. Feichter J., Crutzen P.J., 1990, Parametrization of vertical tracer transport due to deep cumulus convection in a global transport model and its evaluation with ^{222}Radon measurements, *Tellus*, 42B, s. 100–117.

38. Florea N., Duliu O.G., 2012, Eighteen years of continuous observation of Radon and Thoron progenies atmospheric activity, *Journal of Environmental Radioactivity*, 104, s. 14–23.

39. Fortuniak K., 2003, *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 233 s.

40. Fortuniak K., 2010, *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 232 s.

41. Fortuniak K., Kłysik K., Wibig J., 2006, Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź, *Theoretical and Applied Climatology*, 84, s. 91–101.

42. Fortuniak K., Kłysik K., 2004, Wybrane cechy klimatu lokalnego Łodzi, *Acta Geographica Lodziensia*, 89, s. 195–206.

43. 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, s. 224–234.

44. Genitron Instruments GmbH, 1998, *User manual portable radon monitor AlphaGUARD*, Publishers Genitron Instruments GmbH, Frankfurt 2006, Germany, 12, 37 s.

45. Genrich V., 2006, *AlphaGUARD PQ2000/MC50 multiparameter radon monitor. Characterisation of its physical properties under normal climatic and severe environmental conditions*, Publishers Genitron Instruments GmbH, Frankfurt 2006, Germany, 52 s.

46. Henriksen T., Maillie H.D., 2003, *Radiation and Health*, Taylor & Francis, London and New York, 226 s.

47. Hosler C.R., 1966, Natural Radioactivity (Radon-222) and Air Pollution Measurements in Washington D.C, *Journal of Applied Meteorology*, 5, s. 653–662.

48. Howard L., 1833, The climate of London, Volume 1, Edition of International Association for Urban Climate (IAUC) *http://urban-climate.com/wp3/wp-content/uploads/2011/04/Luke Howard_Climate-of-London-V1.pdf*

49. Hötzl H., Winkler R., 1994, Long-term variation of outdoor radon equilibrium equivalent concentration, *Radiation and Environmental Biophysics*, 33, s. 381–392.

50. Hubbard L.M., Hagberg N., 1996, Time-variation of the soil gas radon concentration under and near a Swedish house, *Environment International*, 22, Suppl. 1, s. 477–482.

51. ICRP, 1959, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP, Publication 1. Pergamon Press, Oxford, UK.

52. Jacob D.J., Prather M.J., Rasch P.J., Shia R.-L., Balkanski Y.J., Beagley S.R., 1997, Evaluation and intercomparison of global atmospheric transport models using 222Rn and other short lived tracers, *Journal of Geophysical Research*, 102 (D5), s. 5953–5970.

53. Jacob J.D., Prather M.J, 1990, Radon-222 as a test of convective transport in general circulation model, *Tellus*, 42 B, s. 118–134.

54. Janik M., 2005, Przenikanie radonu z gruntu do budynku. Modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych, *Raport Nr 1966/AP, praca doktorska*, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, *www.ifj.edu.pl/reports/2005.html*, Kraków, wrzesień 2005.

55. Janik M., Kozak K., Mazur J., Haber R., 2007, Radon w budynkach - źródła i sposoby zabezpieczeń, *Builder*, luty 2007, s. 76–79.

56. Jaracz P., 2001, *Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 115 s.

57. Jaworowski Z., 1997, Dobroczynne promieniowanie, *Wiedza i Życie*, 3, s. 20–29.

58. Jenkinson A.F., Collison P., 1977, An initial climatology of gales over the North Sea. Synoptic Climatology Branch Memorandum 62, Meteorological Office, Bracnell, 18 s.

59. Jones P.D., Hulme M., Briffa K.R., 1992, A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme, *International Journal of Climatology*, 13, s. 655–663.

60. Kalnay E., Kanamitsu R., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, s. 437–471.

61. Karpińska M., 2007, Zagrożenie w budynkach mieszkalnych, *Builder*, 8, s. 84–86.

62. Karpińska M., Mnich Z., Kapała J., 2004a, Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 77, s. 101–109.

63. Karpińska M., Mnich Z., Kapała J., Antonowicz K., 2004b, Seasonal changeability of indoor radon concentrations in one-family house, *Nukleonika*, 49, 1, s. 33–36.

64. Kataoka T., Younoki E., Shimizu M., Mori T., Tsukamoto O., Ohhashi Y., Sahashi K., Maitani T., Miyashita K., Fujikawa Y., Kudo A., 1998, Diurnal variation in radon concentration and mixing-layer depths, *Boundary-Layer Meteorology*, 89, s. 225–250.

65. Kataoka T., Yunoki E., Shimizu M., Mori T., 2001, A study of the atmospheric boundary layer using radon and air pollutants as tracers, *Boundary-Layer Meteorology*, 101, s. 131–155.

66. Kataoka T., Tsukamoto O., Younoki E., Michihiro K., Sugiyama H., Shimizu M., Mori T., Sahashi K., Fujii S., 1992, Variation of 222Rn concentration in outdoor air due to variation of the atmospheric boundary layer, *Radiation Protection Dosimetry*, 45, 1/4, s. 403−406.

67. Kędziora A., 1999, *Podstawy agrometeorologii*, PWRiL, Warszawa, 364 s.

68. Kitto M.E., 2005, Interrelationship of indoor radon concentrations, soil-gas flux, and meteorological parameters, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 264, 2, s. 381–385.

69. Klatkowa H., Kamiński J., Szafrańska D., 1991, *Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000*, arkusz Zgierz.

70. Kłysik K, 1996, Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emission in Łódź, Poland, *Atmospheric Environment*, 30, s. 3397–3404.

71. Kłysik K., Fortuniak K., 1999, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland, *Atmospheric Environement*, 33, s. 3885–3895.

72. Kopcewicz T., 1968, O wpływie rodzaju mas powietrza na koncentrację naturalnych radionuklidów – pochodnych radonu i toronu – w przyziemnej warstwie powietrza, *Przegląd Geofizyczny*, R. XIII (XXI), z. 4, s. 333–344.

73. Kopcewicz T., 1974, O zmianach promieniotwórczości naturalnej powietrza, *Przegląd Geofizyczny*, R. XIX (XXVII), z. 3−4, s. 181–203.

74. Korzeniowska-Rejmer E., 2008, Radon w gruncie i techniki redukcji jego stężenia w obiektach budowlanych, *Czasopismo Techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 1-Ś, s. 73–88.

75. Kozak K., Mazur J., Kozłowska B., Karpińska M., Przylibski T.A., Mamont-Cieśla K., Grządziel D., Stawarz O., Wysocka M., Dorda J., Żebrowski A., Olszewski J., Hovhannisyan H., Dohojda M., Kapała J., Chmielewska I., .Kłos B., Jankowski J., Mnich S., Kołodziej R., 2011, Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwelings of Poland resulting from seasonal variability of indor radon, *Applied Radiation and Isotopes*, 69, s. 1459–1465.

76. Kozak K., Mazur J., Horwacik T., 2004, Temporal and spatial changeability of radon concentration in soil, *Seventh International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*, Prague, September 15th-18th, 2004.

77. Kożuchowski K., 2004, Cyrkulacja atmosferyczna nad Polską i jej wpływ na warunki klimatyczne, [w:] Kożuchowski K. (red.) - *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce,* Wydawnictwo „Biblioteka", Łódź, s. 69–88.

78. Krajny E., Ośródka L., Skowronek J., Skubacz K., Wojtylak M., 2005, Diurnal variation of the mixing-layer height and polonium concentration in the air, *International Journal of Environment and Pollution*, 25, s. 95–104.

79. Lambert G., Polian G., Taupin D., 1970, Existence of periodicity in radon concentration in large scale circulation at lower altitude between 40° and 70°S, *Journal of Geophysical Research*, 75, s. 2341–2345.

80. Landsberg H.E., 1981, *The Urban Climate,* Academic Press, 285 s.

81. Łoskiewicz J., 1996, Pomiary radonu w kopalniach i budynkach - wybrane zagadnienia, [w:] *40 lat Geofizyki Jądrowej w Krakowie,* Wyd. AGH, Wydz. Fiz i Techn. Jądr. z. Fizyka, s. 16–34.

82. Łoskiewicz J., 1997, *Indoor Exposure to Radon and its Health Effect*, Raport Instytutu Fizyki Jądrowej PAN nr 1766/AP, Kraków, 18 s.

83. Magalhães M.H., Amaral E.C.S., Sachett I., Rochedo E.R.R., 2003, Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements, *Journal of Environmental Radioactivity*, 67, s. 131–143.

84. Majborn B., 1992, Seasonal variations of radon concentrations in singly-family house with different sub-structures, *Radiation Protection Dosimetry*, 45, 1, s. 443–447.

85. Mamont-Cieśla K., Stawarz O., Karpińska M., Kapała J., Kozak K., Grządziel D., Chmielewska S.I., Olszewski J., Przylibski T.A., Żebrowski A., 2010, Intercomparison of Radon CR-39 Detector Systems Conducted in CLOR's Calibration Chamber, *Nukleonika*, 55, 4, s. 589−593.

86. Mamont-Cieśla K., Jagielak J., Rosiński S., Sosińska A., Bysiek M., Henschke J., 1995, Indoor radon concentration in Poland, [w:] *Proceedings of Symposium on Radiation Protection in Neibourhoud Countries in Central Europe-1995, September 4-8, 1995, Portoroż, Slovenia.*

87. Mamont-Cieśla K., Wołoszczuk K., Stawarz O., Sosińska A., Rosiński S., Lipiński P., 2010b, Radon indoors and outdoors in Poland, [w:] *Proceedings of Sixth Conference on Protection Against Radon at Home and Work. September 13-17, 2010, Prague, Czech Republic.*

88. Marley F., 2001, Investigation of the influence of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings, *Atmospheric Environement*, 35, s. 5347–5360.

89. Martin P., Tims S., Ryan B., Bollhöfer A., 2004, A radon and meteorological measurement network for the Alligator Rivers Region, Australia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 76, s. 35–49.

90. Mazur J., 2008, Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu a parametry meteorologiczne i własności gleby, *Raport Nr 2014/AP, praca doktorska,* Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, *http://www.ifj.edu.pl/publ/reports/2008/2014.pdf*, Kraków, wrzesień, 2008.

91. Mazur J., Janik M., Łoskiewicz J., Olko P., Swakoń J., 1999, Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors, *Radiation Measurements*, 31, s. 295–300.

92. Megumi K., Abe S., Abe M., Matsunami T., Ishiyama T., Kimura S., Yamazaki K., Tsujimoto T., 1992, Radon concentration, adsorbed dose rate in air and concentration of natural radionuclides in soil in the Osaka district of Japan, *Radiation Protection Dosimetry*, 45, s. 477–482.

93. Miliszkiewicz A., 1978, *Radon*, PWN, Warszawa – Wrocław, 64 s.

94. Morizumi J., Nagamine K., Iida T., Ikebe Y., 1996, Estimation of areal flux of atmospheric methane in an urban area of Nagoya, Japan, inferred from atmospheric radon-222 data, *Atmospheric Environment*, 30, s. 1543–1549.

95. Moses H., Stehney A.F., Lucas Jr. H.F., 1960, The effect of meteorological variables upon the vertical and temporal distributions of atmospheric radon, *Journal of Geophysical Research*, 65, s. 1223–1238.

96. Musiałowicz T., 2011, *Encyklopedyczny słownik angielskich terminów i definicji z dziedziny ochrony radiologicznej, wybranych terminów i definicji z dziedzin pokrewnych oraz ich odpowiedniki przyjęte w Polsce*, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Wydanie czwarte, uzupełnione, Warszawa, *http://www.clor.waw.pl/ochrona/slownik.htm*

97. Nazaroff W.W., Nero A.V. jr., 1988, *Radon and its decay products in indoor air*, A Wiley-Interscience Publication, New York, 518 s.

98. Nevissi A.E., Bodansky D., 1987, Radon sources and level in the outside environment. Chapter 4, [w:] Bodansky D., Roblin M.A., Stadler D.R. (eds.) - *Indoor radon and its hazards*, University of Washington press, Seattle and London, s. 42–50.

99. Niewiadomski T., 1995, Survey of indoor radon concentration in South-Eastern Poland, *Nukleonika*, 40, 1, s. 27–42.

100. Niewiadomski T., Waligórski M., 1993, Co powinien obejmować ogólnopolski projekt obniżenia zachorowalności na nowotwory płuc w wyniku wdychania radonu?, *Postępy Techniki Jądrowej*, 36 (1–2), s. 17–23.

101. Niewiadomski T., Waligórski M., 1995, Radon jako społeczny problem zdrowotny, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki*, 23, s. 3–20.

102. Nowina-Konopka M., 1995, Indoor radon levels in north-western Poland, *Radiation Protection Dosimetry*, 62, 4, s. 239–244.

103. Oke T.R., 1995, *Boundary layer climates*, Methuen, London, 372 s.

104. Olszewski J., Skubalski J., 2011, Stężenie radonu w wybranych budynkach mieszkalnych na terenie miasta Łodzi, *Medycyna Pracy*, 62, 1, s. 31–36.

105. Omori Y., Thobo I., Nagahama H., Ishikawa Y., Takahashi M., Sato H., Sekine T., 2009, Variation of atmospheric radon concentration with bimodal seasonality, *Radiation Measurements*, 44, s. 1045–1050.

106. Ostrowska M., 2002, *Oszacowanie dawki skutecznej od radonu dla mieszkańców województwa łódzkiego na podstawie pomiarów stężenia radonu i współczynnika równowagi F*, praca doktorska, Wydział Chemiczny Politechniki Łódzkiej, Biblioteka Główna Politechniki Łódzkiej, 126 s.

107. Ośródka L., Skubacz K., Skowronek J., Krajny E., Wojtylak M., 2002, Radon concentration in the atmosphere as an indicator of the depth of the mixing layers in the region of mining activity. *Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies IX, Eds. C.A. Brebbia & P.Zannetti, 9th International Conference on the Modelling, Monitoring and Management of Environmental Problems*, Bergen, Norway, May 2002, WIT Press, s. 109–116.

108. Ośródka L., Krajny E., Wojtylak K., Skubacz K., Skowronek J., 2003, Estimation of the height of the mixing layer using polonium concentrations in the atmosphere. An attempt of modelling. *Air pollution XI, Series: Advances in Air pollution*, C.A. Brebbia and F. Patania, Eds. WIT Press, 13, s. 23–31.

109. Pawlak W., 2001, System pomiarowy strumienia ciepła w gruncie (na podstawie eksperymentu w Łodzi), *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska*, sec. B, vol. LV/LVI, 2000/2001, s. 269–275.

110. Pearson J.E., Jones G.E., 1965, Emanation of radon 222 from soil and its use as a tracer, *Journal of Geophysical Research*, 70, s. 5279–5290.

111. Peńsko J., Michnowski S., Warzecha S., Gwiazdowski B., 1976, Pomiary radioaktywności, elektryczności atmosferycznej i elementów meteorologicznych na terenie Obserwatorium Geofizycznego w Świdrze, *Przegląd Geofizyczny*, R. XXI (XXIX), z. 4, s. 281–286.

112. Perrino C., Pietrodangelo A., Febo A., 2001, An atmospheric stability index based on radon progeny measurements for the evaluation of primary urban pollution, *Atmospheric Environment*, 35, s. 5235–5244.

113. Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N, 2009, Profiles of polar conductivities and of radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer, *Atmospheric Research*, 91, s. 206–214.

114. Piotrowski P., 2009, Obiektywna metoda klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej dla Polski. *Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica*, 10, 216 s.

115. Plewa M., Plewa S., 1999, Radon w środowisku naturalnym i jego migracja do budynków mieszkalnych, *Prace Geologiczne*, 145, Wydawnictwo Naukowe DWN, Polska Akademia Nauk w Krakowie, 94 s.

116. Podstawczyńska A., Kozak K., 2008, Preliminary results of measurements of radon (222Rn) concentration in the air in Łódź, [w:] Kłysik K., Wibig J., Fortuniak K. (red.) - Klimat i bioklimat miast. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Katedra Meteorologii i Klimatologii UŁ, Łódź, s. 467–476.

117. Podstawczyńska A., Kozak K., Hovhanissyan H., Pawlak W., 2009, Zmienność stężenia radonu (^{222}Rn) w powietrzu na tle warunków meteorologicznych na obszarze miejskim i zamiejskim, *Prace Geograficzne IGiGP UJ*, z. 122, s. 133–146.

118. Podstawczyńska A., Kozak K., Pawlak W., Mazur J., 2010a, Seasonal and diurnal variation of outdoor radon (^{222}Rn) concentrations in urban and rural area with reference to meteorological conditions, *Nukleonika*, 55, 4, s. 543–547.

119. Podstawczyńska A., Kozak K., Mazur J., 2010b, Pomiary stężenia radonu (^{222}Rn) w powietrzu atmosferycznym i glebowym w Łodzi i na terenie gminy Zgierz w różnych warunkach meteorologicznych, [w:] Barwiński M. (red.) - *Obszary metropolitalne we współczesnym*

środowisku geograficznym, tom 2. 58. Zjazd Polskiego Towarzystwa Geograficznego, Łódź, 8–12 września 2010 r. Wyd. Triada, Łódź, s. 275–284.

120. Podstawczyńska A., Kozak K., Mazur J., 2010c, Urban-rural differences of radon (^{222}Rn) concentration in the air surface layer with reference to meteorological conditions - preliminary analysis, *Acta Agrophysica*, 179, s. 81–88.

121. Podstawczyńska A., Piotrowski P., 2010a, Wpływ cyrkulacji atmosferycznej i lokalnych warunków meteorologicznych na stężenie radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza w Łodzi i Krakowie, [w:] Kolendowicz L. (red.) - *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Warunki cyrkulacyjne i radiacyjne.* Seria: Studia i Prace z Geografii i Geologii nr 14, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 143–155.

122. Podstawczyńska A., Piotrowski P., 2010b, Stężenie radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza w Polsce środkowej i południowej na tle cyrkulacji atmosferycznej, *Przegląd Geofizyczny*, R. LV, z. 3–4, s. 145–156.

123. Podstawczyńska A., Piotrowski P., 2012, Najwyższe stężenia radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza na tle cyrkulacji atmosferycznej w Polsce Środkowej i Południowej, [w:] Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu, *Prace Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego*, 74, s. 309–317.

124. Podstawczyńska A., 2012a, Metodyka pomiarów stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu w Łodzi i na terenie zamiejskim w powiązaniu z wybranymi elementami meteorologicznymi, *Przegląd Geofizyczny*, R. LVII, z. 2, s. 127–138.

125. Podstawczyńska A., 2012b, Zmienność stężenia radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza na tle wartości strumienia ciepła glebowego, *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie*, t. 12, z. 2 (38), s. 197–206.

126. 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, s. 709–713.

127. Porstendörfer J., 1994, Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air, *Journal of Aerosol Science*, 25, s. 219–263.

128. Prospero J.M., Carlson T.N., 1970, Radon-222 in North Atlantic trade winds:its relationship to dust transport from Africa, *Science*, 167, s. 974–977.

129. Przylibski T.A., 1999, Radon concentration changes in the air of two caves in Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 45, s. 81-94.

130. Przylibski T.A., 2000, Changes in the concentration of radon-222 and its products in the air of underground tourist route in Walim (Lower Silesia), *Archives of Environmental Protection*, 26, s. 3–27.

131. Przylibski T.A., 2001, Radon and its daughter products behaviour in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Zloty Stok (Sudety Mountains, SW Poland), *Journal of Environmental Radioactivity*, 57, s. 87–103.

132. Przylibski T.A., 2005, *Radon składnik swoisty wód leczniczych Sudetów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 329 s.

133. Przylibski T.A., 2006, Niewidzialne zagrożenie, *Builder*, 7–8, s. 64–67.

134. Przylibski T.A., Piasecki J., 1998, Radon as a natural radioactive tracer of permanent air movements in the Niedźwiedzia Caves (Śnieżnik Kłodzki, Sudety Mts.), *Kras i Speleologia*, 9, s. 179–193.

135. *Radiologiczny Atlas Polski*, 1998, Jagielak J., Biernacka M., Henschke J., Sosińska A., Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 64 s.

136. *Radiologiczny Atlas Polski*, 2005, 2006, Biernacka M., Isajenko K., Lipiński P., Pietrzak-Flis Z., Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Biblioteka Monitoringu Środowiska Warszawa, 64 s.

137. Raport Karolinska Hospital (Szwecja), 1991, cytowane za *Nuclear News*, 1992, 3, s. 27–34.

138. Raport PAA - Roczny Raport Państwowej Agencji Atomistyki, 2009, Działalność prezesa państwowej agencji atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2008 roku, Warszawa, czerwiec 2009, *http://www.paa.gov.pl/*

139. Raport PAA - Roczny Raport Państwowej Agencji Atomistyki, 2010, Działalność prezesa państwowej agencji atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2009 roku, Warszawa, *http://www.paa.gov.pl/*

140. Raport PAA - Roczny raport Państwowej Agencji Atomistyki, 2011, Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2010 roku, Warszawa 2011, *http://www.paa.gov.pl/*

141. Riley W.J., Robinson A.L., Gadgil A.J., Nazaroff W.W., 1999, Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings: model development and exploratory results, *Atmospheric Environment*, 33, s. 2157–2168.

142. Rovenska K., Thinova L., 2010, Seasonal variation of radon in the Bozkov cave, *Nukleonika*, 55, 4, s. 483–489.

143. Rowe J.E., Kelly M., Price L.E., 2002, Weather system scale variation in radon-222 concentration of indoor air, *Science of the Total Environment*, 284, s. 157–166.

144. Sakashita T., Murakami T., Iida T., Ikebe Y., Suzuki K., Chno M., 1994, The numerical model on three dimensional atmospheric transport with application to the transport of ^{222}Rn, *Journal Atmospheric Electricity*, 14, s. 57–62.

145. Schmidt M., Graul R., Sartorius H., Levin I., 1996, Carbon dioxide and methane in continental Europe: a climatology, and ^{222}Radon - based emission estimates, *Tellus*, 48B, s. 457–473.

146. Sesana L., Barbieri L., Facchini U., Marcazzan G., 1998, 222Rn as a tracer of atmospheric motions: a study in Milan, *Radiation Protection Dosimetry*, 78, s. 65–71.

147. Sesana L., 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, s. 147–160.

148. Singh K., Singh M., Singh S., Sahota H.S., Papp Z., 2005, Variation of radon (^{222}Rn) progeny concentrations in outdoors air as a function of time, temperature and relative humidity, *Radiation Measurements*, 39, s. 213–217.

149. Skowronek J., Wysocka M., Mielnikow A., 1999, Badania stężeń radonu w przedszkolach na obszarze gminy górniczej, *Postępy Techniki Jądrowej*, 42, s. 34–41.

150. Skowronek J., 1991, Charakterystyka zagrożenia krótkożyciowymi produktami rozpadu radonu w kopalniach węgla, Praca doktorska, Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

151. Sorbjan Z., 1983, *Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze*, PWN, Warszawa, 339 s.

152. Strzelecki R., Wołkowicz S., 1993, Geologia a powstawanie emanacji radonowych, *Postępy Techniki Jądrowej*, 36, 1–2, s. 3–26.

153. Stull R.B., 1988, *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 666 s.

154. Sun Q., Tokonami S., Hamada Y., Akiba S., 2002, Main meteorological parameters to influence indoor radon level, *Radioisotopes*, 51, s. 120–126.

155. Sundal V.A., Valen V., Soldal O., Strand T., 2008, The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments, *Science of the Total Environment*, 389, s. 418–428.

156. Swakoń J., Kozak K., Paszkowski M. i in., 2005, Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the Krakow area, *Journal of Environmental Radioactivity*, 78, s. 137–149.

157. Szot Z., 1993, Rad i radon w środowisku oraz skutki ich wniknięcia do organizmu człowieka, *Problemy Techniki Jądrowej*, 36, z. 1–2, s. 7–16.

158. Tanahara A., Taira H., Takemura M., 1997, Radon distribution and the ventilation of a limestone cave on Okinawa, *Geochemical Journal*, 31, s. 49–56.

159. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) 2000, Report - Sources and effects of ionizing radiation, Annex B Exposures from natural radiation sources - Raport Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego, s. 84–141, *http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf*

160. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe. Dz. U. Nr 161, poz. 1689; za: Dz.U. Nr 70, poz. 632 z 2004 r.

161. Van der Laan S., Neubert R.E.M., Meijer H.A.J., 2009, Methane and nitrous oxide emissions in The Netherlands: ambient measurements support the national inventories, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, s. 9369–9379.

162. Vaupotič J., Kobal I., Križman M.J., 2010, Background outdoor radon levels in Slovenia, 2010, *Nukleonika*, 55, 4, s. 579–582.

163. Vaupotič J., Andjelov M., Kobal I., 2002, Relationship between radon concentrations in indoor air and in soil gas. *Environmental Geology*, 42, 6, s. 583–587.

164. Wach P., Zimnoch M., Różański K., Kozak K., 2009, Temporal Variability of Radon-222 in Near-ground Atmosphere, [w:] *Book of Abstracts International Conference "Radon in Environment, Zakopane 10-14 May 2009*, Raport No.2028/AP Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, 51.

165. *WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective*, 2009, Zeeb H., Shannoun F. (eds.), World Health Organization Press, Geneva, 95 s.

166. Willmott C.J., 1981, On the validation of models, *Physical Geography*, 2, s. 184–194.

167. Willmott C.J., 1982, Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, s. 1309–1312.

168. Winkler R., Ruckerbauer F., Trautmannsheimer M., Tschiersch J., Karg E., 2001, Diurnal and seasonal variation of the equlibrium state between short-lived radon decay products and radon gas in the ground-level air, *Radiation and Environmental Biophysics*, 40, s. 115–123.

169. Winkler R., Aehling K., 1998, Temporal variation of thoron decay product concentration in the atmosphere and comparison with radon decay product concentration, *Radiation and Environmental Biophysics*, 37, s. 35–39.

170. Winkler R., Ruckerbauer F., Bunzl K., 2001, Radon concentration in soil gas: a comparison of the a comparison of the variability resulting from different methods, spacial heterogeneity and seasonal fluctuations, *Science of the Total Environment*, 272, s. 273–282.

171. Wysocka M., Chałupnik S., 2003, Correlation of radon concentration level with mining and geological conditions in Upper Silesia region, *Journal of Mining Science*, 39, s. 199–206.

172. Wysocka M., Chałupnik S., Skowronek J., Mielnikow A., 2004, Comparison between short- and long-term measurements of radon concentration in dwellings of Upper Silesia (Poland), *Journal of Mining Science*, 40, s. 417–422.

173. Wysocka M., Kotyrba A., Chałupnik S., Skowronek J., 2005, Geophysical methods in radon risk studies, *Journal of Environmental Radioactivity*, 82, s. 351–362.

174. Zagórski Z.P., 2010, Possible role of radon on prebiotic chemistry and in early evolution of Life on Earth, *Nukleonika*, 55, 4, s. 555–558.

175. Zahorowski W., Chambers S.D., Henderson-Sellers A., 2004, Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies, *Journal of Environmental Radioactivity*, 76, s. 3–33.

176. Zalewski M., Mnich Z., Karpińska M., Kapała J., 1997a, Pomiary produktów rozpadu radonu w budynkach mieszkalnych północno-wschodniej Polski, *Archiwum Ochrony Środowiska*, 23, s. 31–43.

177. Zalewski M., Karpińska M., Mnich Z., Kapała J., 1997b, Koncentracja radonu w wodzie na obszarze północno-wschodniej Polski, *Przegląd Geologiczny*, 45, 5, s. 523–525.

178. Zdrojewicz Z., Belowska-Bień K., 2004, Radon i promieniowanie jonizujące a organizm człowieka, Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej, 58, s. 150–157.

179. Zagórski Z.P., 1997, Bać się radonu? *Wiedza i Życie*, 8, s. 56–59.

180. Zhang Liang, Zhang Liguo, Guo Q., 2009, A long-term investigation of the atmospheric radon concentration in Beijing, China, *Journal of Radiological Protection*, 29, s. 263–268.

181. Zimnoch M., Półtorak P., Wach P., Różański K., 2008, Radon-222 in the urban atmosphere: assessing the local fluxes of CO_2 and CH_4. European Geosciences Union, General Assembly 2008, Vienna, Austria, 15–20 April 2008, Geophysical Research Abstracts, vol. 10, 2 s., *http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/04633/EGU2008-A-04633.pdf*

182. Zimnoch M., Godłowska J., 2009, Determination of Rn-222 Flux in Kraków Urban Area using Alpha Spectrometry and Sodar Measurements, [w:] *Proceedings of Short Papers, 7-th International Conference on Air Quality – Science and Application, Istambul, 24-27 March 2009*, ISBN: 978-1-905313-64-8, s. 710–713.

183. *http://www.gios.gov.pl/*

184. *http://www.igf.edu.pl/pl/obserwatoria/swider*

SPIS RYSUNKÓW I TABEL

Rysunki

Rys. 3.1. Przyrząd AlphaGUARD® PQ2000PRO w Ogrodzie Skalnym Collegium Geographicum Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego (fot. A. Podstawczyńska) 32

Rys. 3.2. Schemat komory jonizacyjnej AlphaGUARD® PQ2000PRO firmy Genitron Instruments GmbH (na podstawie: Genitron Instruments GmbH 1998) 33

Rys. 3.3. a. Przyrząd AlphaGUARD® PQ2000PRO w konfiguracji z komputerem w trakcie transmisji danych, stacja Ciosny; b. System pomiarowy chwilowych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym - komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO, sonda glebowa RS-1, pompa AlphaPUMP - wykorzystany w sesji pomiarowej na Miejskiej Stacji Meteorologicznej (MSM) w centrum Łodzi w dniu 19.02.2008 r. (fot. A. Podstawczyńska) 35

Rys. 3.4. Budowa detektora śladowego CR-39 wykorzystywanego do sezonowych pomiarów stężenia Rn-222 w powietrzu glebowym: a. Komora dyfuzyjna z detektorem śladowym CR-39; b. Schemat budowy komory dyfuzyjnej z detektorem śladowym, tj. folią CR-39; c. Obraz mikroskopowy śladów cząstek alfa pochodzących z rozpadu Rn-222 na folii CR-39 (poliwęglan allilodiglikolowy) po jej wytrawieniu (opracowanie własne na podstawie materiałów udostępnionych przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN w Krakowie) 36

Rys. 3.5. a. Rejestrator danych meteorologicznych CR10X; b. Reflektometr CS616 do pomiaru wilgotności gruntu firmy Campbell Scientific, Inc. wykorzystywane na stacjach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 37

Rys. 3.6. Przyrząd do pomiaru strumienia ciepła w gruncie – płytki HFP01 Heat Flux Plate firmy Campbell Scientific, Inc. wykorzystywany na stacjach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 38

Rys. 3.7. Lokalizacja stacji pomiarowych stężenia radonu (Rn-222) w centralnej Polsce. 1 MSM - Miejska Stacja Meteorologiczna Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ, k/dworca kolejowego Łódź-Fabryczna, 2 Ciosny - Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ, gmina Zgierz (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*) 39

Rys. 3.8. a. Lokalizacja i otoczenie stacji pomiarowej stężenia Rn-222 w centrum Łodzi, k/dworca kolejowego Łódź-Fabryczna, u zbiegu ulic: Kilińskiego i Składowej (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*); b. Miejska Stacja Meteorologiczna Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ; c-d. Klatka meteorologiczna z komorą jonizacyjną AlphaGUARD® PQ2000PRO (fot. A. Podstawczyńska) 40

Rys. 3.9. a-b. Lokalizacja i otoczenie stacji pomiarowej stężenia Rn-222 w Ciosnach, posesja nr 7 (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*) 41

Rys. 3.10. a. Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna Katedry Hydrologii i Gospodarki Wodnej Uniwersytetu Łódzkiego w Ciosnach, gm. Zgierz; b. Komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO; c. System do rejestracji danych meteorologicznych na stacji w Ciosnach – Data Logger CR10X firmy Campbell Scientific, Inc. (fot. A. Podstawczyńska) 42

Rys. 3.11. Lokalizacja stacji pomiarowej stężenia radonu (Rn-222) w Krakowie (teren IFJ PAN). IFJ PAN – Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, ul. Radzikowskiego 152, dzielnica Bronowice (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*) 43

Rys. 3.12. Lokalizacja i otoczenie stacji pomiarowej stężenia Rn-222 w Krakowie, teren Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, przy ul. Radzikowskiego 152 (na podstawie: *www.geoportal.gov.pl*) 43

Rys. 3.13. a. Położenie stacji pomiarów stężenia Rn-222 (Radon Study Field) na terenie IFJ PAN w Krakowie; b. Fotografia stacji do pomiarów stężenia Rn-222 w IFJ PAN; c-d. Komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000PRO w klatce meteorologicznej na terenie Radon Study Field (fotografie udostępnione przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN) 44

Rys. 3.14. Średnie sezonowe stężenie Rn-222 w powietrzu glebowym na głębokości 1 m zmierzone metodą detektorów śladowych CR-39 na 5 wybranych stanowiskach pomiarowych w latach 2008–2010 47

Rys. 3.15. Rozmieszczenie punktów gridowych i odpowiadających im wartości ciśnienia na poziomie morza użytych do obliczenia wskaźników cyrkulacji atmosferycznej według Piotrowskiego (Piotrowski 2009) 55

Rys. 4.1. Przebieg stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010. Linia czarna - średnia ruchoma 24–godzinna 60

Rys. 4.2. Wykres pudełkowy dla wartości stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Ciosnach, Łodzi i Krakowie w latach 2008–2010: mediana, wartość minimalna, maksymalna, dolny i górny kwartyl 61

Rys. 4.3. Histogram częstości stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010 62

Rys. 4.4. Przebieg roczny stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem w Ciosnach, Łodzi i Krakowie w latach 2008–2010. Wykres pudełkowy: mediana, wartość minimalna, maksymalna, dolny i górny kwartyl 62

Rys. 4.5. Przebieg roczny średnich i najwyższych dobowych wartości stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem w Ciosnach, Łodzi i Krakowie w latach 2008–2010 64

Rys. 4.6. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010 66

Rys. 4.7. Skumulowane odchylenia średnich dobowych wartości stężenia Rn-222 od średniej rocznej w Ciosnach i w Łodzi w 2008 r. i 2010 r. 67

Rys. 4.8. Skumulowane odchylenia maksymalnych dobowych wartości stężenia Rn-222 od średniej rocznej w Ciosnach i w Łodzi w 2008 r. i 2010 r. 67

Rys. 4.9. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010 69

Rys. 4.10. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w poszczególnych porach roku w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010 70

Rys. 4.11. Przebieg roczny zmienności dobowej średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w 2008 r. 72

Rys. 4.12. Przebieg roczny zmienności dobowej średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w 2009 r. 73

Rys. 4.13. Przebieg roczny zmienności dobowej średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w Łodzi i Ciosnach w 2010 r. 74

Rys. 5.1. Przebieg roczny średniej dobowej temperatury powietrza i średniego dobowego stężenia Rn-222 w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 81

Rys. 5.2. Średnia miesięczna temperatura powietrza na tle średniego stężenia Rn-222 w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 83

Rys. 5.3. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniej miesięcznej temperatury powietrza w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Współczynnik korelacji rang Spearmana - r_s 83

Rys. 5.4. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 (izolinie) na tle średnich godzinnych wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w 2008 r. 84

Rys. 5.5. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 (izolinie) na tle średnich godzinnych wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w 2009 r. 85

Rys. 5.6. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 (izolinie) na tle średnich godzinnych wartości temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach 2010 r. 85

Rys. 5.7. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 87

Rys. 5.8. Stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza w Łodzi i w Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.7) 88

Rys. 5.9. A. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych w poszczególnych miesiącach - rys. 5.7); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości temperatury powietrza 89

Rys. 5.10. A. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. w latach 2008–2010 w Łodzi (zależność dla średnich przebiegów dobowych w poszczególnych miesiącach - rys. 5.7); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości temperatury powietrza 90

Rys. 5.11. Przebieg roczny średniej godzinnej różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach (szary kolor) i Łodzi (czarny kolor) w latach 2008–2009 92

Rys. 5.12. Histogram częstości średniej godzinnej różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2009 92

Rys. 5.13. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem (izolinie) w Łodzi i Ciosnach w 2008 r. 94

Rys. 5.14. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem (izolinie) w Łodzi i Ciosnach w 2009 r. 95

Rys. 5.15. Roczny przebieg średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem (izolinie) w Łodzi i Ciosnach w 2010 r. 95

Rys. 5.16. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (na podstawie średnich przebiegów dobowych - rys. 5.17 i 5.18) 98

Rys. 5.17. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 100

Rys. 5.18. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.17) 101

Rys. 5.19. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 i ciśnienie atmosferyczne w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2009 103

Rys. 5.20. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniego miesięcznego ciśnienia atmosferycznego w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Linia - wielomian 2–stopnia; r_s - współczynnik korelacji rang Spearmana 103

Rys. 5.21. Stężenie Rn-222 i prędkość wiatru w funkcji ciśnienia atmosferycznego w Ciosnach w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.). W 2009 r. brak danych o prędkości wiatru w Ciosnach 105

Rys. 5.22. Stężenie Rn-222 i prędkość wiatru w funkcji ciśnienia atmosferycznego w Łodzi w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.) 105

Rys. 5.23. Średnie najwyższe dobowe stężenie Rn-222 w przedziałach średniej dobowej prędkości wiatru w poszczególnych przedziałach średniego dobowego ciśnienia atmosferycznego w Ciosnach w latach 2008–2010. Liczby na wykresie oznaczają liczbę przypadków 106

Rys. 5.24. Maksymalne dobowe stężenie Rn-222 i ciśnienie atmosferyczne oraz średnia dobowa prędkość wiatru w Ciosnach w latach 2008–2010 108

Rys. 5.25. Maksymalne dobowe stężenie Rn-222 i ciśnienie atmosferyczne oraz średnia dobowa prędkość wiatru w Łodzi w latach 2008–2010 109

Rys. 5.26. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniej miesięcznej prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Współczynnik korelacji rang Spearmana - r_s 110

Rys. 5.27. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji prędkości wiatru w Łodzi w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.) 110

Rys. 5.28. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji prędkości wiatru w Ciosnach w latach 2008 i 2010 (dane co 1 godz.) 110

Rys. 5.29. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle prędkości wiatru 2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 112

Rys. 5.30. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji prędkości wiatru 2 m nad gruntem w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.29) 113

Rys. 5.31. Średnie godzinne stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego (izolinie, Wm^{-2}) w Łodzi i Ciosnach w 2008 r. 116

Rys. 5.32. Średnie godzinne stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego (izolinie, Wm^{-2}) w Łodzi i Ciosnach w 2009 r. 117

Rys. 5.33. Średnie godzinne stężenie Rn-222 i strumień ciepła glebowego (izolinie, Wm^{-2}) w Łodzi i Ciosnach w 2010 r. 117

Rys. 5.34. Średni miesięczny przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 118

Rys. 5.35. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Łodzi w latach 2008–2010 120

Rys. 5.36. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Ciosnach w latach 2008–2010 120

Rys. 5.37. A. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych dla poszczególnych miesięcy - rys. 5.34); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości strumienia ciepła glebowego 121

Rys. 5.38. A. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego w Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych dla poszczególnych miesięcy - rys. 5.34); B. Średnie stężenie Rn-222 dla wybranych przedziałów wartości strumienia ciepła glebowego 121

Rys. 5.39. Stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 (zależność dla średniego przebiegu dobowego - rys. 5.34) 122

Rys. 5.40. Przebieg roczny stężenia Rn-222 na tle wilgotności gruntu (*VWC*) w Ciosnach w latach 2008–2010 125

Rys. 5.41. Przebieg roczny stężenia Rn-222 na tle wilgotności gruntu (*VWC*) w Łodzi w latach 2008–2010 126

Rys. 5.42. Średnie miesięczne stężenie Rn-222 w funkcji średniej miesięcznej wilgotności gruntu (*VWC*) w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Współczynnik korelacji rang Spearmana - r_s 129

Rys. 5.43. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji wilgotności gruntu (*VWC*) w Łodzi w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.) 129

Rys. 5.44. Średnie stężenie Rn-222 w funkcji wilgotności gruntu (*VWC*) w Ciosnach w latach 2008–2010 (dane co 1 godz.) 129

Rys. 5.45. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych). I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model I) 140

Rys. 5.46. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010. I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model II) . 141

Rys. 5.47. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego (*QG*) w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych). I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model I) 141

Rys. 5.48. Średnie godzinne stężenie Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego (*QG*) w poszczególnych miesiącach w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (zależność dla średnich przebiegów dobowych). I–XII - kolejne pomiary; liniami zaznaczono regresję krzywe regresji dla kolejnych miesięcy (model II) 142

Rys. 5.49. Doświadczalne i modelowane (model I i II) wartości stężenia Rn-222 na podstawie strumienia ciepła glebowego (*QG*) i temperatury powietrza (t_{2m}) w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach) 143

Rys. 5.50. Doświadczalne i modelowane (model I i II) wartości stężenia Rn-222 na podstawie strumienia ciepła glebowego (*QG*) i temperatury powietrza (t_{2m}) w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach) 144

Rys. 5.51. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie temperatury powietrza (t_{2m}) 145

Rys. 5.52. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie temperatury powietrza (t_{2m}) 146

Rys. 5.53. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie strumienia ciepła glebowego (Q_G) 147

Rys. 5.54. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi w latach 2008–2010 - dane pomiarowe i modelowane na podstawie strumienia ciepła glebowego (Q_G) 148

Rys. 5.55. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 151

Rys. 5.56. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i temperatury powietrza w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 151

Rys. 5.57. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od temperatury powietrza i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 152

Rys. 5.58. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 152

Rys. 5.59. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od wilgotności gruntu i strumienia ciepła glebowego (*QG*) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 153

Rys. 5.60. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i wilgotności gruntu w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 153

Rys. 5.61. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i wilgotności gruntu w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 154

Rys. 5.62. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od wilgotności gruntu i temperatury powietrza w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 154

Rys. 5.63. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od prędkości wiatru i różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 155

Rys. 5.64. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od różnicy temperatury powietrza w warstwie 2 m–0,2 m i temperatury powietrza na wysokości 2 m nad gruntem w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie godzinne wartości w poszczególnych miesiącach) 155

Rys. 5.65. Doświadczalne i modelowane wartości stężenia Rn-222 na podstawie 5 zmiennych niezależnych (*QG* - strumień ciepła glebowego, t_{2m} - temperatura powietrza, *VWC* - wilgotność gruntu, *v*- prędkość wiatru, $t_{2\,m-0,2\,m}$ - różnica temperatury w warstwie 1,8 m) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie miesięczne wartości godzinne) 157

Rys. 5.66. A. Doświadczalne i modelowane godzinne stężenie Rn-222 na podstawie 5 zmiennych niezależnych, tj. strumienia ciepła glebowego (*QG*), prędkości wiatru (*v*), temperatury powietrza (t_{2m}), różnicy temperatury powietrza w warstwie 1,8 m ($t_{2\,m-0,2\,m}$), wilgotności gruntu (*VWC*) w Ciosnach w okresie 30.05.–20.06.2008 r.; B. Przebieg dobowy pomiarowych wartości stężenia Rn-222 na tle wartości modelowanych w Ciosnach w badanym okresie; d - indeks zgodności Willmotta 161

Rys. 5.67. Częstość względna oraz liczba przypadków różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach w latach 2008–2010 (A - wszystkie wartości, B - wartości maksymalne dobowe) 164

Rys. 5.68. Różnice maksymalnego dobowego stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach w latach 2008–2010 166

Rys. 5.69. Przebieg roczny zmienności dobowej różnic stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach na tle różnic temperatury powietrza między stacjami w latach 2008–2010 166

Rys. 5.70. Różnice stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją zamiejską w Ciosnach w zależności od różnicy temperatury (*t*) powietrza w latach 2008–2010 oraz różnicy prędkości wiatru (*v*) w latach 2008 i 2010 169

Rys. 5.71. Średni przebieg dobowy stężenia Rn-222, temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g., różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m i prędkości wiatru na stacjach w Łodzi i Ciosnach w dniach ze zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła w Łodzi ($t_{Łódź}$-t_{Ciosny}) > 5,0°C i > 3,0°C i w dniach z różnicami temperatury powietrza między stacjami < 1°C w latach 2008–2010 170

Rys. 5.72. A. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m n.p.g. i prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach w dniach 01–08.06.2008 r.; B. Mapa synoptyczna Met Office z dnia 02.06.2008 r. (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Kwadrat na mapie - w przybliżeniu obszar Polski .. 173

Rys. 5.73. A. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz pionowych różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m n.p.g. i prędkości wiatru w dniach 15–22.03.2009 r. na stacjach w Ciosnach i Łodzi; B. Mapa synoptyczna Met Office z dnia 18.03.2009 r. (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Kwadrat na mapie - w przybliżeniu obszar Polski. Pogoda w Polsce pod wpływem głębokich niżów z aktywnymi frontami atmosferycznymi. Silny wiatr i opady deszczu i deszczu ze śniegiem. Sztorm na Bałtyku, w centralnej Polsce silne porywy wiatru dochodzące do 20 ms^{-1} (komentarz pogodowy na podstawie Numerycznej Prognozy Pogody ICM: *http://new.meteo.pl/* i obserwacji własnych) 176

Rys. 5.74. A. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle różnic temperatury powietrza między stacjami oraz pionowych różnic temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m n.p.g. i prędkości wiatru w dniach 25.11.–02.12.2009 r. na stacjach w Ciosnach i Łodzi. B. Mapa synoptyczna Met Office z dnia 29.11.2009 r. (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Kwadrat na mapie - w przybliżeniu obszar Polski. Pogoda w Polsce pod wpływem aktywnych układów niżowych z frontami atmosferycznymi znad Atlantyku, okres zwiększonej cyrkulacji zachodniej i intensywnych opadów deszczu (komentarz pogodowy na podstawie Numerycznej Prognozy Pogody ICM: *http://new.meteo.pl/* i obserwacji własnych) 177

Rys. 6.1. Częstość względna kierunku adwekcji mas powietrza nad Polską w latach 2008–2009 187

Rys. 6.2. Częstość względna kierunku adwekcji mas powietrza nad Polską w poszczególnych porach roku w latach 2008–2009 188

Rys. 6.3. Częstość względna kierunku adwekcji mas powietrza nad Polską w poszczególnych porach roku podczas cyrkulacji antycyklonalnej (a) i cyklonalnej (c) w latach 2008–2009 188

Rys. 6.4. Średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009 189

Rys. 6.5. Wykres pudełkowy dla średnich dobowych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem na tle poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza podczas cyrkulacji antycyklonalnej (a) i cyklonalnej (c) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009 190

Rys. 6.6. Średnie dobowe stężenie Rn-222 i średnie dobowe wartości ekstremalne dla poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza podczas cyrkulacji antycyklonalnej (a) i cyklonalnej (c) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009 190

Rys. 6.7. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009 191

Rys. 6.8. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Krakowie i Ciosnach w półroczu ciepłym (IV–IX) w latach 2008–2009 192

Rys. 6.9. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza w Krakowie i Ciosnach w półroczu chłodnym (X–III) w latach 2008–2009 193

Rys. 6.10. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza podczas sytuacji cyklonalnych w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009 194

Rys. 6.11. Skumulowana roczna częstość standaryzowanych wartości stężenia radonu w trzech przedziałach (< –0,5, od –0,5 do +0,5, > +0,5) oraz średnie stężenie Rn-222 w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza podczas sytuacji antycyklonalnych w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009 195

Rys. 6.12. Średnie minimalne stężenia radonu w ciągu doby w zależności od kierunku adwekcji mas powietrza oraz cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej w Krakowie i Ciosnach w latach 2008–2009 196

Rys. 6.13. Średnie przebiegi dobowe stężenia Rn-222 dla poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza podczas cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009 200

Rys. 6.14. Średnie przebiegi dobowe stężenia Rn-222 dla kierunku adwekcji mas powietrza N, NE, E, SE podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009 201

Rys. 6.15. Średnie przebiegi dobowe stężenia Rn-222 dla kierunku adwekcji mas powietrza S, SW, W, NW podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009 202

Rys. 6.16. Trajektorie wsteczne prezentujące o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza, przed napływem do stacji Ciosny i Kraków w dniach 5 (A) i 16 (B) września 2008 r. Trajektorie wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010) 203

Rys. 6.17. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 oraz prędkości wiatru na wysokości 2 m nad gruntem na tle kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji (c - cyklonalna, a - antycyklonalna) w Ciosnach w okresie 2–19 września 2008 r. 204

Rys. 6.18. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na tle kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji (c - cyklonalna, a - antycyklonalna) w Krakowie w okresie 2–19 września 2008 r. 204

Rys. 6.19. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Łodzi w dniu 09.11.2008 r. - dzień z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 w latach 2008–2010. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Łodzi w dniach 07–09.11.2008 r. 206

Rys. 6.20. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Ciosen w dniu 31.05.2009 r. - dzień z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 w latach 2008–2010. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Ciosnach w dniach 29–31.05.2009 r. 206

Rys. 6.21. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Krakowa w dniu 08.10.2009 r. - dzień z absolutnie najwyższym godzinnym stężeniem Rn-222 w latach 2008–2010. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 w Krakowie w dniach 06–08.10.2009 r. 207

Rys. 6.22. A. Trajektoria wsteczna prezentująca o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Ciosen i Krakowa w dniu 18.03.2009 r. - okres z cyrkulacją cyklonalną z sektora NW i N i niskim stężeniem Rn-222 bez rytmu dobowego na 3 stacjach. Trajektorię wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010); B. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na stacjach w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w dniach 16–18.03.2009 r. 207

Rys. 6.23. Trajektorie wsteczne mas powietrza prezentujące o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Ciosen podczas cyrkulacji Ea i SEa w przypadkach, gdy maksimum dobowe stężenia Rn-222 stanowiło odpowiednio > 140% i > 100% średniej wartości maksymalnej stężenia Rn-222. Trajektorie wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010) 209

Rys. 6.24. Trajektorie wsteczne mas powietrza prezentujące o 72 godz. wcześniejsze położenie masy powietrza przed napływem do Krakowa podczas cyrkulacji SWa i Wa w przypadkach, gdy maksimum dobowe radonu Rn-222 stanowiło odpowiednio > 75% i > 70% średniej wartości maksymalnej Rn-222. Trajektorie wyznaczono modelem HYSPLIT 4.1, NOAA, USA dla wysokości poziomu gruntu (Draxler, Rolph, 2010) 209

Rys. 6.25. A. Emanacja - proces uwalniania Rn-222 z ziaren mineralnych do przestrzeni międzyziarnowej; B. Schemat profilu glebowego, w którym odbywa się emanacja Rn-222, transport Rn-222 drogą dyfuzji i konwekcji oraz ekshalacja Rn-222, tj. uwalnianie radonu z podłoża do atmosfery; C. Drogi wnikania Rn-222 do budynku: 1 - pęknięcia i szczeliny w podłodze, 2 - nieszczelności wynikające z konstrukcji budynku, np. szczeliny na łączeniu ścian z podłogą, 3 - pęknięcia w ścianach, 4 - nieszczelności wokół rur kanalizacyjnych (opracowanie własne) 211

Rys. 6.26. Rozkład częstości stężenia Rn-222 na parterze i na I piętrze w domu jednorodzinnym w Łodzi w okresie 06.09.–28.10.2007 r. 217

Rys. 6.27. Stężenie Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinnym w Łodzi (parter) i przed budynkiem na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (*p*) 217

Rys. 6.28. Stężenie Rn-222 w powietrzu na I piętrze domu jednorodzinnego w Łodzi na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (*p*) 218

Rys. 6.29. Przebieg dobowy stężenia Rn-222 na parterze domu jednorodzinnego w Łodzi na tle zmienności temperatury powietrza (*t*) w warunkach zewnętrznych i ciśnienia atmosferycznego (*p*) w czasie pogody antycyklonalnej w okresie 20–24.09.2007 r. 219

Rys. 6.30. Stężenie Rn-222 na parterze domu jednorodzinnego w Łodzi na tle zmienności temperatury powietrza (*t*) w warunkach zewnętrznych i ciśnienia atmosferycznego (*p*) w czasie pogody kształtowanej przez ośrodek niskiego ciśnienia z aktywnym frontem chłodnym w okresie 07–13.09.2007 r. 219

Rys. 6.31. Mapa synoptyczna Met Office dla dnia z wyraźnym dobowym przebiegiem zmienności stężenia Rn-222 wewnątrz budynku - pogoda w Polsce kształtowana przez ośrodek wysokiego ciśnienia z centrum na pograniczu Białorusi i Ukrainy (a) i dla dnia z maksymalnym stężeniem Rn-222 w budynku, 210 $Bq \cdot m^{-3}$, i brakiem dobowego cyklu zmian stężenia Rn-222 - pogoda w Polsce kształtowana przez ośrodek niskiego ciśnienia z szybko przemieszczającym się frontem atmosferycznym (b) (źródło: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*) ... 220

Rys. 6.32. Przebieg 10–minutowych wartości stężenia Rn-222 w powietrzu na wysokości 0,5 m nad gruntem (podłoże pokryte trawą) przed domem jednorodzinnym w Łodzi na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (*p*) w okresie 14–19.09. 2007 r. 221

Rys. 6.33. Zależność 10–minutowych wartości stężenia Rn-222 w domu jednorodzinnym w Łodzi od ciśnienia atmosferycznego na dwóch kondygnacjach w okresie 06.09.–28.10.2007 r. 221

Tabele

Tabela 2.1. Szereg promieniotwórczy uranu (U-238) (wg. Nazaroff i Nero 1988) 8

Tabela 2.2. Wkład procentowy źródeł Rn-222 do jego zawartości w atmosferze (wg Nevissi i Bodansky 1987) 10

Tabela 2.3. Średnie stężenie radu (Ra-226) w glebie na terenie poszczególnych województw Polski (wg *Radiologicznego Atlasu Polski* 2006) 12

Tabela 2.4. Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej (3,3 mSv) otrzymanej przez statystycznego mieszkańca Polski w 2010 r. (wg *Raportu Państwowej Agencji Atomistyki* 2011) 18

Tabela 3.1. Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w glebie na stacjach w Łodzi, Ciosnach i Krakowie 45

Tabela 3.2. Średnie sezonowe stężenie radonu (Rn-222, Bqm^{-3}) w powietrzu glebowym i w atmosferze 2 m nad gruntem w Łodzi i na terenie gminy Zgierz w latach 2008–2010 48

Tabela 4.1. Charakterystyki statystyczne rozkładów stężenia radonu (Rn-222) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie; x_a - średnia arytmetyczna w $Bq \cdot m^{-3}$, m - mediana w $Bq \cdot m^{-3}$, x_{max} - wartość maksymalna w $Bq \cdot m^{-3}$, δ - odchylenie standardowe w $Bq \cdot m^{-3}$, s_k - współczynnik skośności, p - wartości percentyli w $Bq \cdot m^{-3}$ 61

Tabela 4.2. Średnie miesięczne i średnie roczne oraz absolutnie najwyższe (Max) stężenie radonu (Rn-222) w $Bq \cdot m^{-3}$ w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2010 63

Tabela 4.3. Średnie maksymalne i minimalne wartości stężenia radonu (Rn-222) oraz średni dobowy zakres wahań (ampl.) stężenia Rn-222 w powietrzu 2 m nad gruntem w Łodzi (Ł), Ciosnach (C) i Krakowie (K) w poszczególnych porach roku w latach 2008–2010 75

Tabela 5.1. Średnia temperatura powietrza i średnie stężenie Rn-222 [$Bq \cdot m^{-3}$] na wysokości 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 80

Tabela 5.2. Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji temperatury powietrza 2 m n.p.g. w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05 86

Tabela 5.3. Wartości ekstremalne średniej godzinnej i absolutnej różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 93

Tabela 5.4. Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie danych co 1 godz.) 97

Tabela 5.5. Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m nad gruntem w Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05 99

Tabela 5.6. Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach ciśnienia atmosferycznego w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie największych dobowych wartości stężenia radonu) 104

Tabela 5.7. Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach średniej dobowej prędkości wiatru w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie najwiekszych dobowych wartości stężenia radonu) 107

Tabela 5.8. Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji prędkości wiatru w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05 114

Tabela 5.9. Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana (r_s) dla średnich godzinnych wartości stężenia Rn-222 w funkcji strumienia ciepła glebowego *QG* w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010. Podkreślenie - wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05 123

Tabela 5.10. Średnia wartość wilgotności gruntu (*VWC* w %) w poszczególnych porach roku na stacjach w Łodzi i Ciosnach w latach 2008–2010 124

Tabela 5.11. Średnie i ekstremalne wartości stężenia Rn-222 w poszczególnych przedziałach wilgotności gruntu (w %) w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010 (opracowano na podstawie największych dobowych wartości stężenia radonu) 128

Tabela 5.12. Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach). MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 132

Tabela 5.13. Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach). MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 133

Tabela 5.14. Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 134

Tabela 5.15. Współczynniki a_1, a_2, a_3 dla modelu I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 135

Tabela 5.16. Współczynniki a_1, a_2, a_3, a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 136

Tabela 5.17. Współczynniki a_1, a_2, a_3 , a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Łodzi w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach). MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 137

Tabela 5.18. Współczynniki a_1, a_2, a_3, a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 138

Tabela 5.19. Współczynniki a_1, a_2, a_3 , a_4 dla modelu II z pochodną $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ oraz statystyki dopasowania modelu do danych rejestrowanych na stacji w Ciosnach w latach 2008–2010 (do obliczeń wykorzystano średnie przebiegi dobowe w poszczególnych miesiącach), MBE - błąd systematyczny [Bq·m^{-3}], RMSE - średni błąd kwadratowy pomiaru [Bq·m^{-3}], MAE - średni błąd bezwzględny [Bq·m^{-3}], d - indeks zgodności Willmotta (Willmott 1981) 139

Tabela 5.20. Parametry modelu regresji wielokrotnej (estymacja funkcją eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ obliczone na podstawie średnich miesięcznych wartości godzinnych w Ciosnach i Łodzi w latach 2008–2010. Kursywą zaznaczono błędy standardowe estymacji 156

Tabela 5.21. Indeks zgodności Willmotta dla wybranych modeli regresji w oparciu o funkcję eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ w Łodzi i Ciosnach. Opracowano na podstawie średnich miesięcznych wartości godzinnych 158

Tabela 5.22. Parametry modelu regresji wielokrotnej (estymacja funkcją eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ obliczone na podstawie godzinnych danych w Ciosnach w okresie 30.05.–20.06.2008 r. Kursywą zaznaczono błędy standardowe estymacji 159

Tabela 5.23. Indeks zgodności Willmotta dla wybranych modeli regresji w oparciu o funkcję eksponencjalną typu $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ w Ciosnach w okresie 30.05.–20.06.2008 r. Opracowano na podstawie danych co 1 godz. 160

Tabela 5.24. Częstość względna różnic stężenia Rn-222 ≤ –10 Bq·m^{-3} między Łodzią a stacją w Ciosnach w poszczególnych miesiącach w latach 2008–2010 (a); absolutne maksimum godzinnych różnic stężenia Rn-222 między Łodzią a stacją w Ciosnach (b) 165

Tabela 5.25. Częstość względna kierunków wiatru geostroficznego podczas cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej w dniach z różnicą stężenia Rn-222 ≤ –10 Bq·m^{-3} między Łodzią a stacją w Ciosnach w latach 2008–2010 167

Tabela 5.26. Średnia dobowa wartość stężenia Rn-222, temperatury powietrza (t_{2m}), prędkości wiatru (v), wilgotności względnej (f), ciśnienia atmosferycznego (p) oraz amplitudy dobowej temperatury powietrza (t_{ampl_doba}) i zakresu wahań dobowych stężenia Rn-222 ($Rn\text{-}222_{ampl}$) oraz różnicy temperatury powietrza w warstwie 2,0 m–0,2 m ($t_{2,0\,m-0,2\,m\,ampl}$) w Ciosnach (C) i Łodzi (Ł) w latach 2008–2010 w dniach z różnicą temperatury powietrza między stacjami > 5°C, > 3°C i < 1°C 171

Tabela 6.1. Udział pogody cyklonalnej i antycyklonalnej (w %) w Polsce w latach 2008–2009 187

Tabela 6.2. Stosunek częstości wysokich wartości stężenia Rn-222 do wartości niskich dla poszczególnych kierunków adwekcji podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Ciosnach i Krakowie w 2008 r. i 2009 r. (do wysokich wartości zaliczono stężenia > 25% średniej maksymalnej dobowej wartości, a do niskich stężeń zaklasyfikowano wartości < 25% przyjętej wartości). Podkreślenie - wartości skrajne 197

Tabela 6.3. Najwyższe i najniższe stężenie Rn-222 w średnim przebiegu dobowym oraz średni dobowy zakres wahań (ampl.) stężenia radonu (Rn-222) w powietrzu 2 m nad gruntem dla poszczególnych kierunków wiatru geostroficznego podczas cyrkulacji cyklonalnej (c) i antycyklonalnej (a) w Łodzi, Ciosnach i Krakowie w latach 2008–2009. Podkreślenie - wartości skrajne 199

LIST OF FIGURES AND TABLES

Figures

Fig. 3.1. AlphaGUARD® PQ2000PRO device in the Rocky Garden of Collegium Geographicum of Faculty of Geographical Sciences, University of Łódź (photo by A. Podstawczyńska) 32

Fig. 3.2. Scheme of ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO by Genitron Instruments GmbH (based on: Genitron Instruments GmbH 1998) 33

Fig. 3.3. a. AlphaGUARD® PQ2000PRO device in configuration of the computer during data transmission, the station Ciosny; b. System of instantaneous measurements of Rn-222 concentrations in soil air - ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO, a soil probe RS-1, the pump AlphaPUMP - used in the measurement session at the Municipal Meteorological Station (MSM) in the city centre on 19th February 2008 (photo by A. Podstawczyńska) 35

Fig. 3.4. Construction of a trace detector CR-39 used for the measurements of seasonal Rn-222 concentration in soil: a. Diffuse chamber with etched-track detector foil CR-39; b. Scheme of construction of diffuse chamber with etched-track detector i.e. foil CR-39; c. Microscopic image of alpha particle tracks from Rn-222 decay on foil CR-39 (polycarbonate) after etching (own elaboration based on material from Laboratory of Radiometric Expertise Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences in Kraków) 36

Fig. 3.5. Meteorological data logger CR10X; CS616 reflectometer to measure soil moisture Campbell Scientific, Inc. used in Ciosny and Łódź stations in 2008–2010 37

Fig. 3.6. Instrument to measure the heat flux in the soil – shallow HFP01 Plate Heat Flux Campbell Scientific, Inc. used in Ciosny and Łódź stations in 2008–2010 38

Fig. 3.7. Location of radon (Rn-222) concentration measuring stations in central Poland. 1 MSM - Municipal Meteorological Station of Department of Meteorology and Climatology, University of Łódź, near Łodź-Fabryczna railway station, 2 Ciosny - Hydrological and Meteorological Station of Department of Hydrology and Water Management, University of Łódź, Zgierz community (based on: *www.geoportal.gov.pl*) 39

Fig. 3.8. a. Location and surroundings of radon (Rn-222) concentration measuring stations in the centre of Łódź, near Łódź-Fabryczna raylway station, at the intersection of Kilińskiego and Skladowa streets (based on: www.geoportal.gov.pl); b. Municipal Meteorological Station of Department of Meteorology and Climatology, University of Łódź; c-d. Meteorological box with automatic ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO (photo by A. Podstawczyńska) 40

Fig. 3.9. a-b. Location and surroundings of radon (Rn-222) concentration measuring stations in Ciosny, premises No. 7 (based on: *www.geoportal.gov.pl*) 41

Fig. 3.10. a. Hydrological and Meteorological Station of Department of Hydrology and Water Management, University of Łódź in Ciosny, Zgierz community; b. Ionizatiom chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO; c. Meteorological data recording system at the station in Ciosnach - Data Logger CR10X Campbell Scientific, Inc. (photo by A. Podstawczyńska) 42

Fig. 3.11. Location of radon (Rn-222) concentration measuring stations in Kraków (area of IFJ PAN). IFJ PAN - Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences), 152 Radzikowskiego Avenue, Bronowice district (based on: *www.geoportal.gov.pl*) 43

Fig. 3.12. Location and surroundings of radon (Rn-222) concentration measuring stations in Kraków, area of Henryk Niewodniczański Institite of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences, 152 Radzikowskiego Avenue (based on: *www.geoportal.gov.pl*) 43

Fig. 3.13. a. Location of radon (Rn-222) concentration measuring stations (Radon Study Field) within area of Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences in Kraków; b. Photo of the radon (Rn-222) concentration measuring stations in the IFJ PAN c-d. Ionization chamber AlphaGUARD® PQ2000PRO in the meteorological box within Radon Field Study (photographs provided by the Laboratory of Radiometric Expertise IFJ PAN) 44

Fig. 3.14. Average seasonal concentration of Rn-222 in soil at a depth of 1 m measured by trace detectors CR-39 for 5 selected measuring stations in 2008–2010 47

Fig. 3.15. Location of grid points and corresponding air pressure values at sea level used to calculate the indicators of the atmospheric circulation by Piotrowski (Piotrowski 2009) 55

Fig. 4.1. Course of radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above the ground in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010. Black line - moving average 24–hour . 60

Fig. 4.2. Chart box of Rn-222 concentration values in the air 2 m above ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010: median, minimum, maximum, lower and upper quartile 61

Fig. 4.3. Distribution of Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010 62

Fig. 4.4. Annual course of radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010. Chart box: median, minimum, maximum, lower and upper quartile 62

Fig. 4.5. Annual course of average and the highest daily radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above the ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010 64

Fig. 4.6. Average monthly Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground in Ciosny, Łódź and Kraków in 2008–2010 66

Fig. 4.7. Cumulative deviation of average daily Rn-222 concentration from average annual Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008 and 2010 67

Fig. 4.8. Cumulative deviation of maximal daily Rn-222 concentration from average annual Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008 and 2010 67

Fig. 4.9. Average course of daily Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010 69

Fig. 4.10. Average course of daily Rn-222 concentration in different seasons of the year in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010 70

Fig. 4.11. Annual course of daily variability of mean hourly Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008 72

Fig. 4.12. Annual course of daily variability of mean hourly Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in 2009 73

Fig. 4.13. Annual course of daily variability of mean hourly Rn-222 concentration in Łódź and, Ciosny in 2010 73

Fig. 5.1. Annual course of average daily air temperature and average daily Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008–2010 81

Fig. 5.2. Average monthly air temperature on the background of avarage Rn-222 concentration in Ciosny and Łódź in 2008–2010 83

Fig. 5.3. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly air temperature in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Spearman's rank correlation coefficient - r_s 83

Fig. 5.4. Annual course of average hourly Rn-222 concentration (isolines) on the background of the average hourly air temperature at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008 84

Fig. 5.5. Annual course of average hourly Rn-222 concentration (isolines) on the background of the average hourly air temperature at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2009 85

Fig. 5.6. Annual course of average hourly Rn-222 concentration (isolines) on the background of the average hourly air temperature at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2010 85

Fig. 5.7. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature at a height of 2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 87

Fig. 5.8. Rn-222 concentration as a function of the air temperature in Łódź and Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.7) 88

Fig. 5.9. A. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature at a height of 2 m above the ground in Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.7); B. Average Rn-222 concentration for the selected air temperature range values 89

Fig. 5.10. A. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature at a height of 2 m above the ground in Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily course - Fig. 5.7); B. Average Rn-222 concentration for the selected air temperature range values 90

Fig. 5.11. Annual course of average hourly air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny (gray color) and Łódź (black color) in 2008–2009 92

Fig. 5.12. Distribution of average hourly air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny and Łódź in 2008–2009 92

Fig. 5.13. Annual course of average hourly Rn-222 concentration on the background of difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground (isolines) in Łódź and Ciosny in 2008 94

Fig. 5.14. Annual course of average hourly Rn-222 concentration on the background of difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground (isolines) in Łódź and Ciosny in 2009 95

Fig. 5.15. Annual course of average hourly Rn-222 concentration on the background of difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground (isolines) in Łódź and Ciosny in 2010 95

Fig. 5.16. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (based on the average daily courses - Fig. 5.17 and 5.18) 98

Fig. 5.17. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 100

Fig. 5.18. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (the dependence of the average daily course - Fig. 5.17) 101

Fig. 5.19. Average monthly Rn-222 concentration and atmospheric pressure in Ciosny and Łódź in 2008–2009 103

Fig. 5.20. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly atmospheric pressure in Łódź and Ciosny in 2008-2010. Line - 2–degree polynomial, r_s - Spearman's rank correlation coefficient 103

Fig. 5.21. Rn-222 concentration and wind speed as a function of atmospheric pressure in Ciosny in 2008–2010 (data at 1 hr.). In 2009, the lack of data on wind speed in Ciosny 105

Fig. 5.22. Rn-222 concentration and wind speed as a function of atmospheric pressure in Łódź in 2008–2010 (data at 1 hr.) 105

Fig. 5.23. Average maximal daily Rn-222 concentration in intervals of average daily wind speed in each interval of average daily atmospheric pressure in Ciosny in 2008–2010. The numbers on the graph indicate the number of cases 106

Fig. 5.24. Maximum daily Rn-222 concentration and atmospheric pressure and average daily wind speed in Ciosny in 2008–2010 108

Fig. 5.25. Maximum daily Rn-222 concentration and atmospheric pressure and average daily wind speed in Łódź in 2008–2010 109

Fig. 5.26. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly wind speed in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Spearman's rank correlation coefficient - r_s 110

Fig. 5.27. Average Rn-222 concentration as a function of wind speed in Łódź in 2008–2010 (data every 1 hr.) 110

Fig. 5.28. Average Rn-222 concentration as a function of wind speed in Ciosny in 2008 and 2010 (data every 1 hr.) 110

Fig. 5.29. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of wind speed of 2 m above the ground in Ciosny and Łódź in 2008–2010 112

Fig. 5.30. Average Rn-222 concentration as a function of wind speed of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in the years 2008–2010 (dependence of average daily cource - Fig. 5.29) 113

Fig. 5.31. Average hourly Rn-222 concentration and soil heat flux (isolines, Wm^{-2}) in Łódź and Ciosny in 2008 116

Fig. 5.32. Average hourly Rn-222 concentration and soil heat flux (isolines, Wm^{-2}) in Łódź and Ciosny in 2009 117

Fig. 5.33. Average hourly Rn-222 concentration and soil heat flux (isolines, Wm^{-2}) in Łódź and Ciosny in 2010 117

Fig. 5.34. Average monthly of daily course of Rn-222 concentration on the background of soil heat flux (*QG*) in Łódź and Ciosny in 2008–2010 118

Fig. 5.35. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Łódź in 2008–2010 120

Fig. 5.36. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Ciosny in 2008–2010 120

Fig. 5.37. A. Average Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Ciosny 2008–2010 (correlation for average daily runs for each month - Fig. 5.34); B. Mean concentration of Rn-222 for selected intervals of soil heat flux 121

Fig. 5.38. A. Average Rn-222 concentration as a function of soil heat flux in Łódź 2008–2010 (correlation for average daily runs for each month - Fig. 5.34); B. Mean concentration of Rn-222 for selected intervals of soil heat flux 121

Fig. 5.39. Rn-222 concentration as a function of soil heat flux (*QG*) in Łódź and Ciosny in 2008–2010 (dependence of average daily courses - Fig. 5.34) 122

Fig. 5.40. Annual course of Rn-222 concentration on the background of soil moisture (*VWC*) in Ciosny in 2008–2010 125

Fig. 5.41. Annual course of Rn-222 concentration on the background of soil moisture (*VWC*) in Łódź in 2008–2010 126

Fig. 5.42. Average monthly Rn-222 concentration as a function of average monthly soil moisture (*VWC*) in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Spearman's rank correlation coefficient - r_s 129

Fig. 5.43. Average Rn-222 concentration as a function of soil moisture (*VWC*) in Łódź in 2008–2010 (data every 1 hr.) 129

Fig. 5.44. Average Rn-222 concentration as a function of soil moisture (*VWC*) in Ciosny in 2008–2010 (data every 1 hr.) 129

Fig. 5.45. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature for each month in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements; the lines marked regression curves for consecutive months (model I) 140

Fig. 5.46. Average hourly Rn-222 concentration as a function of the air temperature for each month in Ciosny and Łódź in 2008-2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements; the lines marked regression curves for consecutive months (model II) 141

Fig. 5.47. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux (*QG*) for each month in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements; the lines marked regression curves for consecutive months (model I) 141

Fig. 5.48. Average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux (*QG*) for each month in Ciosny and Łódź in 2008-2010 (dependence of average daily courses). I–XII - consecutive measurements, the lines marked regression curves for consecutive months (model II) 142

Fig. 5.49. Experimental and modeled (model I and II) of Rn-222 concentration from soil heat flux (*QG*) and air temperature (t_{2m}) in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month) 143

Fig. 5.50. Experimental and modeled (model I and II) of Rn-222 concentration from soil heat flux (*QG*) and air temperature (t_{2m}) in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month) 144

Fig. 5.51. Average daily course of Rn-222 concentration in Ciosny in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of the air temperature (t_{2m}) 145

Fig. 5.52. Average daily course of Rn-222 concentration in Łódź in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of the air temperature (t_{2m}) 146

Fig. 5.53. Average daily course of Rn-222 concentration in Ciosny in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of soil heat flux (Q_G) 147

Fig. 5.54. Average daily course of Rn-222 concentration in Łódź in 2008–2010 - the measured and modeled data on the basis of soil heat flux (Q_G) 148

Fig. 5.55. Average Rn-222 concentration depending on the wind speed and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 151

Fig. 5.56. Average Rn-222 concentration depending on wind speed and air temperature in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 151

Fig. 5.57. Average Rn-222 concentration depending on air temperature and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 152

Fig. 5.58. Average Rn-222 concentration depending on the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 152

Fig. 5.59. Average Rn-222 concentration depending on soil moisture and soil heat flux (*QG*) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 153

Fig. 5.60. Average Rn-222 concentration depending on the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and soil moisture in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 153

Fig. 5.61. Average Rn-222 concentration depending on the wind speed and soil moisture in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 154

Fig. 5.62. Average Rn-222 concentration depending on soil moisture and air temperature in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 154

Fig. 5.63. Average Rn-222 concentration depending on the wind speed and the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 155

Fig. 5.64. Average Rn-222 concentration depending on the difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and air temperature in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 155

Fig. 5.65. Experimental and modeled values of Rn-222 concentration from 5 independent variables (*QG* - soil heat flux, t_{2m} - air temperature, *VWC* - soil moisture, *v*-wind speed, $t_{2\,m-0,2\,m}$ - difference of temperature in the layer 1.8 m) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (average hourly values of each month were used for computations) 157

Fig. 5.66. A. Experimental and modeled hourly Rn-222 concentration on the basis of five independent variables, that is the soil heat flux (*QG*), wind speed (*v*), air temperature (t_{2m}), the difference in air temperature in the layer 1.8 m ($t_{2\,m-0,2\,m}$), soil moisture (*VWC*) in the period 30th May–20th June 2008 in Ciosny; B. Daily course of experimental Rn-222 concentration on the background of modeled values in Ciosny in the analysed period; d - the index of agreement by Willmott 161

Fig. 5.67. Relative frequency and the number of cases of Rn-222 concentration differences between Łódź and Ciosny stations in 2008–2010 (A - all values, B - maximum daily values) 164

Fig. 5.68. Differences in daily maximum of Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground between the centre of Łódź and the rural station in Ciosny in 2008–2010 166

Fig. 5.69. Annual course of daily variability of Rn-222 concentration differences in the air 2 m above the ground between the centre of Łódź and the rural station in Ciosny on the background of the air temperature differences between the stations in 2008–2010 166

Fig. 5.70. Differences in Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground between the centre of Łódź and rural station in Ciosny depending on the air temperature difference (*t*) in 2008–2010 and wind speed difference (*v*) in the years 2008 and 2010 169

Fig. 5.71. Average daily course of Rn-222 concentration, the air temperature at 2 m above the ground, difference in the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m and wind speed at stations in Łódź and Ciosny in the days with the urban heat island phenomenon in Łódź ($t_{Łódź}$-t_{Ciosny}) > 5.0°C and > 3.0°C and in the days of the air temperature differences between stations < 1°C in 2008–2010 170

Fig. 5.72. A. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences between stations and the air temperature differences in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground and wind speed in Łódź and Ciosny in the period 1st–8th June 2008; B. Met Office synoptic map of 6th February 2008 (Source: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Square on the map - aproximation of Poland area 173

Fig. 5.73. A. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences between stations and the air temperature differences in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground and wind speed in Łódź and Ciosny in the period 15th–22nd March 2009; B. Met Office synoptic map of 18th March 2009 (Source: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Square on the map - aproximation of Poland area. Weather in Poland under the influence of deep low pressure systems with active weather fronts. Strong wind, rain and sleet. The storm on the Baltic Sea, in central Poland, strong gusts of wind of up to 20 ms^{-1} (based on the weather comment Numerical Weather Forecast ICM: *http://new.meteo.pl/* and own observations) 176

Fig. 5.74. Daily course of Rn-222 concentration on the background of the air temperature differences between stations and the air temperature differences in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground and wind speed in Łódź and Ciosny in the period 25th November–2nd December 2009; B. Met Office synoptic map of 25th November 2009 (Source: *http://www.wetterzentrale.de/topkarten*). Square on the map - aproximation of Poland area. Weather in Poland under the influence of low pressure systems with active weather fronts from the Atlantic, a period of enhanced western circulation and heavy rain (weather commentary from Numerical Weather Forecast ICM: *http://new.meteo.pl/* and own observations) 177

Fig. 6.1. Relative frequency of direction advection of the air masses in Poland in 2008–2009 187

Fig. 6.2. Relative frequency of the air masses advection directions in Poland in different seasons of the year in 2008–2009 188

Fig. 6.3. Relative frequency of the air masses advection directions in Poland in different seasons of the year during antycyclonic and cyclonic circulation in 2008–2009 ... 188

Fig. 6.4. Average Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2009 189

Fig. 6.5. Box-chart for average daily Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground on the background of each air masses advection directions during anticyclonic (a) and cyclonic (c) circulation in Łódź, Ciosny and and Kraków in 2008–2009 190

Fig. 6.6. Average daily Rn-222 concentration and average daily extreme values for each air masses advection directions during anticyclonic (a) and cyclonic (c) circulation in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2009 190

Fig. 6.7. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in Kraków and Ciosny in 2008–2009 191

Fig. 6.8. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in the warm half-year (April–September) in Kraków and Ciosny in 2008–2009 192

Fig. 6.9. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on the air masses advection directions in the cold half-year (X–III) in Kraków and Ciosny in 2008–2009 193

Fig. 6.10. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on advection directions during cyclonic circulation in Kraków and Ciosny in 2008–2009 194

Fig. 6.11. Cumulative annual frequency of standardized values of radon concentration in three intervals (< –0.5, from –0.5 to +0.5, > +0.5) and mean Rn-222 concentration depending on advection directions during anticyclonic circulation in Kraków and Ciosny in 2008–2009 195

Fig. 6.12. Daily average minimum of radon concentration depending on the air masses advection directions and cyclonic and antycyclonic circulation in Kraków and Ciosny in 2008–2009 196

Fig. 6.13. Average daily course of Rn-222 concentration for each air masses advection directions during cyclonic and anticyclonic circulation in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2009 200

Fig. 6.14. Average daily course of Rn-222 concentration for the air masses advection directions N, NE, E, SE during cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Ciosny and Kraków in 2008–2009 201

Fig. 6.15. Average daily course of Rn-222 concentration for the air masses advection directions S, SW, W, NW during cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Ciosny and Kraków in 2008–2009 202

Fig. 6.16. Backward trajectories presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny station and Kraków on 5th (A) and 16th (B) September 2008. Trajectories were determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010) 203

Fig. 6.17. Daily course of Rn-222 concentration and wind speed at a height of 2 m above the ground on the background direction of advection and circulation type (c - cyclonic and a - anticyclonic) in Ciosny in the period 2nd–19th September 2008 .. 204

Fig. 6.18. Daily course of Rn-222 concentration on the background direction of advection and circulation type (c - cyclonic and a - anticyclonic) in Kraków in the period 2–19 September 2008 204

Fig. 6.19. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Łódź on 9th November 2008 - day with the highest absolute hourly Rn-222 concentration in 2008–2010. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. Daily course of Rn-222 concentration in Łódź in the period 7th–9th November 2008 206

Fig. 6.20. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny on 31st May 2009 - day with the highest absolute hourly Rn-222 concentration in 2008–2010. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. Daily course of Rn-222 concentration in Ciosny in the period 29th–31st May 2009 206

Fig. 6.21. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Kraków on 8th October 2009 - day with the highest absolute hourly Rn-222 concentration in 2008–2010. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. The daily course of Rn-222 concentration in Kraków in the period 6th–8th October 2009 207

Fig. 6.22. A. Backward trajectory presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny and Kraków on 18th March 2009 - period of cyclonic circulation in the sector S and N, and low Rn-222 concentration without a daily rhythm for 3 stations. Trajectory was determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010); B. Daily course of Rn-222 concentration in Łódź, Ciosny and Kraków in the period 16th–18th March 2009 207

Fig. 6.23. Backward trajectories presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Ciosny during the circulation of Ea and SEa, where maximum daily Rn-222 concentration constituted > 140% and > 100% of maximum value of Rn-222 concentration. Trajectories were determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010) . 209

Fig. 6.24. Backward trajectories presenting the previous position from 72 hours of the air mass before inflow to Kraków during the circulation of SWa and Wa, where maximum daily Rn-222 concentration constituted > 75% and > 70% of maximum value of Rn-222 concentration. Trajectories were determined by HYSPLIT model 4.1, NOAA, USA for the ground level (Draxler, Rolph, 2010) . 209

Fig. 6.25. A. Emanation - process of release of Rn-222 from mineral grains to intergranular space B. Soil profile scheme in which emanation of Rn-222 occurs, Rn-222 transport by diffusion and convection, and Rn-222 exhalation, ie. release radon from the substrate to the atmosphere; C. Routes of Rn-222 penetrating the building: 1 - cracks and fissures in the floor, 2 - leaks resulting from the construction of the building such as the walls of the slot to connect to the floor, 3 - cracks in the walls, 4 - leakage around pipes (own elaboration) 211

Fig. 6.26. Frequency distribution of Rn-222 concentration on the ground floor and the first floor of a single family house in Łódź in the period 6th September–28th October 2007 217

Fig. 6.27. Rn-222 concentration in the air in a single family house in Łódź (ground floor) and in the front of the house, in the background of atmospheric pressure variability (*p*) 217

Fig. 6.28. Rn-222 concentration in the air on the first floor in a single family house in Łódź in the background of atmospheric pressure variability (*p*) 218

Fig. 6.29. Daily course of Rn-222 concentration on the ground floor in a single family house in Łódź in the background of the air temperature variability (*t*) in the external environment and atmospheric pressure (*p*) during anticyclonic weather in the period 20th–24th September 2007 219

Fig. 6.30. Rn-222 concentration on the ground floor in a single family house in Łódź in the background of variability of the air temperature (*t*) in the external environment and atmospheric pressure (*p*) during the weather affected by low-pressure system with an active cold front in the period 7th–13rd September 2007 219

Fig. 6.31. Met Office synoptic chart for the day with a clear diurnal course of Rn-222 concentration variation inside the building - weather in Poland formed by the centre of a high-pressure system on the border between Belarus and Ukraine (a) and for the day, with maximum Rn-222 concentration in the house, 210 $Bq \cdot m^{-3}$, and the lack of diurnal rhytm of Rn-222 concentration -weather in Poland affected by a low pressure system with fast moving atmospheric fronts (b) (source: *http:// www.wetterzentrale.de / topkarten*) 220

Fig. 6.32. Course of 10–min. values of Rn-222 concentration in the air at a height of 0.5 m above the ground (soil covered with grass) in front of a single family house in Łódź in the background of atmospheric pressure variability (*p*) in the period 14th–19th September 2007 221

Fig. 6.33. Relationship 10–min. values of Rn-222 concentration in a single family home in Łódź and the atmospheric pressure on two floors in the period 6th September–28th October 2007 221

Tables

Table 2.1. Radioactive uranium series (U-238) (by Nazaroff and Nero 1988) 8

Table 2.2. Percentage contribution of Rn-222 sources to its content in the atmosphere (by Nevissi and Bodansky 1987) 10

Table 2.3. Average concentration of radium (Ra-226) in the soil in various Polish regions (by *Radiation Atlas of Poland* 2006) 12

Table 2.4. Share of different sources of ionizing radiation in average per-capita annual effective dose (3.3 mSv) received by the Polish in 2010 (according to the National Atomic Energy Agency Report 2011) 18

Table 3.1. Content of natural radioactive isotopes in soil on Łódź, Ciosny and Kraków stations 45

Table 3.2. Average seasonal concentration of radon (Rn-222, Bqm^{-3}) in the soil air and in the atmosphere of 2 m above the ground in Łódź and in the area of Zgierz community in 2008–2010 48

Table 4.1. Statistical characterization of radon (Rn-222) concentration distributions in Łódź, Ciosny and Kraków; x_a - arithmetic mean in $Bq \cdot m^{-3}$, m - median in $Bq \cdot m^{-3}$, x_{max} - the maximal value in $Bq \cdot m^{-3}$, δ - standard deviation in $Bq \cdot m^{-3}$, s_k - coefficient of skewness, p - values of percentiles in $Bq \cdot m^{-3}$ 61

Table 4.2. Monthly and annual average, and absolute maximal (Max) radon (Rn-222) concentration in $Bq \cdot m^{-3}$ in the air 2 m above the ground in Łódź, Ciosny and Kraków in 2008–2010 63

Table 4.3. Average maximum and minimum values of radon (Rn-222) concentration and average of daily fluctuation range (ampl.) of Rn-222 concentration in the air 2 m above the ground in Łódź (Ł), Ciosny (C) and Kraków (K) in different seasons of the year in 2008–2010 74

Table 5.1. Average air temperature and average Rn-222 concentration at a height of 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008–2010 80

Table 5.2. Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for average hourly Rn-222 concentrations as a function of the air temperature 2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level 86

Table 5.3. Extreme values of average hourly difference and absolute difference of the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Łódź and Ciosny in 2008–2010 93

Table 5.4. Mean and extreme values of Rn-222 concentration in different ranges of difference of the air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (based on data at 1 hr.) 97

Table 5.5. Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for average hourly n-222 concentration as a function of the air temperature difference in the layer 2.0 m–0.2 m above the ground in Ciosny in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level 99

Table 5.6. Mean and extreme values of Rn-222 concentration in different ranges of atmospheric pressure in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (prepared on the basis of daily maximal radon concentration) 104

Table 5.7. Mean and extreme Rn-222 concentration in different ranges of average daily wind speed in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (prepared on the basis of maximal daily radon concentration) 107

Table 5.8. Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for hourly average Rn-222 concentrations as a function of wind speed in Łódź and Ciosny in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level 114

Table 5.9. Values of Spearman's rank correlation coefficient (r_s) for average hourly Rn-222 concentration as a function of soil heat flux *QG* in Ciosny and Łódź in 2008–2010. Underline - values statistically significant at 0.05 level 123

Table 5.10. Average value of soil moisture (volumetric water content, *VWC*, in %) in different seasons at stations in Łódź and Ciosny in 2008–2010 124

Table 5.11. Mean and extreme values of Rn-222 concentration in different ranges soil moisture (in %) in Ciosny and Łódź in 2008–2010 (prepared on the basis of maximal daily values of radon concentration) 128

Table 5.12. Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 132

Table 5.13. Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 133

Table 5.14. Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G)+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 134

Table 5.15. Coefficients a_1, a_2, a_3 for the model I $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m})+a_3$ and fit statistics for data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 135

Table 5.16. Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ and fit statistics for the data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 136

Table 5.17. Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ and fit statistics for data recorded at the station in Łódź in 2008–2010 (calculations were based on average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 137

Table 5.18. Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot Q_G) + a_3 + a_4 \cdot \partial Q_G/\partial t$ and fit statistics for the data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 138

Table 5.19. Coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 for the model II with the derivative $Rn = a_1 \cdot exp\ (a_2 \cdot t_{2m}) + a_3 + a_4 \cdot \partial\ t_{2m}/\partial t$ and fit statistics for the data recorded at the station in Ciosny in 2008–2010 (calculations were based on the average daily course of each month). MBE - mean bias error [Bq·m^{-3}], RMSE - root mean square error of measurement [Bq·m^{-3}], MAE - mean absolute error [Bq·m^{-3}], d - the index of agreement by Willmott (Willmott 1981) 139

Table 5.20. Multiple regression model parameters (exponential function estimation $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ based on an monthly average hourly values in Ciosny and Łódź in 2008–2010. Italics - standard errors of estimation 156

Table 5.21. Willmott agreement index for selected regression models based on the exponential function $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ in Łódź and Ciosny. Prepared on the basis of monthly average hourly values 158

Table 5.22. Multiple regression model parameters (exponential function estimation $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ based on an hourly data in Ciosny in the period 30th May–20th June 2008. Italics - standard errors of estimation 159

Table 5.23. Willmott agreement index for selected regression models based on the exponential function $Rn = a_1 + \exp(a_2 + a_3 \cdot Qg + a_4 \cdot t_{2m} + a_5 \cdot t_{2\,m-0,2\,m} + a_6 \cdot v + a_7 \cdot vwc)$ in Ciosny in the period 30th May–20th June 2008. Prepared on the basis of the data at 1 hr. 160

Table 5.24. Relative frequency of Rn-222 concentration differences ≤ –10·Bq m^{-3} between Łódź and Ciosny stations in each month in 2008–2010 (a); absolute maximum hourly Rn-222 concentration differences between Łódź and Ciosny stations (b) 165

Table 5.25. Relative frequency of geostrophic wind directions during anticyclonic and cyklonic circulation in the days with difference in Rn-222 concentration ≤ –10 Bq·m^{-3} between Łódź and Ciosny stations in 2008–2010 167

Table 5.26. Average daily value of Rn-222 concentration, air temperature (t_{2m}), wind speed (v), relative humidity (f), atmospheric pressure (p) and the amplitude of the daily air temperature (t_{ampl_doba}) and range of daily variation of Rn-222 concentration ($Rn\text{-}222_{ampl}$) and difference in air temperature in the layer 2.0 m–0.2 m ($t_{2,0\,m-0,2\,m\,ampl}$) in Ciosny (C) and Łódź (L) in 2008–2010 in the days with difference of the air temperature between stations > 5°C, > 3°C and < 1°C 171

Table 6.1. Percentage of cyclonic nad antycyclonic weathers (in %) in Poland in 2008–2009 187

Table 6.2. Ratio of frequency of high Rn-222 concentration to a low value for each direction of advection in cyclonic (c) and anticyclonic (a) circulation in Ciosny and Kraków in 2008 and 2009 (to high values include the concentration > 25% of the average maximum daily value, and concentration of < 25% of the assumed value are classified into low).Underline - extreme values 187

Table 6.3. The highest and lowest Rn-222 concentration in the average daily course and the average daily range of fluctuation (ampl.) of radon (Rn-222) concentration in the air 2 m above the ground for each geostrophic wind directions during cyclonic (c) anticyclonic (a) circulation in Łódź Ciosny and Kraków in 2008–2009. Underline - extreme values 199

SUMMARY

METEOROLOGICAL FACTORS OF RADON CONCENTRATION IN THE NEAR GROUND AIR LAYER IN AN URBAN AND RURAL ENVIRONMENT

Daily and annual dynamics of Rn-222 concentration in near ground air layer are presented in this work. The research area comprised centre of Łódź, outskirts of Kraków (Kraków-Bronowice) and rural area in Ciosny (25 km north of Łódź) and the temporal scope of the analysis covered the period: 2008–2010. Together with Rn-222 concentration in central Poland microclimatic conditions were characterised via air temperature measurements at 2 m a.g.l., air temperature difference in the layer 0.2 m–2.0 m a.g.l., wind speed, atmospheric pressure and soil heat flux and soil humidity. Long synchronous series of data of Rn-222 concentration in the air and meteorological elements are not common in Poland. Analysed series from above mentioned locations allowed the investigation of temporal variability of this radionuclide in the near ground air layer. The synchronous measurements of Rn-222 concentration in Łódź (urban station), Ciosny (rural station) and Kraków (suburban station) were made using one AlphaGUARD® PQ2000PRO per one measurement point (ionization chamber, diffusion mode, Genitron Instruments GmbH). The device was set up in a meteorological box at a height of 2 m above the ground.

Average Rn-222 concentration at investigated stations recorded in the period 2008–2010 are representative for continental areas i.e. 4.8 $Bq \cdot m^{-3}$ (Łódź), 5.8 $Bq \cdot m^{-3}$ (Ciosny) and 10.0 $Bq \cdot m^{-3}$ (Kraków). The lowest monthly average concentration at all stations occur in march which correlates with the increase of wind speed resulting from regional atmosphere circulation due to the cyclonic activity in this season of the year. In Kraków the highest average concentration of this radionuclide occurs during autumn whereas in Łódź in autumn and winter. At Ciosny station two maxima of Rn-222 concentration level are recorded during the annual cycle - primary in summer and secondary in the autumn or winter.

The lowest range of daily variability of Rn-222 concentration in the air is characteristic for the downtown of Łódź. The maximum is recorded in the morning whereas minimum in the afternoon. Average annual ratio of the daily

maximum to minimum Rn-222 concentration recorded at 2 m a.g.l. in Łódź is 1.3, whereas in Ciosny and Kraków this ratio equals 1.8.

In central Poland from January till March there is no apparent daily cycle of Rn-222 concentration, whereas in Kraków it is only slightly indicated. Average daily amplitude of Rn-222 concentration at all stations begins to increase in April with a maximum in June (Ciosny - 11 $Bq \cdot m^{-3}$), August (Kraków - 12 $Bq \cdot m^{-3}$) and September in Łódź (3 $Bq \cdot m^{-3}$).

The daily course of Rn-222 concentration at 2 m a.g.l. is an inversion of air temperature course. Still, extreme concentration of this radionuclide near the ground occur with some delay with respect to the minimum and maximum of air temperature. At rural station (Ciosny) this inverse relation was much stronger than in Łódź with maximum of correlation coefficients in April and September. In Ciosny the highest average Rn-222 concentration was observed for 10°C–15°C air temperature range whereas for urban areas this range was -5°C–0°C.

Thermal conditions in the 0.2-2.0 m a.g.l. air layer at station in the centre of Łódź differ substantially from rural conditions, which may considerably determine the level of registered Rn-222 concentration. In Łódź for 90% of cases the differences of air temperature in 1.8 m layer are in the range between –1.0°C and 1.0°C with the prevalence of negative values. This confirms the domination of unstable or slightly unstable conditions which favours intensive turbulence. In Ciosny during all year there is a distinctive daily cycle of thermal stratification variability near the ground level. During the day there are negative differences of temperature in 1.8 m layer (unstable conditions) and during the night the inversion (stable conditions) occurs. Strong near ground air temperature inversions (with maximum at ~6°C) in Ciosny are observed from April until September with the maximum during summer. Such thermal conditions during the night favour the increase of Rn-222 concentration. Temperature inversion constitutes a “trap” for Rn-222, i.e. the turbulent diffusion process (dispersion of substances in the air) weakens, which then results in build-up of this radionuclide concentration near the ground. Maximum concentration of Rn-222 registered at rural station in the period 2008–2010 were twice as high as those registered in Łódź (during the same period).

Atmospheric pressure is a meteorological element for which statistical relationships with Rn-222 were not confirmed in Łódź and Ciosny. There was a decrease of Rn-222 noted for low (< 1000 hPa) and high (> 1040 hPa) atmospheric pressure values. When investigating the Rn-222 concentration level with relation to wind speed in distinctive ranges of atmospheric pressure major role of air movement was found. Thus, the influence of atmospheric pressure on Rn-222 concentration cannot be ruled out completely. This meteorological

element is an important indicator of the weather complex variability from which conclusion may be drawn about the occurrence of conditions favourable (e.g. lack of strong turbulence) or unfavourable (e.g. active air masses exchange) for build-up of radon in the near ground layer of the atmosphere.

There is an inverse relationship between Rn-222 concentration and wind speed. This is stronger at rural station. Outside of the city the calm conditions are more frequent and they are characterized with twice higher Rn-222 concentration than it was the case in Łódź centre.

The relation between Rn-222 concentration in the near ground air layer and soil heat flux (*QG*) has not been documented so far in the domestic and foreign literature. It was found that Rn-222 concentration and *QG* exhibit stronger relation than other variables. This is most evident from April until October. The highest average concentration of Rn-222 were recorded for $QG > 5$ Wm^{-2} and the lowest for $QG < 10$ Wm^{-2}. Daily course of *QG* is quasi synchronous with Rn-222 concentration. However, there is a marked lag of extreme Rn-222 concentration compared with extreme *QG* values.

Łódź and Ciosny stations varied with respect to the ground humidity - in the city clay ground was, on average, twice as humid as sandy soil in Ciosny. In Łódź the statistical relationship between Rn-222 concentration and ground humidity was not confirmed whereas in Ciosny there is an inverse relation between those variables. In such case it is hard to draw an unequivocal conclusion so as to the relation between observed variables. Probably the extension of the scope of the radon monitoring at the stations together with the measurements of Rn-222 exhalation for various ranges of ground humidity would provide considerable extension of present knowledge on the role of this meteorological element in shaping the concentration of radionuclide in the air at 2 m a.g.l.

Simultaneous influence of many meteorological elements, their periodical and non-periodical (connected with the air masses advection) variability and their influence on the rate of exhalation and the turbulent diffusion brings about substantial difficulties with the interpretation and assessment of the influence of individual weather elements on the Rn-222 concentration in the near ground air layer. Thus, the author, being aware of the complexity of the undertaken investigation, shows considerable caution in formulation of the conclusions about the major meteorological variables determining Rn-222 concentration at near ground level. The observations presented in this work are regarded as a foundation for further research on the radon concentration in the context of meteorological conditions.

Recognition of temporal variability of Rn-222 and selected meteorological variables served to create a statistical model for estimation of this radionuclide concentration at 2 m a.g.l. Relations between Rn-222 concentration and indi-

vidual meteorological elements are not linear. The models were based on functional relations between Rn-222 concentration and ground heat flux (*QG*) and air temperature. Selected meteorological elements were characterized with apparent daily cycle and the strongest statistical relations with Rn-222 concentration. The description of relations between variables for individual months was established on the basis of exponential function and exponential function with time derivative of predictor to account for the hysteresis issue. Model with time derivative provided better results. The weakest fitting of modelled data to empirical ones is noted for winter months. During subsequent seasons air temperature as well as *QG* driven models exhibited very high agreement with empirical data. The restriction in the usage of *QG* for Rn-222 concentration was observed only in winter in case of snow cover occurrence which reduces daily *QG* variability.

Remarks concerning the relations between meteorological variables and Rn-222 concentration formulated on the basis of the above mentioned research results was confirmed by multi variable analysis with the usage of multiple stepwise regression (with backward elimination). Soil heat flux, air temperature at 2 m a.g.l. and soil moisture are the variables which, when simultaneously introduced into the Rn-222 concentration prediction models, provided very good results. The application of wind speed in the 0.2–2.0 m a.g.l. layer resulted in weaker quality of the Rn-222 estimation.

The issue of the differences of Rn-222 between the centre of Łódź and Ciosny station confirmed the hypothesis on the microclimate characteristics being a driving agent of the levels of registered Rn-222 concentration.

The highest negative differences of Rn-222 concentration between Łódź and rural station Ciosny (< -20 Bq·m^{-3}) were observed between April and September. In all seasons (except winter) the maximum negative differences in the daily course occurs during nocturnal hours. During the day (in the whole annual cycle) the differences of Rn-222 concentration at above mentioned stations do not occur.

The highest negative differences of Rn-222 concentration (< -10 Bq·m^{-3}) occurred during anticyclonic circulation from E and S (probable influence on the Rn-222 concentration - the transport of atmospheric radionuclide from continental areas with higher radon potential than central Poland). Except alleged influence of the advection direction on the Rn-222 concentration registered at stations during investigated days unarguably important role for the Rn-222 concentration increase in Ciosny was played by favourable conditions for strong near ground nocturnal inversion occurrence outside the city during the anticyclonic weather. During this time such phenomenon in Łódź did not occur due to intense turbulence originating from the heat surplus in the city. In Łódź

the highest negative differences of Rn-222 concentration occurred during the urban heat island phenomenon (with the intensity > 5.0°C).

During the days of cyclonic circulation with active atmospheric fronts, strong winds of general circulation and precipitation the differences of Rn-222 concentration between Łódź and Ciosny stations were not observed. In those days the daily course of radon concentration was alike at both stations.

Rn-222 concentration in the air at 2 m a.g.l. is undoubtedly strongly influenced by local conditions, which are connected with the environment of this gas emission to the atmosphere (inter alia: radium presence in the ground, tectonics, soil characteristics - temperature, humidity, porosity) and microclimatic conditions occurring in the near ground air layer. Second component of Rn-222 concentration connected with the transportation of this radionuclide by air masses from distant areas is difficult to define without the knowledge of Rn-222 concentration distribution in the vertical profile especially from the level which is directly under the influence of the ground. In this work, despite the lack of such data the attempt was made to identify the influence of advection direction of air masses and the characteristics of atmospheric circulation on this radionuclide concentration in the near ground air layer. Advection characteristic (direction) and the type of the circulation were defined with the Piotrowski method (2009) with the application of direction and velocity of geostrophic wind. Also, trajectories of air masses in the preceding 72 hours before their arrival at Rn-222 measurement stations were investigated.

The highest average Rn-222 concentration in Łódź was registered during southern advection, in Ciosny for eastern and in Kraków for south-western. The lowest average Rn-222 concentration in central Poland was characteristic for north-western advection and in Kraków for northern.

The highest Rn-222 concentration (above 25% of average maximum daily value) were registered in Kraków during south western and western advections whereas in the central Poland for eastern ones.

Anticyclonic circulation favoured the increase of Rn-222 concentration near the ground - the greatest range of variability of daily concentration of this radionuclide occurred at all stations during the weather types shaped by the high pressure system. The highest average daily amplitude of Rn-222 concentration occurred during anticyclonic circulation from SE and W (Łódź), E (Ciosny) and SW (Kraków). In central Poland and in Kraków the smallest range of variability was observed during cyclonic circulation and also during anticyclonic one with the advection from NW and N.

The analysis of the Rn-222 concentration deviation from the average showed that during the cyclonic as well as anticyclonic situations the highest frequency of positive deviations of Rn-222 concentration in Ciosny occurred

during SE and E advections whereas in Kraków during SW and S. Negative deviations of Rn-222 concentration at both stations were registered most frequently during the N and NW advections. Period from April till September is characterized by the majority of positive Rn-222 concentration deviations whereas from October to March negative ones prevail.

The motivation for investigation of the trajectories of air masses advecting towards the Rn-222 measurements stations was the thesis presented in the literature on the role of atmospheric transport for the Rn-222 in situ concentration (e.g. Kopcewicz 1968, Carvalho 1995, Dueñas i in. 1996, Morizumi i in. 1996, Omori i in. 2009, Arnold i in. 2009). Exhalation of radon from continental areas is 1000 times greater than from the water bodies. Thus, continental masses are richer with this radionuclide than maritime ones. The process of air mass transformation over land, especially over the areas of elevated radon potential (inter alia: the presence of acidic crystalline rocks with higher radon content) brings about the increase of Rn-222 concentration in the air. Long term residence of the air mass over ocean areas may contribute to the lowering of this gas concentration in the lower layer of the troposphere. The analysis of the air masses trajectories during the last 72hours prior to Rn-222 concentration measurements in Ciosny and Kraków for selected days with high radon radioactivity confirmed the regularities mentioned in the literature - advection from continental sectors especially from areas of elevated (in comparison with central Poland and Kraków) radon potential.

Unequivocal assessment of the influence of atmospheric transport from distant areas on the Rn-222 concentration at investigated stations is, as aforementioned, a difficult task. This assessment comprises also the second aspect of the atmospheric circulation influence - which is its forcing on the course of meteorological elements in local scale (turbulent air movement, thermal conditions) which subsequently determine the Rn-222 concentration in the lower layer of the atmosphere. Data on Rn-222 concentration at 2 m a.g.l. do not allow the decomposition of coincidental meteorological factors (i.e. local and macroscale) and unequivocal identification of the governing factor in the increase of Rn-222 concentration at the stations. Described remarks are a premise to further, extended investigation of Rn-222 concentration in the vertical profile of the atmosphere and the measurement of the exhalation rate during individual types of atmospheric circulation.

Executed attempt to define the macro-scale factor (atmospheric transport) of the Rn-222 concentration was an introduction to a detailed analysis of the Rn-222 concentration with regards to local meteorological conditions in Łódź and Ciosny. The aim of the research was not only the recognition of the relations between Rn-222 concentration and selected meteorological variables but

also the search for the differences in the temporal variability of Rn-222 concentration in the urban area in comparison with rural environment.

Experiment comprising Rn-222 concentration measurements in the air conducted in the house in Łódź in Autumn 2007 (September–October) showed differences in the variability of Rn-222 during two atmospheric circulation types. In investigated house (without the basement) clear daily cycle of Rn-222 concentration was recorded with the average concentration at 40 $Bq \cdot m^{-3}$ during the weak wind conditions connected with high pressure system. During the transition of low pressure system (with atmospheric fronts and strong winds) over central Poland average concentration of Rn-222 was twice as high and did not exhibit a daily cycle.

The measurements of the Rn-222 concentration at 1st floor of a house showed differences with regards to the ground floor - the range of daily variability at the first floor was smaller than at the ground floor. Decreasing tendency of Rn-222 concentration with the increase of atmospheric pressure was observed at the ground floor as well as at the first floor. The regularities in the variability of the Rn-222 concentration in the building need verification with a longer data series.

Regularities identified in the research indicate the direction of future investigations not only for the sake of better understanding of the meteorological conditions of radioactivity of the atmosphere connected with radon but also for the utilization of this radionuclide as a marker of the processes occurring in the boundary layer of the troposphere. Such plans need an extension of the investigations scope with the vertical measurements of Rn-222 concentration. The research carried out in the 2008–2010 period also indicates the need to extend the measurements with the monitoring of Rn-222 exhalation, which might complete and also confirm the conclusions derived from the Rn-222 concentration measurements in near ground air layer. Thus, from the cognitive point of view there is a need for continuation of the radon environmental research not only from the point of view of urban climatology but also in the topoclimatic frame of reference in rural areas. Previous analyses are treated as a premise for the further research focusing on the better identification of the interaction between micro-, topo- and macro-climatic conditions on the radioactivity of the atmosphere - undoubtedly one of the more important biometeorological stimuli.