

Agnieszka Podstawczyńska

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



WYDAWNICTWO
UNIWERSYTETU
ŁÓDZKIEGO

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 Górską, 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

Spis treści

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 zamieszkimi. 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 $9,73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Miliszkievicz 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 $T_{1/2} = 3,92 \text{ s}$, dłuższym toron $T_{1/2} = 54,5 \text{ s}$, a najdłuższym Rn-222 $T_{1/2} = 3,825 \text{ dnia}$. 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 $15\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), 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 $T_{1/2} = 3,05 \text{ min.}$; ołów Pb-214 $T_{1/2} = 26,8 \text{ min.}$; bizmut Bi-214 $T_{1/2} = 19,7 \text{ min.}$; polon Po-214 $T_{1/2} = 164 \mu\text{s}$) oraz tzw. izotopy długożyciowe (ołów Pb-210 $T_{1/2} = 22,3 \text{ lat}$; bizmut Bi-210 $T_{1/2} = 5,0 \text{ dni}$; 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, Cothorn 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 x 10 ⁹ lat	α
Tor -234 ↓	Th	24,1 dni	β, γ
Protaktyn ↓	Pa	1,18 min.	β, γ
Uran-234 ↓	U	2,5 x 10 ⁴ lat	α, γ
Tor-230 ↓	Th	8,0 x 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 x 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 konwekcją, 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 wchodzi w reakcje chemiczne, może być przenoszony ze strumieniem innych gazów (głównie CO₂, CH₄, N₂) 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 (Cothorn 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 cm² 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).

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 $2-2\ 000\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 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

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. $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, i wynosiło odpowiednio $4,6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, $5,8 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $10,0 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (tab. 4.1).

Stężenie Rn-222 w przygruntowej warstwie powietrza zmieniało się na badanych stacjach od wartości niemierzalnych, tj. poniżej $2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ do około $90 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (rys. 4.1–4.5). Maksymalne wartości stężenia w latach 2008–2010 w Łodzi nie przekroczyły $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (09.11.2008, godz. 10.00), w Ciosnach $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (31.05.2009, godz. 08.00), a w Krakowie $86 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (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 $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. W Krakowie największą frekwencją, 63%, cechują się wartości z przedziału $5\text{--}15 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (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 kwartył przypada na wartość $6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w Łodzi, $7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w Ciosnach i $13 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 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 $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. W Ciosnach wartości $20\text{--}40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ stanowiły tylko 1,3% przypadków, a w Krakowie stężenia o wartości $20\text{--}86 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to 6% wyników pomiarów. Opisywane stężenia powyżej $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ pojawiają się na stacjach zamiejskich najczęściej w miesiącach letnich i jesiennych (rys. 4.1, 4.5).

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 oraz 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.

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 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ odpowiada wartość 20 $\text{mBqm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (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 rozprzodowane 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).