

**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2008/

Kraków, wrzesień 2008

Raport Nr 2014/AP

**Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu
a parametry meteorologiczne i własności gleby**

Jadwiga Mazur

PRACA DOKTORSKA

wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. Urszuli Woźnickiej

SPIS TREŚCI

<i>Spis rysunków</i>	I
<i>Spis tabel</i>	V
<i>Lista ważniejszych symboli</i>	VI
Wstęp	1
1. Radon w środowisku człowieka	3
1.1 Radon – informacje ogólne	3
1.2 Aspekt zdrowotny	6
1.3 Radon w glebie	6
<i>Emanacja</i>	7
<i>Transport radonu</i>	11
<i>Ekshalacja</i>	13
2. Matematyczny opis zjawiska ekshalacji radonu z gleby	18
2.1 Mechanizmy transportu radonu	18
2.2 Matematyczny opis dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby	19
2.3 Teoretyczne przebiegi zmian dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby	22
3. Wybrane metody stosowane w pomiarach radonu	30
3.1 Pomiar współczynnika emanacji radonu	30
3.2 Pomiar szybkości ekshalacji radonu	32
<i>Pomiary laboratoryjne</i>	32
<i>Pomiary terenowe</i>	35
4. Stanowisko do pomiarów radonu <i>in situ</i> w IFJ PAN – „Radon Study Field RSF”	39
4.1 Geologiczne rozpoznanie terenu	42
4.2 Podstawowe parametry gleby na terenie RSF	42
4.3 Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w glebie	45
4.4 Pomiar stężenia radonu w glebie	49
4.5 Rejestracja parametrów meteorologicznych	52
4.6 Pomiar wilgotności gleby	53

5. Długoterminowe pomiary szybkości ekshalacji radonu z gleby	54
5.1 Metoda pomiaru	54
5.2 Obliczanie wartości szybkości ekshalacji	56
5.3 Automatyczne stanowisko do ciągłego pomiaru szybkości ekshalacji (AutoExh)	58
6. Analiza wyników	63
6.1 Analiza statystyczna wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu w latach 2003-2006	64
6.2 Wpływ stężenia radonu w glebie na szybkość jego ekshalacji	77
6.3 Charakterystyka warunków meteorologicznych w okresie pomiarowym 2005-2006	78
6.4 Analiza dobowej dynamiki szybkości ekshalacji radonu z gruntu	88
6.5 Zależność szybkości ekshalacji radonu z gruntu od wybranych parametrów meteorologicznych i własności gleby	94
6.6 Badanie zależności szybkości ekshalacji radonu z gruntu od wybranych parametrów meteorologicznych metodą analizy wieloparametrycznej	104
7. Podsumowanie i wnioski	118
LITERATURA	124
<i>Aneks</i>	128

SPIS RYSUNKÓW:

- Rys. 1.1.** Drogi wnikania radonu z gleby do wnętrza domu
- Rys. 1.2.** Mechanizmy wydostawania się radonu z gleby lub materiału budowlanego do powietrza [Por93]
- Rys. 1.3.** „Historie” radonu powstającego w wyniku rozpadu radu w ziarnie minerału
- Rys. 1.4.** Współczynnik emanacji jako funkcja rozmiaru ziaren gleby [DeM98]
- Rys. 1.5.** Wpływ wilgotności na emanację radonu dla różnych rozmiarów ziaren gleby [Mar92]
- Rys. 1.6.** Zależność szybkości ekshalacji radonu od wilgotności próbki [Str84]
- Rys. 1.7.** Zależność szybkości ekshalacji radonu od efektywnej porowatości gleby [Kel88]
- Rys. 1.8.** Zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a ciśnieniem atmosferycznym [Koj]
- Rys. 1.9.** Zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a różnicą ciśnień [Koj]
- Rys. 1.10.** Zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a wilgotnością gleby [Koj]
- Rys. 1.11.** Dobowe zmiany szybkości ekshalacji i różnicy ciśnień [Koj]
- Rys. 2.1.** Przykładowy teoretyczny przebieg zależności współczynnika emanacji radonu od wilgotności gleby
- Rys. 2.2.** Zależność współczynnika dyfuzji radonu D od wilgotności gleby S [Rog91]
- Rys. 2.3.** Zależność względnego strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: gęstość gleby)
- Rys. 2.4.** Zależność względnego strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: porowatość gleby)
- Rys. 2.5.** Zależność współczynnika κ podziału radonu między fazę „powietrzną” a „wodną” od temperatury
- Rys. 2.6.** Zależność strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: wielkość adsorpcji atomów radonu na ziarnach gleby).
- Rys. 2.7.** Zależność względnego strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: temperatura gleby)
- Rys. 2.8.** Zależność względnego strumienia radonu z gleby od temperatury gleby (parametr: nasycenie przestrzeni porowej gleby wodą S)
- Rys. 3.1.** Schemat stanowiska do pomiaru ekshalacji radonu [Kel88]
- Rys. 3.2.** Stanowisko do pomiaru ekshalacji radonu z gleby z użyciem aktywnego miernika radonu [PHARE94]
- Rys. 4.1.** Widok ogólny IFJ PAN oraz położenia Radon Study Field

- Rys. 4.2.** Radon Study Field – kontener z aparaturą i stacja meteorologiczna Weather Monitor
- Rys. 4.3.** Rozmieszczenie stanowisk do pomiaru stężenia radonu w glebie (Sonda RS-1 i detektory CR-39) oraz ekshalacji radonu z gleby na terenie RSF
- Rys. 4.4.** Przekrój głębokościowy Radon Study Field
- Rys. 4.5.** Schemat stanowiska do pomiaru przepuszczalności gleby [Jan05]
- Rys. 4.6.** Pomiar gamma spektrometryczny *in situ* na terenie RSF
- Rys. 4.7.** Widmo promieniowania gamma – pomiar *in situ* na terenie RSF
- Rys. 4.8.** Schemat stanowiska do pomiaru stężenia radonu w glebie
- Rys. 4.9.** Przykłady rejestracji zmian stężenia radonu przez AlphaGUARD w pomiarach „glebowych”
- Rys. 4.10.** Przykład graficznego przedstawiania danych meteorologicznych rejestrowanych przez stację Weather Monitor II
- Rys. 4.11.** Wygląd zewnętrzny czujnika wilgotności gleby Theta Probe, typ ML2x [Th99]
- Rys. 5.1.** Schemat układu do pomiarów ekshalacji radonu z gleby
- Rys. 5.2.** Komora ekshalacyjna w czasie pomiaru
- Rys. 5.3.** Komora ekshalacyjna oraz pierścień mocujący do gleby
- Rys. 5.4.** Przykładowe przebiegi zmian stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej
- Rys. 5.5.** Przykład dopasowania prostej do wyników pomiaru narastania stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej ExhBox-1
- Rys. 5.6.** Widok ogólny stanowiska AutoExh
- Rys. 5.7.** Schemat budowy stanowiska AutoExh.
- Rys. 5.8.** Szczegóły techniczne stanowiska AutoExh
- Rys. 5.9.** Schemat budowy i działania systemu sterującego stanowiska AutoExh
- Rys. 5.10.** Przykładowy przebieg zmian stężenia radonu zarejestrowany przez AlphaGUARD w czasie pomiaru za pomocą urządzenia AutoExh
- Rys. 6.1.** Szybkość ekshalacji radonu z gruntu w kolejnych latach pomiarowych
a) 2004, b) 2005, c) 2006
- Rys.6.2.** Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: jesień 2003, jesień 2004 i jesień 2005
- Rys.6.3.** Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: zima 2004, zima 2005 i zima 2006

- Rys.6.4.** Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: wiosna 2004, wiosna 2005 i wiosna 2006
- Rys.6.5.** Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: lato 2004, lato 2005 i lato 2006
- Rys. 6.6.** Oznaczenie symboli stosowanych na Rys. 6.7 ÷ 6.10
- Rys.6.7.** Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla zimy 2004, 2005, 2006
- Rys.6.8.** Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla wiosny 2004, 2005, 2006
- Rys.6.9.** Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla lata 2004, 2005, 2006
- Rys.6.10.** Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla jesieni 2003, 2004, 2005
- Rys. 6.11.** Zależność szybkości ekshalacji radonu z gruntu od stężenia radonu w powietrzu glebowym
- Rys. 6.12.** Temperatury powietrza: średnie, minimalne i maksymalne w danym miesiącu w latach 2004 (a), 2005 (b), 2006 (c)
- Rys. 6.13.** Opady sumaryczne i maksymalne w danym miesiącu w latach 2004 (a), 2005 (b), 2006 (c)
- Rys. 6.14.** Średnia i maksymalna prędkość wiatru w danym miesiącu w latach 2004 (a), 2005 (b), 2006 (c)
- Rys. 6.15.** Zmiany dobowe wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle zmian temperatury powietrza (jesień 2005)
- Rys. 6.16.** Zmiany dobowe wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle zmian temperatury powietrza (lato 2006)
- Rys. 6.17.** Zmiany dobowe wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle zmian temperatury powietrza (jesień 2005)
- Rys. 6.18.** Szybkość ekshalacji radonu z gleby zmierzona w określonych godzinach w okresie 1 styczeń – 26 wrzesień 2006
- Rys. 6.19.** Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji radonu z gleby zmierzonych w godzinach: 5⁰⁰, 11⁰⁰, 17⁰⁰ i 23⁰⁰
- Rys. 6.20.** Przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza, opadów i szybkości wiatru
- Rys. 6.21.** Średnie tygodniowe wartości szybkości ekshalacji E na tle średnich tygodniowych wartości temperatury powietrza T_{2,5}
- Rys. 6.22.** Zależność średnich tygodniowych wartości E od średnich tygodniowych wartości temperatury powietrza T_{2,5}
- Rys. 6.23.** Średnie wartości E w funkcji średniej temperatury T_i z przedziałów ΔT
- Rys. 6.24.** Zależność szybkości ekshalacji radonu z gruntu od ciśnienia atmosferycznego

- Rys. 6.25.** Średnie wartości E dla trzech zakresów temperatury powietrza $T_{2,5}$ w kilku przedziałach ciśnienia atmosferycznego $Ciśn_{2,5}$
- Rys. 6.26.** Zależność szybkości ekshalacji radonu od wilgotności gleby na różnych głębokościach
- Rys. 6.27.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i opadów dla okresu całego roku (od jesieni 2005 do lata 2006)
- Rys. 6.28.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i opadów dla poszczególnych sezonów 2005 – 2006
- Rys. 6.29.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i prędkości wiatru dla okresu całego roku (od jesieni 2005 do lata 2006)
- Rys. 6.30.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i prędkości wiatru dla poszczególnych sezonów 2005 – 2006
- Rys. 6.31.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i średniej temperatury powietrza dla okresu roku (od jesieni 2005 do lata 2006)
- Rys. 6.32.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i średniej temperatury powietrza dla poszczególnych sezonów 2005 – 2006
- Rys. 6.33.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od średniego ciśnienia atmosferycznego i sumy opadów z czynnikiem kategoryzującym: temperatura gleby
- Rys. 6.34.** Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od prędkości wiatru i temperatury gleby z czynnikiem kategoryzującym: średnia temperatura powietrza

SPIS TABEL:

Tabela 1.1. Parametry fizyko-chemiczne radonu (^{222}Rn)

Tabela 1.2. Procentowy udział źródeł radonu w domu [UNS88]

Tabela 4.1. Dane techniczne toru spektrometrycznego SP-1

Tabela 4.2. Dane wzorców kalibracyjnych

Tabela 4.3. Wyniki stężeń izotopów gamma promieniotwórczych na terenie RSF
(pomiar *in situ* i pomiar laboratoryjny)

Tabela 6.1. Zestawienie metod i harmonogram pomiarów szybkości ekshalacji radonu z gruntu

Tabela 6.2. Statystyki opisowe wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu

Tabela 6.3. Zestawienia roczne wartości temperatury powietrza [$^{\circ}\text{C}$]

Tabela 6.4. Zestawienia roczne opadów atmosferycznych [mm]

Tabela 6.5. Zestawienia roczne prędkości [m/s] i kierunku wiatru

Tabela 6.6. Wybrane parametry meteorologiczne - średnie roczne w latach 2004-2006

Tabela 6.7. Wyniki testów *t*-Studenta i *F*-Fishera-Snedecora dla średnich wartości *E* w poszczególnych godzinach i porach roku

Tabela 6.8. Współczynniki korelacji *WK* (w różnych porach roku i dla całego okresu pomiarowego) dla wartości szybkości ekshalacji radonu (*E*) i wybranych parametrów meteorologicznych

Tabela 6.9. Przedziały temperatury powietrza ΔT , odpowiadające im średnie wartości temperatury T_i i wybrane podstawowe parametry statystyczne dla poszczególnych przedziałów

LISTA WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI STOSOWANYCH W PRACY:

A_{Ra}	stężenie radu w glebie
B	współczynnik kierunkowy prostej dopasowanej do punktów pomiarowych
C_a	stężenie radonu w przestrzeni porowej gleby
C_0	początkowe stężenie radonu w komorze ekshalacyjnej
C_w	stężenie radonu w wodach podziemnych
C_∞	stężenie radonu w powietrzu glebowym na dużych głębokościach z ($z \gg \mathcal{G}$)
D	współczynnik dyfuzji radonu w glebie
D_0	współczynnik dyfuzji radonu w powietrzu
D_{TLD}	dawka pochłonięta zarejestrowana przez detektor TLD
E	szybkość ekshalacji
ε	porowatość gleby ε_a – porowatość fazy „powietrznej” przestrzeni międzyziarnowej ε_w – porowatość fazy „wodnej” przestrzeni międzyziarnowej
F	pole powierzchni, z której mierzona jest ekshalacja radonu
f	współczynnik emanacji radonu
η	lepkość dynamiczna powietrza
J_s^d	gęstość dyfuzyjnego strumienia radonu w przestrzeni porowej gleby
J^d	gęstość dyfuzyjnego strumienia radonu z powierzchni gleby do powietrza
\mathcal{G}	długość drogi dyfuzji radonu w glebie
K	współczynnik podziału radonu między fazę „powietrzną” a zaadsorbowaną na powierzchni ziaren gleby
k	przepuszczalność gleby
k_k	współczynnik kalibracji dla detektorów TLD
κ	współczynnik podziału radonu między fazę „powietrzną” i „wodną” przestrzeni porowej
λ_{Rn}	stała rozpadu radonu
R	stała gazowa
r	współczynnik dopasowania prostej do punktów pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów
ρ	gęstość gleby
S	nasycenie przestrzeni porowej wodą

SD	odchylenie standardowe
T	temperatura
T_i	średnia temperatura powietrza w i -tym przedziale temperatur ΔT
t	czas
t_A	czas akumulacji radonu w komorze ekshalacyjnej
Q	ciepło adsorpcji ^{222}Rn na węglu aktywnym
V	objętość układu pomiarowego z komorą ekshalacyjną
v	prędkość przepływu gazu glebowego
W	współczynnik kształtu sondy glebowej
WK	współczynnik korelacji

Oznaczenia parametrów meteorologicznych używane w analizie wyników:

$Cisn_{2,5}; T_{2,5}$	wartości średnie ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza obliczone z 5 wartości rejestrowanych przez stację meteorologiczną, czyli z okresu 2,5 godzin (w tym czasie przeprowadzony był pomiar ekshalacji radonu trwający 1,5 godziny).
d_T	różnica temperatur powietrza i gleby $T_{2,5} - T_{gl}$
$Opad_{24}$	suma opadów atmosferycznych z okresu 24 godzin przed zakończeniem pomiaru ekshalacji radonu
T_{gl}	temperatura gleby mierzona na głębokości 1 m
$Wilg, T_{zew}, V_{wiatr}, Cisn, Opad$	wartości parametrów (odpowiednio: wilgotności względnej i temperatury powietrza, prędkości wiatru, ciśnienia atmosferycznego, opadów) zarejestrowane przez stację meteorologiczną w trakcie pomiaru ekshalacji, na pół godziny przed jego zakończeniem.

WSTĘP

Radon (^{222}Rn) jako naturalny gazowy izotop promieniotwórczy występujący powszechnie w przyrodzie i jego krótkożyciowe produkty rozpadu są znaczącym czynnikiem odpowiedzialnym za dawkę promieniowania jonizującego jaką otrzymują ludzie. Jest więc przedmiotem zainteresowania od wielu lat – zarówno pod kątem naukowym (fizyka transportu radonu, jego ekshalacja z gleby, wnikanie do budynków, badanie rozkładu stężeń, itp.) jak i w aspekcie dozymetrycznym i jego wpływu na organizm człowieka.

Ekshalacja radonu jest procesem wydostawania się radonu z gruntu (lub innych ośrodków, np. ścian, materiałów budowlanych) do atmosfery. Proces ten jest interesujący i złożony, zależny od wielu czynników. Zależności te nie są całkowicie wyjaśnione i są ciągle badane.

Celem pracy było poszerzenie wiedzy na temat procesu ekshalacji radonu z gruntu. W szczególności podjęto próbę zbadania dynamiki tego zjawiska w dłuższym okresie czasu w powiązaniu z warunkami meteorologicznymi. Radon (^{222}Rn) powstaje w gruncie w wyniku rozpadu promieniotwórczego występującego w nim radu (^{226}Ra). Zatem własności gruntu, takie jak porowatość, przepuszczalność, stężenie radu oraz temperatura i wilgotność mają bezpośredni wpływ na dynamikę ekshalacji radonu. Temperatura powietrza i opady atmosferyczne wpływają bezpośrednio na temperaturę i wilgotność gleby, dlatego też są tymi czynnikami meteorologicznymi, które pośrednio oddziałują na proces ekshalacji radonu.

Zminimalizowanie wpływu zmienności podstawowych parametrów gleby (przepuszczalności, porowatości, gęstości, stężenia radu) było możliwe ponieważ pomiary wykonywano na stanowisku umieszczonym w tym samym miejscu. Na terenie IFJ PAN zostało utworzone stałe stanowisko do prowadzenia quasi ciągłych i długoterminowych pomiarów ekshalacji radonu. Dla celów pracy niezbędne było wykonywanie regularnych pomiarów szybkości ekshalacji radonu z jednoczesną rejestracją podstawowych parametrów meteorologicznych w miejscu pomiaru. Zebrano i zanalizowano dane uzyskane w okresie trzech lat. W celu uchwycenia tendencji zmian procesu ekshalacji radonu i zależności od warunków meteorologicznych konieczne było wykonywanie pomiarów kilka razy w ciągu doby, co zostało zrealizowane poprzez zaprojektowanie przez autorkę i wykonanie automatycznego urządzenia do pomiarów ekshalacji.

W pierwszych dwóch rozdziałach pracy umieszczono informacje na temat radonu i procesów jakim podlega w środowisku, a także przedstawiono matematyczny opis zjawiska ekshalacji radonu z gruntu. Uzupełniono równanie opisujące proces ekshalacji radonu z gruntu o wprowadzenie czynnika odpowiadającego wilgotności gleby.

Rozdział 3 poświęcono przedstawieniu wybranych metod stosowanych w pomiarach współczynnika emanacji radonu i szybkości jego ekshalacji. Stanowisko pomiarowe, urządzenie do automatycznych pomiarów ekshalacji oraz zaproponowaną przez autorkę metodykę pomiarów ekshalacji radonu z gruntu, przedstawiono w rozdziałach 4 – 5. Rozdział 6 zawiera analizę zebranych wyników pomiarów szybkości ekshalacji radonu, zarówno pod kątem statystycznym jak i wpływu wybranych parametrów meteorologicznych na szybkość tego procesu. W celu omówienia tego ostatniego zagadnienia posłużono się m.in. analizą wieloparametryczną, która pozwoliła na sformułowanie bardziej precyzyjnych wniosków dotyczących wpływu warunków meteorologicznych na dynamikę procesu ekshalacji. Podsumowanie i wnioski przedstawiono w rozdziale 7.

Do pracy została dołączona płyta CD zawierająca pełny zestaw wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu wraz z kompletem danych meteorologicznych rejestrowanych w okresie pomiarowym 2003 – 2006, a także rysunki przebiegów szybkości ekshalacji na tle zmian podstawowych parametrów meteorologicznych (ciśnienie atmosferyczne, temperatura i wilgotność powietrza, opady, szybkość wiatru) dla okresu jesień 2005 – lato 2006.

1. RADON W ŚRODOWISKU CZŁOWIEKA

1.1. Radon – informacje ogólne

W przyrodzie występują trzy naturalne izotopy radonu, które są elementami szeregów promieniotwórczych. Dwa z nich zostały odkryte w 1900 roku: toron (izotop ^{220}Rn) – przez R.B. Owensa i E. Rutherforda oraz radon (izotop ^{222}Rn) – przez F.E. Dorna.

Radon (^{222}Rn) pochodzi z szeregu uranu ^{238}U , jego okres półrozpadu wynosi 3,82 dni, natomiast stała rozpadu $\lambda = 2,0982 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Toron tworzy się w szeregu torowym (^{232}Th), ma okres półrozpadu 55,6 s. Trzeci naturalny izotop to aktynon (radon ^{219}Rn), pochodzący z szeregu uranu ^{235}U , z okresem półrozpadu 3,96 s. Największe znaczenie (z punktu widzenia wpływu na zdrowie) ma izotop o najdłuższym czasie półrozpadu, czyli radon ^{222}Rn . Aktynon jest „najkrócej żyjącym” izotopem i dlatego jego wpływ na zdrowie jest zanedbywany. Zdarzają się jednak obszary o wyjątkowo dużej zawartości toru w skorupie ziemskiej (np. stan Kerala w Indiach), gdzie piaski monacytowe mogą być źródłem znacznych ilości uwalnianego toronu, co może już stanowić potencjalne zagrożenie zdrowotne [Dur97].

Radon jest naturalnym gazowym pierwiastkiem promieniotwórczym o liczbie atomowej 86. Jest najcięższym gazem szlachetnym, bezbarwnym i bezwonnym. Jest rozpuszczalny w wodzie, rozpuszczalność ta zależy od temperatury wody: im niższa temperatura tym większy współczynnik rozpuszczalności. Podstawowe parametry fizykochemiczne radonu (^{222}Rn) zamieszczono w Tabeli 1.1.

Radon, jako gaz szlachetny, jest generalnie nieaktywny chemicznie, chociaż opisano przypadki tworzenia fluorków radonu [Dur97]. Jest dość mobilny i może migrować zarówno w skorupie ziemskiej jak i w powietrzu. Powoduje to możliwość jego wdychania przez ludzi, a w konsekwencji (w przypadku wyższych stężeń) może stanowić zagrożenie radiacyjne.

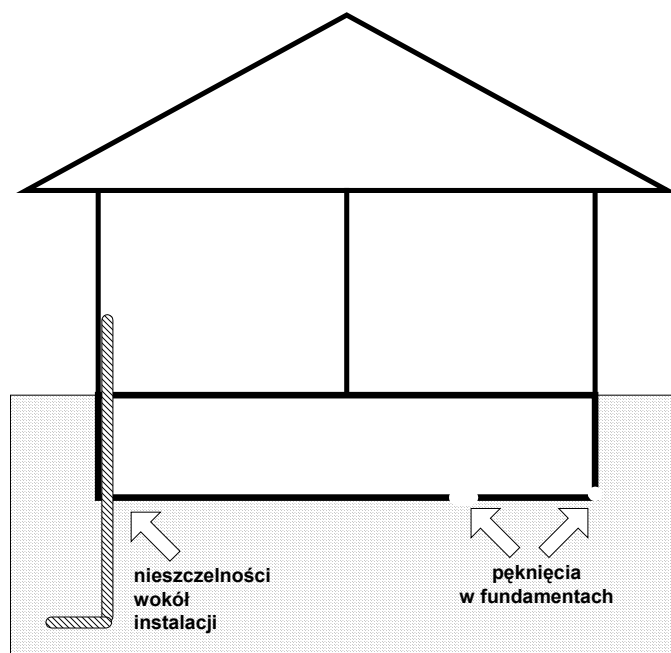
Źródłem obecności radonu w powietrzu jest skorupa ziemska, w której znajdują się bezpośredni poprzednicy izotopów radonu w poszczególnych szeregach promieniotwórczych: rad ^{226}Ra , który poprzez rozpad α powoduje powstanie radonu ^{222}Rn ; rad ^{224}Ra , z którego powstaje toron ^{220}Rn oraz rad ^{223}Ra , którego pochodną jest aktynon ^{219}Rn [Eis87]. Radon wydostaje się ze skorupy ziemskiej do powietrza atmosferycznego (zjawisko ekshalacji) i jest, wraz z jego krótkożyciowymi produktami rozpadu, odpowiedzialny za ponad połowę efektywnego równoważnika dawki rocznej (ok. 1,4 mSv), jaką otrzymują mieszkańcy Polski.

Tabela 1.1. Parametry fizyko-chemiczne radonu (^{222}Rn) [Prz05, Dur97]

Liczba atomowa	86
Masa atomowa	222,018
Gęstość gazu (warunki normalne)	0,00973 g/cm ³
Gęstość cieczy w temp. wrzenia	4,4 g/cm ³
Elektrojemność absolutna	5,1 eV
Wartościowość	2
Zawartość w skorupie ziemskiej (litosfera + atmosfera + hydrosfera)	$6 \cdot 10^{-16} \%$
Temperatura topnienia (K)	202,1
Temperatura wrzenia (K, p = 1 atm)	211,4
Długość drogi dyfuzji dla radonu:	
w powietrzu	≈ 2,2 m
w suchej porowatej glebie	≈ 1,5 m
w glebie nasyconej wodą	≈ 0,015 m
w wodzie	≈ 0,022 m
Stała dyfuzji dla radonu:	
w powietrzu	≈ 0,1 cm ² /s
w porowatej, suchej glebie	≈ $5 \cdot 10^{-2}$ cm ² /s
w wodzie	≈ 10 ⁻⁵ cm ² /s
w mokrej glebie	≈ $5 \cdot 10^{-6}$ cm ² /s

Wszystkie trzy naturalnie występujące izotopy radonu są promieniotwórcze i rozpadają się emitując cząstki α . Powstające produkty rozpadu to ciała stałe, również α -promieniotwórcze, które łącząc się z pyłami i cząsteczkami aerozoli obecnymi w powietrzu mogą być w wyniku oddychania osadzone w układzie oddechowym człowieka, a tam rozpadając się stają się źródłem znaczącego narażenia radiologicznego.

Stężenie radonu w powietrzu atmosferycznym na otwartym terenie jest zwykle niskie – na terenie Polski zmienia się od 3 Bq/m³ do 9 Bq/m³ [Jag92]. W domach stężenie to może być znacznie wyższe (od kilku do kilku tysięcy Bq/m³, [Mam92, Zun06]), między innymi w wyniku tzw. efektu kominowego, czyli „zasysania” radonu z gruntu do wnętrza budynku pod wpływem różnicy ciśnień i temperatury. Przenikanie radonu do pomieszczeń mieszkalnych odbywa się przez szczeliny, pęknięcia, nieszczelności otworów instalacyjnych, itp. Główne drogi wnikania radonu do domu pokazano schematycznie na Rys. 1.1.



Rys. 1.1. Drogi wnikania radonu z gleby do wnętrza domu

Innym, mniej znaczącym, źródłem radonu w domach jest jego wydostawanie się ze ścian i stropów wykonanych z materiałów budowlanych, które zawsze zawierają pewne ilości radu. Generalnie można stwierdzić, że na niższych kondygnacjach budynku dominuje radon pochodzący z podłoża, zaś im wyższe piętro tym większy udział ma radon wydostający się z materiałów budowlanych stosowanych w konstrukcji budynku [Jan07, Koz06a].

Kolejnym źródłem radonu jest woda; radon bowiem uwalnia się z niej w czasie korzystania z domowych urządzeń sanitarnych (np. prysznice, wanny).

Udział radonu w powietrzu wewnątrz statystycznie reprezentatywnego budynku, przy założeniu wymiany powietrza co godzinę, wg [UNS88] przedstawiono w Tabeli 1.2:

Tabela 1.2. Procentowy udział źródeł radonu w domu [UNS88]

Źródło radonu	Udział procentowy
podłoże gruntowe	77,9 %
materiały budowlane	12,0 %
powietrze atmosferyczne	9,3 %
woda	0,2 %
gaz ziemny	0,6 %

1.2. Aspekt zdrowotny

Promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu i jego pochodnych jest odpowiedzialne za ok. 50% dawki rocznej, jaką dostaje człowiek od naturalnych i sztucznych źródeł promieniowania. Na półkuli północnej wartość tej dawki rocznej jest szacowana na ok. 2,8 mSv. Radon i jego produkty rozpadu są izotopami alfa-promieniotwórczymi co ma istotne znaczenie w aspekcie szkodliwości dla zdrowia człowieka [Rad87]. Gazowy radon, który dostał się do płuc rozpada się na izotopy (ciała stałe), które osadzają się w pęcherzykach płucnych i emitują cząstki alfa już wewnątrz organizmu – co jest bardziej niebezpieczne niż obecność samego radonu. Innym sposobem wnikania produktów rozpadu radonu do płuc jest wdychanie ich wraz z pyłami, dymem lub aerozolami, na których się osadzają. Ten aspekt obecności radonu w powietrzu nabiera szczególnego znaczenia w przypadku wyższych stężeń w pomieszczeniach, w których spędzamy większość czasu [Mni04].

Pochodne radonu nie deponują się jednolicie w układzie oddechowym - głębokość wnikania cząstki zależy od jej rozmiarów. Aerozole znajdujące się we wdychanym powietrzu są często odkładane w górnych częściach układu oddechowego lub nabłonku płucnym, skąd mogą być usunięte w ciągu kilku godzin. Jedynie najmniejsze cząstki (o średnicy poniżej 0,1 μm) trafiają do pęcherzyków płucnych. Tam zdeponowane mogą pozostawać miesiące lub lata. Cząsteczki aerozoli o dużej rozpuszczalności są szybko absorbowane z układu oddechowego do krwi, natomiast cząsteczki nierozpuszczalne są deponowane w ściankach pęcherzyków, a następnie fagocytowane przez leukocyty i przenoszone przez śródbłonek naczyń włosowatych do naczyń limfatycznych, którymi przemieszczane są do węzłów chłonnych. Czas przebywania pochodnych radonu w pęcherzykach płucnych jest długi i dlatego płuca są najbardziej narażone na działanie radonu, w szczególności przy ciągłej, zwiększonej inhalacji radonu.

Równoważnik dawki dla płuc w wyniku wdychania radonu zależy m.in. od stężenia radonu we wdychanym powietrzu, szybkości oddychania, obszaru płuc gdzie cząsteczki są zdeponowane i szybkości usuwania cząsteczek (ich średnicy, gęstości).

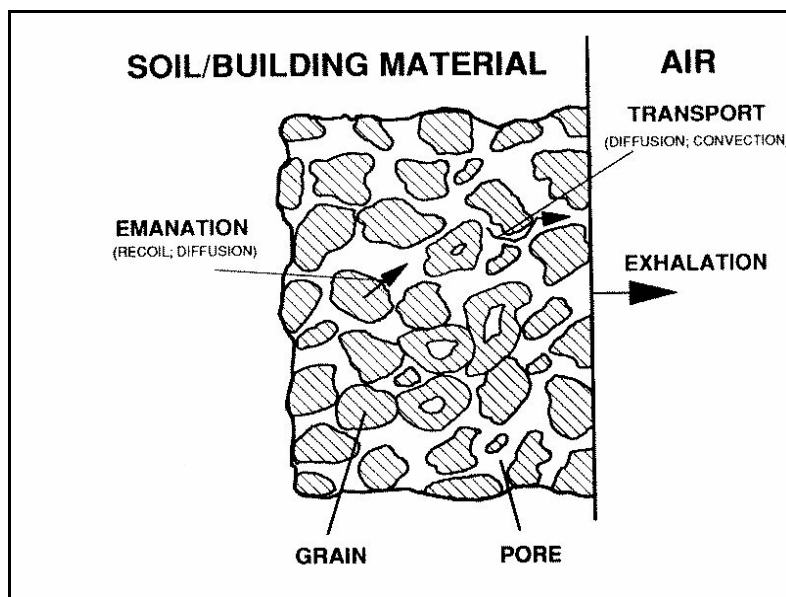
1.3. Radon w glebie

Proces rozprzestrzeniania się radonu ze skorupy ziemskiej do atmosfery można podzielić na trzy etapy:

- ✓ emanacja – uwalnianie się atomów radonu z ziaren gleby czy skał do przestrzeni międzyziarnowej;

- ✓ migracja uwolnionego radonu w przestrzeni międzyziarnowej odbywająca się w drodze dyfuzji i konwekcji;
- ✓ ekshalacja – wydostawanie się radonu z gruntu do przyziemnej warstwy powietrza

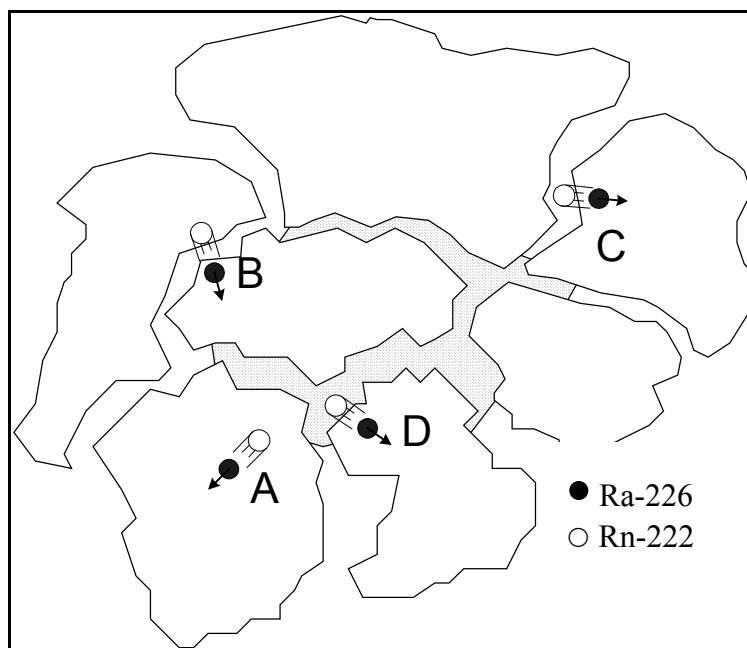
Na Rys. 1.2 przedstawiono schematycznie procesy, zachodzące na granicy gleby (lub materiału budowlanego) oraz powietrza atmosferycznego [Por93].



Rys. 1.2. Mechanizmy wydostawania się radonu z gleby lub materiału budowlanego do powietrza [Por93]

Emanacja

Atom radonu powstaje w ziarnie minerału w wyniku rozpadu atomu radu, który emituje cząstkę α . Uzyskana przez atom radonu energia odrzutu jest równa 86 keV. Energia ta jest wystarczająca na pokonanie w typowym ziarnie minerału (o normalnej gęstości) odległości od 0,04 μm do 0,06 μm ; dla ziaren SiO_2 odległość ta wynosi tylko 0,026 μm , natomiast w powietrzu 60 μm [Por93]. Jeśli więc rozpad atomu radu nastąpił dostatecznie blisko powierzchni ziarna, a atom radonu został odrzucony w kierunku tej powierzchni, to może się on wydostać do przestrzeni międzyziarnowej. W przypadku, kiedy przestrzeń ta jest wypełniona np. wodą atom radonu jest w niej „wyhamowany” i może dalej dyfundować lub być transportowany. Różne historie atomów radonu powstającego w wyniku rozpadu radu w ziarnie minerału przedstawiono na Rys. 1.3.



Rys. 1.3. „Historie” radonu powstającego w wyniku rozpadu radu w ziarnie minerału

Przypadek A dotyczy sytuacji rozpadu radu wewnątrz ziarna – energia odrzutu atomu radonu nie jest wystarczająca do wydostania się z wnętrza minerału. W sytuacji B – rozpad radu następuje blisko powierzchni ziarna, a energia odrzutu wystarcza na wydostanie się atomu radonu, pokonanie przestrzeni międzyziarnowej wypełnionej powietrzem i wniknięcie do sąsiedniego ziarna. Przypadek C i D przedstawia sytuację, gdy energia odrzutu wystarcza do wydobywania się atomu radonu do przestrzeni międzyziarnowej i dalszą swobodną migrację w przypadku, gdy przestrzeń międzyziarnowa jest wypełniona powietrzem (C) lub transport z wodą wypełniającą przestrzeń międzyziarnową (D) [Dur97].

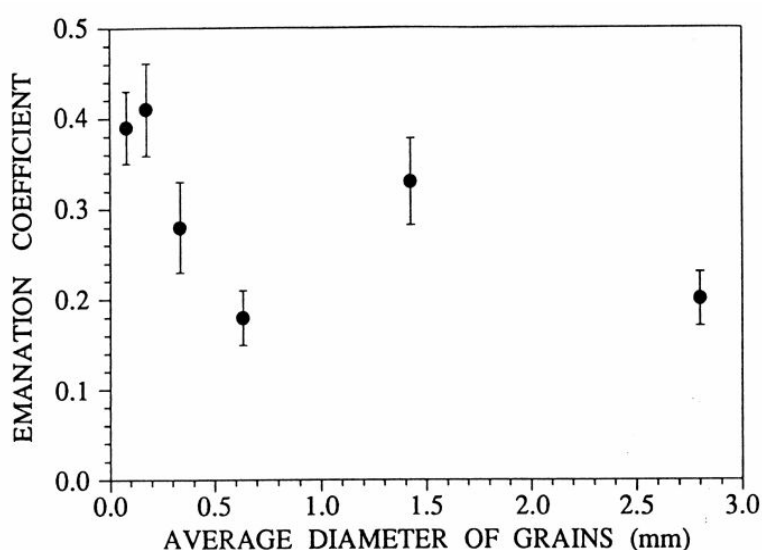
Zjawisko powyższe – uwalnianie się atomów radonu z ziaren gleby czy skał do przestrzeni pęknięć, szczelin i por w tych strukturach nazywamy **emanacją**. Parametrem opisującym emanację jest współczynnik emanacji f , który definiuje się jako stosunek ilości radonu uwalnianego z ziaren do całkowitej ilości radonu, jaki powstał z rozpadu radu w danej strukturze. Współczynnik emanacji podaje się najczęściej w procentach. Dla struktur glebowych wartość f zmienia się w zakresie od 1% do 50% dla radonu, a dla toronu jest około 5-krotnie niższa. Współczynnik emanacji radonu w materiałach budowlanych zawiera się w przedziale 0,2% – 30%, a toronu: 0,2% – 6% [Por93].

Wartość współczynnika emanacji radonu f jest zależna od różnych parametrów gleby.

Parametry te to między innymi:

- ✓ stężenie radu w glebie i skale macierzystej oraz usytuowanie jego atomów w ziarnach;
- ✓ rozmiar ziaren i ich struktura;
- ✓ porowatość gleby;
- ✓ wilgotność gleby.

W pracy *De Martino i in.* [DeM98] opisano badanie wpływu rozmiarów ziaren gleby na współczynnik emanacji dla sześciu zakresów tych rozmiarów. Wyniki przedstawiono na Rys. 1.4.



Rys. 1.4. Współczynnik emanacji jako funkcja rozmiaru ziaren gleby [DeM98]

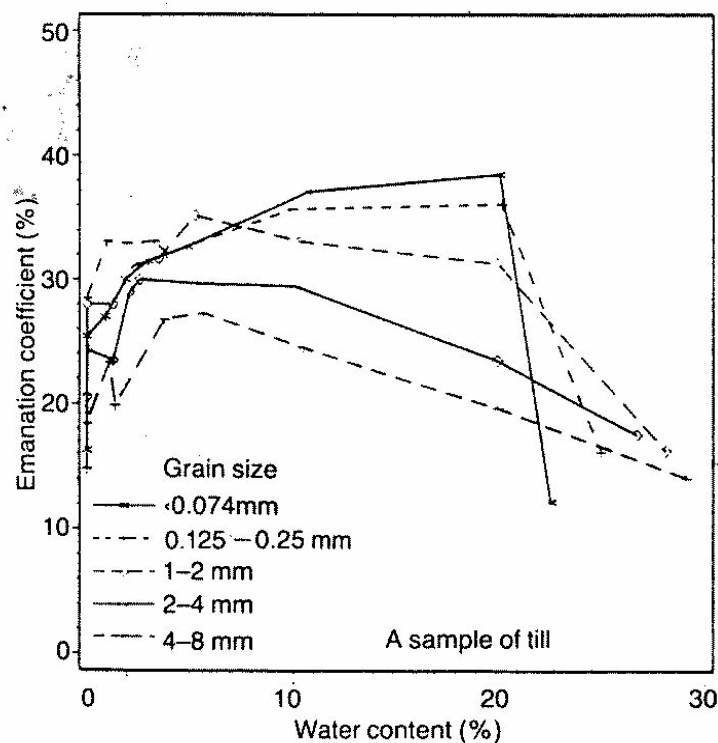
Współczynnik emanacji, jak widać, nie jest liniową funkcją rozmiaru ziaren. Dla ziaren o średnicach do 0,6 mm współczynnik emanacji maleje z rosnącym rozmiarem ziarna. Kolejne dwa punkty na wykresie „wyłamują się” z tego przebiegu, niemniej też wykazują zmniejszanie się współczynnika emanacji. Reprezentują one ziarna o średnicach powyżej 1 mm. Są to raczej „zlepki” mniejszych ziaren (ang. „aggregates”) niż pojedyncze większe ziarno. W takim przypadku przyczynki do współczynnika emanacji od tych mniejszych ziaren sumują się dając w efekcie wyższą wartość niż gdyby to było pojedyncze większe ziarno.

W pracy *Baixeras i in.* [Bai01] także stwierdzono wpływ wielkości ziaren gleby na wartość współczynnika emanacji, wyraźniejszy nawet niż wpływ stężenia uranu. Duże wartości emanacji występowały w próbce gleby o najmniejszych rozmiarach ziaren i dużym stężeniu uranu, w próbce o równie wysokiej zawartości uranu, ale o większych ziarnach

emanacja była niższa. Tłumaczono to faktem mniejszej zdolności wydostawania się atomów radonu z większych ziaren do przestrzeni porowej gleby.

Zmniejszanie się wartości współczynnika emanacji radonu dla gleb o coraz większych ziarnach (przy założeniu stałej wilgotności) opisano także w pracy *Markkanena i Arveli* [Mar92]. Efekt ten był badany w ten sposób, że próbki gliny zwałowej przesiano i utworzono kilka frakcji zależnie od granulacji: od ziaren mniejszych niż 74 μm aż do ziaren o rozmiarach 4-8 mm. Współczynnik emanacji okazał się malejącą funkcją rozmiaru ziarna dla ziaren większych od 0,5 mm. Dla mniejszych granulacji występują duże wahania współczynnika emanacji.

Kolejnym czynnikiem, który ma znaczący wpływ na współczynnik emanacji radonu, a także na stopień jego ekshalacji jest wilgotność gleby. Obecność płynu w przestrzeniach międzyziarnowych ośrodka zwiększa tzw. „direct recoil fraction” współczynnika emanacji [Str85]. Atom radonu dostający się do przestrzeni międzyziarnowej, która jest częściowo lub całkowicie wypełniona płynem będzie z większym prawdopodobieństwem wyhamowany w tej przestrzeni, bez możliwości przejścia do sąsiedniego ziarna, gdzie z kolei byłby uwięziony. To zwiększa możliwość jego migracji, podobnie jak fakt, że płyn może utrudniać adsorpcję atomów radonu na powierzchniach międzyziarnowych. Z drugiej strony, płyn obecny w porach ośrodka może redukować parametry dyfuzji radonu i jeśli pory są całkowicie zapełnione, to migracja radonu jest znacznie utrudniona. Zależnością współczynnika emanacji radonu od wilgotności gleby zajmowali się m.in. *Markkanen i Arvela* [Mar92]. W pracy tej badano także wpływ temperatury gleby na proces emanacji radonu. Zaobserwowano, że emanacja jest wyższa w próbkach z pewną ilością wody w porównaniu z próbkami całkiem suchymi. Stopień wilgotności zwiększający emanację jest oczywiście różny dla różnych typów gleby i zależy od rozmiarów ziaren. Dla żwiru, na przykład, emanacja jest największa przy wilgotności 1-2%, tj. wtedy gdy wewnętrzne pory w ziarnach są zapełnione. Natomiast w glinie, która ma bardzo drobne ziarna, potrzebna jest większa ilość wody by pokryć ich powierzchnię, tak więc maksymalna wartość współczynnika emanacji występuje przy wyższych wartościach wilgotności. Ogólny wniosek jest następujący: wilgotność, przy której emanacja jest największa, maleje gdy rozmiary ziaren są coraz większe. (Rys. 1.5).



Rys. 1.5. Wpływ wilgotności na emanację radonu dla różnych rozmiarów ziaren gleby [Mar92]

Transport radonu

Kolejnym procesem, jakiemu podlega radon, kiedy już wydostanie się z ziarna jest migracja przez środowisko szczelin, pęknięć i porów w kierunku granicy gleba/materiał budowlany – atmosfera [Swa05, Koz05]. Część atomów wydostaje się do atmosfery zanim ulegnie rozpadowi promieniotwórczemu. Główne mechanizmy transportu radonu to:

- ✓ dyfuzja spowodowana gradientem koncentracji;
- ✓ konwekcja wywołana różnicą ciśnień lub temperatur

Strumień radonu transportowany z gruntu ku powierzchni można opisywać w przestrzeni jednowymiarowej w kierunku współrzędnej z za pomocą równania różniczkowego, które obejmuje oba mechanizmy transportu i wyraża zmianę stężenia radonu w przestrzeni porowej gleby w funkcji czasu i odległości od powierzchni [Sch84]. Opis matematyczny mechanizmu transportu radonu zamieszczono w rozdziale 2.

Transport radonu zależy od parametrów gleby, takich jak: przepuszczalność, porowatość, wilgotność, temperatura, a ponadto od warunków atmosferycznych, głównie od ciśnienia atmosferycznego. Większa przepuszczalność czy porowatość gleby ułatwia dyfuzję radonu.

Spadek ciśnienia atmosferycznego również może powodować wzrost strumienia radonu wydostającego się z gleby.

Badania niektórych autorów [Sch84] wskazują, że dyfuzja molekularna jest dominującym procesem, który powoduje wydostawanie się radonu z gruntu do atmosfery. Natomiast konwekcja nabiera większego znaczenia jako mechanizm przechodzenia radonu z gleby do budynków, ze względu na różnicę ciśnień i temperatur pomiędzy budynkiem i glebą [Naz92]. Jednym z najważniejszych parametrów gleby, mającym wpływ na transport radonu jest jej przepuszczalność, określająca zdolność przepływu gazu przez to medium. Przepuszczalność powiązana jest z prędkością przepływu gazu w przestrzeni porowej gleby i z gradientem ciśnienia. Związek ten opisany jest przez prawo Darcy'ego [Naz92]. Przepuszczalność gleby zależy od jej mikroskopowych własności, m.in.: wielkości i kształtu ziaren, wielkości i kształtu porów, stopnia połączenia porów między sobą otwartymi kanalikami. Zakres wartości przepuszczalności różnych typów gleb jest bardzo szeroki (kilka rzędów wielkości). Ogólnie można powiedzieć, że gleby o bardzo małych rozmiarach ziaren, jak np. gliny czy ropy, mają wyraźnie mniejszą przepuszczalność ($10^{-15} - 10^{-16} \text{ m}^2$) w porównaniu z glebami piaszczystymi czy żwirowymi ($10^{-9} - 10^{-8} \text{ m}^2$). W glebach o małej przepuszczalności dominującym mechanizmem transportu radonu jest dyfuzja, podczas gdy w glebach o największej przepuszczalności dominuje transport drogą konwekcji [Naz92].

Przepuszczalność gleby zależy także od jej wilgotności i pozostaje w przybliżeniu stała dopóki nasycenie wilgocią (rozumiane jako ułamek objętości przestrzeni porowej wypełnionej wodą) nie przekracza 0,4. Jeśli wilgotność wzrasta ponad tę wartość, to przepuszczalność gwałtownie spada. Tłumaczy się to następująco: woda wypełnia najpierw małe pory, przez które przepływ powietrza jest relatywnie mniej ważny; dopiero przy wyższej wilgotności wypełniają się większe pory i wtedy już przepuszczalność wyraźnie maleje.

Na przepuszczalność mogą mieć wpływ też inne zjawiska, np. występujące czasem w strukturze gleby szczeliny czy pęknięcia mogą powodować, że gleba drobnoziarnista ma większą przepuszczalność niżby to wynikało z rozmiaru jej ziaren. Podobnie mogą działać duże korzenie roślin lub gatunki zwierząt żyjące w ziemi, powiększając efektywną przestrzeń porową gleby, a tym samym jej przepuszczalność [Naz92].

Ekshalacja

Wynikiem wspomnianych powyżej zjawisk – emanacji i transportu radonu w glebie – jest jego **ekshalacja** czyli uwalnianie z gleby do atmosfery. Podobnie można mówić o ekshalacji radonu ze ścian budynków, ponieważ tworzy się on również w materiałach budowlanych ze względu na rad, który w tych materiałach występuje.

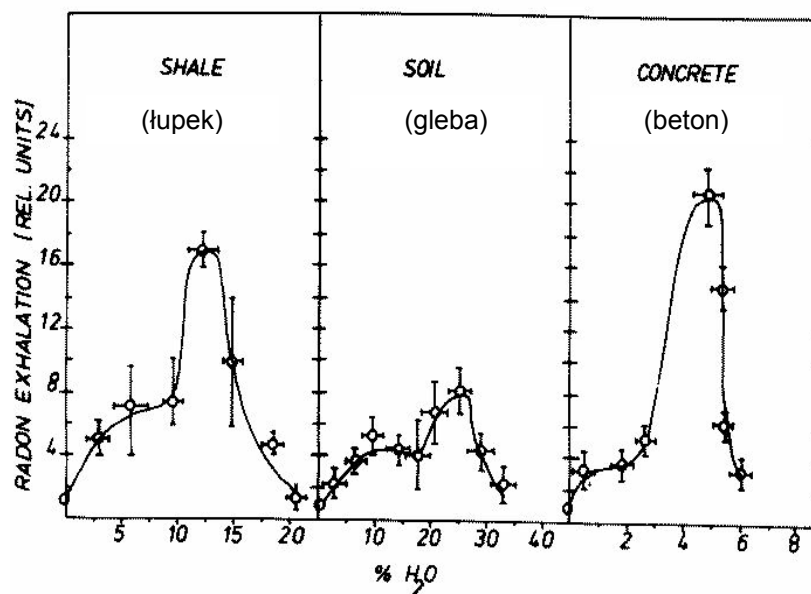
Zjawisko ekshalacji radonu charakteryzuje się poprzez określenie tzw. szybkości (lub stopnia) ekshalacji (ang. exhalation rate).

Szybkość ekshalacji [$\text{Bq/m}^2\text{s}$] definiujemy jako aktywność radonu uwalnianą z jednostkowej powierzchni w jednostce czasu. Wielkość ta jest zależna od różnych czynników, przede wszystkim tych, które wpływają na współczynnik emanacji radonu oraz na jego transport.

Są to więc:

- ✓ stężenie radu w ziarnach minerału;
- ✓ porowatość gleby;
- ✓ przepuszczalność gleby;
- ✓ wilgotność i temperatura gleby;
- ✓ czynniki meteorologiczne, takie jak: ciśnienie atmosferyczne, temperatura, prędkość wiatru, opady.

Zależność ekshalacji od wilgotności i temperatury była przedstawiona w pracy *Strandena, Kolstada i Linda*. [Str84]. Badano próbki betonu (jako dość powszechnego materiału budowlanego), łupków oraz gleby z terenów gdzie podłożem są łupki ałunowe. Te ostatnie są przyczyną podwyższonych stężeń radonu w domach. Stwierdzono, że do pewnej wartości wilgotności próbki stopień ekshalacji rośnie wraz z wilgotnością, a następnie przy wyższej wilgotności spada do poziomu takiego jak dla suchej próbki (Rys. 1.6). Powyższy wynik można wytłumaczyć faktem, wspomnianym już wcześniej, zwiększania się prawdopodobieństwa zatrzymania atomu radonu w przestrzeni porowej wypełnionej częściowo wodą, co z kolei może ułatwiać jego dalszy transport. Jeśli jednak wilgotność jest duża, to zaczyna dominować jej negatywny wpływ na współczynnik dyfuzji radonu, który w nasyconej wodą glebie wynosi $5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (dla porównania w suchej glebie wartość ta wynosi $5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$). Ta „optymalna” wartość wilgotności jest różna dla badanych próbek, co wynika z ich różnych właściwości fizykochemicznych (głównie porowatości). Jeśli porowatość próbki jest duża, to więcej wody potrzeba by zapełnić całkowicie pory i maksymalna wartość stopnia ekshalacji radonu wystąpi przy wyższej wilgotności niż w przypadku materiału o niższej porowatości.

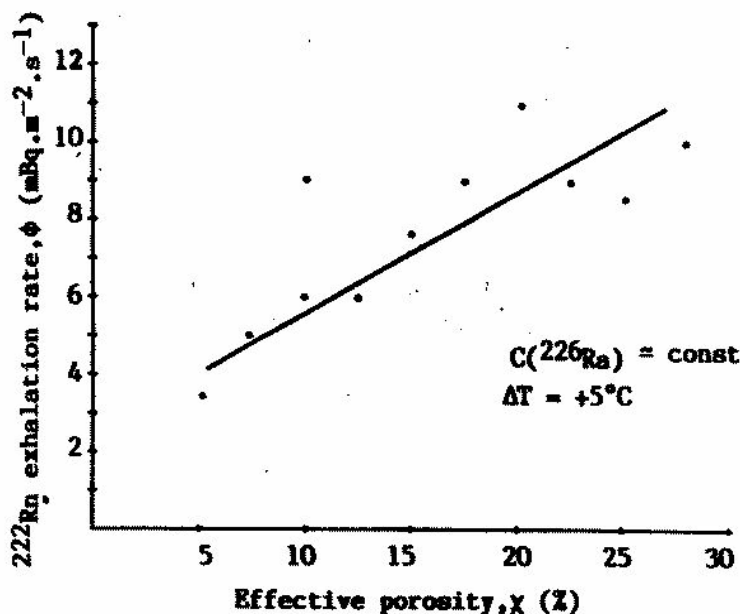


Rys. 1.6. Zależność szybkości ekshalacji radonu od wilgotności próbki [Str84]

W tej samej pracy autorzy przedstawili również wpływ temperatury próbki na ekshalację radonu. Szybkość ekshalacji była badana dla kilku wartości temperatury: 5°C, 22°C i 50°C. Stwierdzono jej wzrost z rosnącą temperaturą, chociaż ten efekt jest mniej wyraźny niż w przypadku wilgotności. Adsorpcja Van der Waals'a gazów na ciałach stałych jest zależna od temperatury. Wzrost temperatury wyraźnie zmniejsza wielkość tej adsorpcji i ten proces może być wytłumaczeniem efektu temperaturowego dla ekshalacji radonu.

Badano również zależność szybkości ekshalacji od tzw. efektywnej porowatości gleby, która jest określana jako część całkowitej objętości porów, która jest wolna i otwarta na dyfuzję i transport radonu [Kel88]. Wynik jest przedstawiony na Rys. 1.7. Inne czynniki wpływające na szybkość ekshalacji radonu – stężenie radu w glebie oraz różnica temperatur gleby i powietrza – pozostawały w przedstawionych pomiarach stałe. Jak widać, przy tych założeniach szybkość ekshalacji rośnie liniowo z efektywną porowatością gleby.

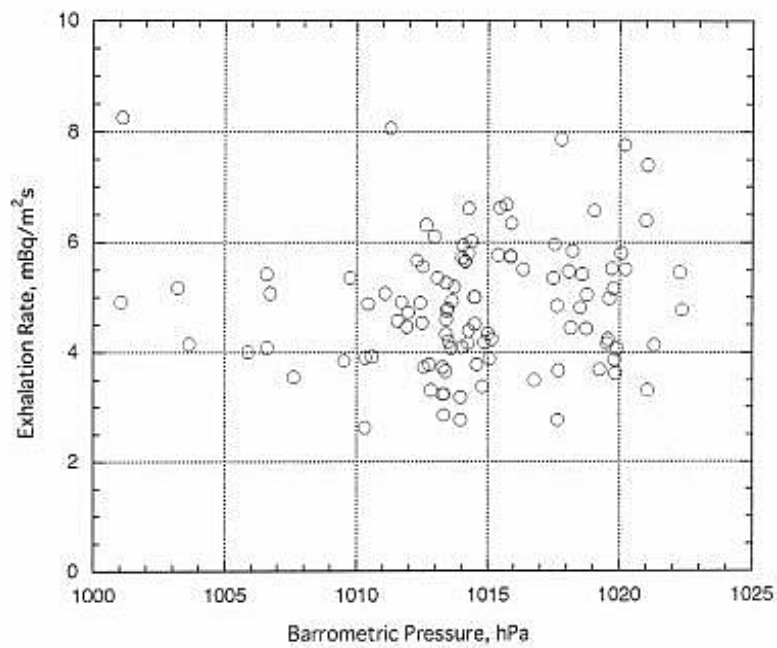
Ważnymi czynnikami wpływającymi na szybkość ekshalacji radonu z gleby są, oprócz parametrów samej gleby, warunki atmosferyczne, w szczególności ciśnienie atmosferyczne, siła i prędkość wiatru oraz opady. Zależności te badali m.in. *Kojima i Nagano* [Koj].



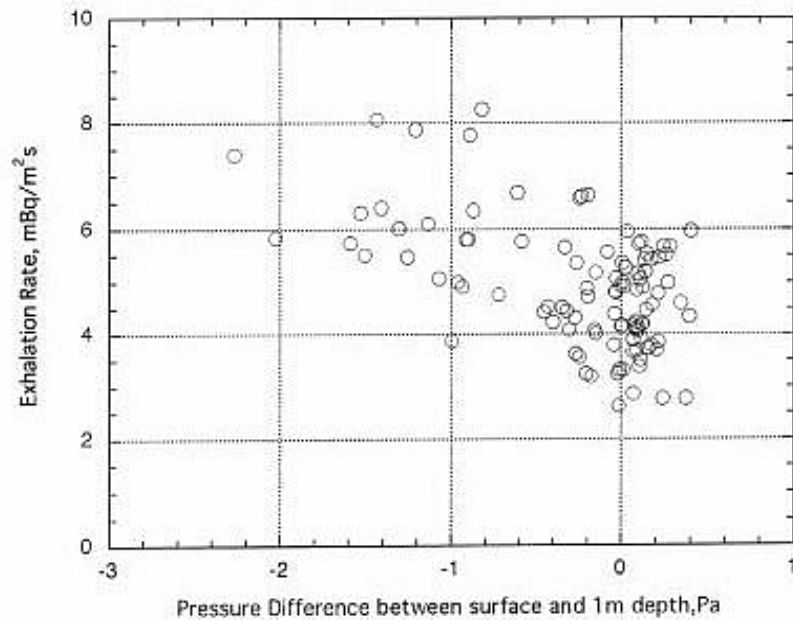
Rys. 1.7. Zależność szybkości ekshalacji radonu od efektywnej porowatości gleby [Kel88]

W pracy [Koj] przedstawiono wyniki: długoterminowych pomiarów ekshalacji radonu z gleby, jego stężenia w powietrzu glebowym na głębokościach 0,5 m, 1 m, 1,5 m, temperatury gleby na takich samych głębokościach, wilgotności gleby na głębokościach 0,2 m i 0,5 m oraz różnicy ciśnień pomiędzy powierzchnią i głębokością 1 m. W tym samym czasie rejestrowano także parametry meteorologiczne – siłę i prędkość wiatru, temperaturę i względną wilgotność powietrza oraz opady.

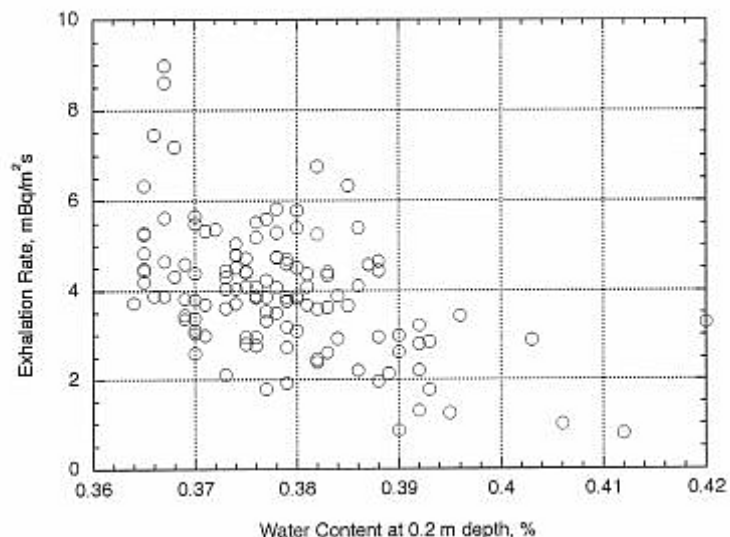
Doświadczalne wyniki zależności szybkości ekshalacji od ciśnienia atmosferycznego pokazane są na Rys. 1.8. Jak widać zależność ta nie wykazuje korelacji. Lepsza korelacja występuje pomiędzy szybkością ekshalacji a różnicą ciśnień pomiędzy powierzchnią a głębokością 1 m (Rys. 1.9). Na Rys. 1.10 przedstawiono zależność pomiędzy szybkością ekshalacji i wilgotnością gleby na głębokości 0,2 m. Widać tendencję spadkową szybkości ekshalacji z rosnącą wilgotnością gleby. Wynik ten nie potwierdza rezultatów otrzymanych przez autorów pracy [Str84]. Na Rys. 1.11 pokazano średnie wartości szybkości ekshalacji oraz różnicę ciśnień między powierzchnią a głębokością 1 m. Pomiary wykonywano w tych samych godzinach w ciągu doby przez okres 3 tygodni. Maksymalna wartość szybkości ekshalacji występowała około południa, wtedy notowano też najniższą różnicę ciśnień. Świadczy to o występowaniu wahań dobowych szybkości ekshalacji, wynikających z różnicy temperatury gleby i powietrza.



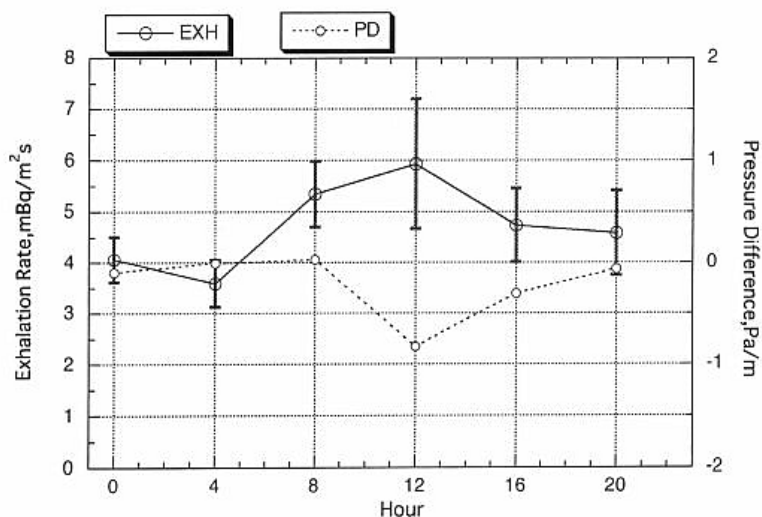
Rys. 1.8. Zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a ciśnieniem atmosferycznym [Koj]



Rys. 1.9. Zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a różnicą ciśnień [Koj]



Rys. 1.10. Zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a wilgotnością gleby [Koj]



Rys. 1.11. Dobowe zmiany szybkości ekshalacji i różnicy ciśnień [Koj]

Jak wynika z powyższych rozważań problem transportu radonu w glebie, a następnie wydostawania się do atmosfery jest złożony. Istniejące dane literaturowe nie dają pełnego obrazu tych zjawisk. Przedstawione wyniki są najczęściej efektem pomiarów jedynie wybranych parametrów wpływających na transport lub ekshalację radonu albo pomiarów większej ilości tych parametrów lecz w ograniczonym, stosunkowo krótkim okresie czasu. W ramach tej pracy podjęto próbę uzupełnienia tego stanu wiedzy poprzez zbadanie procesu ekshalacji w dłuższym okresie czasu w powiązaniu z warunkami meteorologicznymi.

2. MATEMATYCZNY OPIS ZJAWISKA EKSHALACJI RADONU Z GLEBY

2.1. Mechanizmy transportu radonu

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, zjawiska transportu radonu w glebie oraz jego ekshalacji są złożone i zależne od wielu czynników, nie zawsze dających się ująć ilościowo. Zatem opis matematyczny tych procesów wymaga przyjęcia pewnych założeń. Według *Nazaroffa* [Naz92] przedstawiają się one następująco:

1. Gleba jest jednorodna pod względem:
 - stężenia radu,
 - współczynnika emanacji radonu,
 - porowatości,
 - współczynnika dyfuzji radonu,
 - przepuszczalności
2. Powietrze jest traktowane jako nieściśliwe z wyjątkiem efektu wyporu hydrostatycznego

Zakłada się, że strumień radonu transportowany jest z głębi gleby ku powierzchni. Można go więc opisywać w przestrzeni jednowymiarowej w kierunku współrzędnej z za pomocą równania różniczkowego wyrażającego zmianę stężenia C radonu w przestrzeni porowej gleby w czasie t i w odległości z od powierzchni na skutek dyfuzji i konwekcji:

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = D \nabla^2 C_a + \frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \nabla C_a - \lambda_{Rn} C_a + \phi \quad (1)$$

gdzie:

C_a – stężenie radonu w przestrzeni porowej gleby [l. atomów·m⁻³]

D – współczynnik dyfuzji radonu w glebie [m²·s⁻¹]

k – przepuszczalność gleby [m²]

η - lepkość dynamiczna [g·m⁻¹·s⁻¹]

$\partial p / \partial z$ – różnica ciśnień na powierzchni gleby i na głębokości z [Pa]

λ_{Rn} – stała rozpadu radonu [s⁻¹]

ϕ – człon źródłowy odpowiedzialny za produkcję radonu [l. atomów·m⁻³·s⁻¹]

W dalszej części rozdziału przyjmuje się, że głównym zjawiskiem odpowiedzialnym za transport radonu jest dyfuzja i ograniczono się do matematycznego opisu dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby.

2.2. Matematyczny opis dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby

Równanie opisujące dyfuzyjny transport radonu w przestrzeni porowej gleby można uzyskać pomijając we wzorze (1) człon opisujący konwekcję ($\frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \nabla C_a$). Uwzględniając fakt, że przestrzeń porowa gleby składa się z części wypełnionej powietrzem i części wypełnionej wodą (w których transport radonu zachodzi w odmienny sposób) oraz biorąc pod uwagę także zjawisko adsorpcji atomów radonu na powierzchni ziaren gleby można rozwinąć równanie (1) w następujący sposób [Naz92]:

$$[\varepsilon_a + \kappa\varepsilon_w + \rho K] \frac{\partial C_a}{\partial t} = \varepsilon_a D \nabla^2 C_a - \lambda_{Rn} C_a [\varepsilon_a + \kappa\varepsilon_w + \rho K] + f A_{Ra} \lambda_{Rn} \rho \quad (2)$$

gdzie:

$\varepsilon_{a,w}$ – porowatość, odpowiednio „powietrzna” i „wodna” (tj. część przestrzeni porowej zajęta przez powietrze lub wodę, porowatość całkowita $\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_w$)

κ – współczynnik podziału radonu między fazę „powietrzną” i „wodną” przestrzeni porowej

K – współczynnik podziału radonu między fazę „powietrzną” a zaadsorbowaną na powierzchni ziaren gleby [m^3/kg]

ρ – gęstość gleby [kg/m^3]

λ_{Rn} – stała rozpadu radonu ^{222}Rn ($2,1 \times 10^{-6} s^{-1}$)

f – współczynnik emanacji radonu

A_{Ra} – stężenie radu w glebie [Bq/kg]

Człon ϕ z równania (1) odpowiadający za produkcję radonu w glebie został opisany wyrażeniem $f A_{Ra} \lambda_{Rn} \rho$.

Rozwiązanie równania (2) dla stanu równowagi ($\partial C / \partial t = 0$) daje w wyniku stężenie radonu w powietrzu glebowym na głębokości z' poniżej powierzchni:

$$C_a(z') = C_\infty (1 - e^{-z'/g}) \quad (3)$$

gdzie:

$$C_\infty = \frac{A_{Ra} f \rho}{(\varepsilon_a + \kappa\varepsilon_w + K\rho)} \quad (4)$$

$$g = \left[\frac{D_e}{\lambda_{Rn}} \right]^{1/2} \left[\frac{\varepsilon_a}{(\varepsilon_a + \kappa\varepsilon_w + K\rho)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Wielkość C_∞ reprezentuje stężenie radonu w powietrzu glebowym na dużych głębokościach ($z' \gg \vartheta$), zaś wielkość ϑ jest „długością drogi dyfuzji” radonu w glebie (odległością, którą atom radonu może przebyć w czasie swego „życia”). W suchej i mało wilgotnej glebie (gdzie nasycenie przestrzeni porowej wodą $S < 0,4$) długość drogi dyfuzji dla ^{222}Rn wynosi 1 – 1,5 m, zaś dla ^{220}Rn wynosi ok. 1 cm. W glebie mocno nasyconej wodą ($S > 0,5$) wartości te są znacznie mniejsze (ze względu na duży spadek wartości współczynnika dyfuzji radonu). Stężenie radonu w glebie zmienia się nawet w krótkich okresach czasu, a zmiany sezonowe mogą sięgać nawet jednego rzędu wielkości. Można je przypisać czasowym zmianom wilgotności i temperatury gleby, które wpływają na współczynnik emanacji radonu, na porowatość efektywną gleby i na współczynniki podziału κ i K [Naz92].

Zgodnie z prawem Ficka gęstość dyfuzyjnego strumienia radonu w przestrzeni porowej gleby J_s^d [Bq/m²s] jest proporcjonalna do gradientu stężenia radonu C_a :

$$J_s^d = -D \cdot \nabla C_a$$

Gęstość dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby do powietrza można potraktować jako miarę szybkości ekshalacji radonu z gleby. W pracy *Nazaroffa* [Naz92] przedstawiono sposób wyprowadzenia równania opisującego dyfuzyjny strumień radonu z gleby do atmosfery J^d poprzez wykorzystanie zależności (3) oraz prawa Ficka:

$$J^d = A_{Ra} f \rho (\lambda_{Rn} D)^{1/2} \left[\frac{\varepsilon_a}{(\varepsilon_a + \kappa \varepsilon_w + K \rho)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

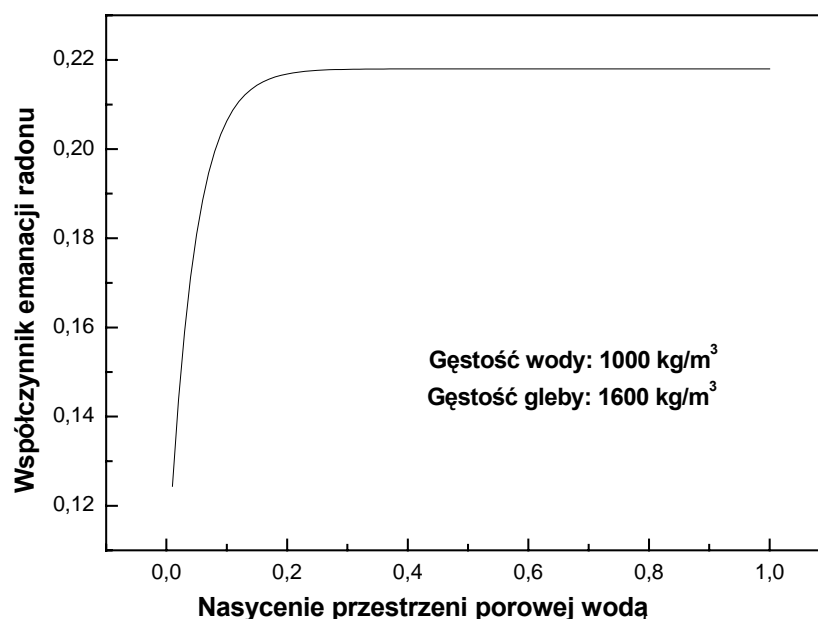
Do celów niniejszej pracy podjęto próbę uwzględnienia w tych równaniach parametrów gleby, takich jak wilgotność i temperatura, które wpływają na wielkość strumienia radonu z gleby. Dwie wielkości występujące w równaniu (6), tj. współczynnik emanacji radonu f oraz współczynnik dyfuzji radonu w glebie D są funkcjami wilgotności gleby, natomiast współczynniki κ i K są zależne od temperatury. W pierwszym etapie badano zależność gęstości strumienia radonu J^d jedynie od wilgotności gleby, zakładając brak zależności od temperatury (wyrażony przez współczynniki κ i K). Człon $\left[\frac{\varepsilon_a}{(\varepsilon_a + \kappa \varepsilon_w + K \rho)} \right]^{1/2}$ redukuje się zatem do jedności i wzór (6) można wyrazić w postaci:

$$J^d = A_{Ra} \cdot f \cdot \rho \cdot \sqrt{\lambda_{Rn} \cdot D} \quad (7)$$

W pracy [Bos03] przedstawiono empiryczną zależność współczynnika emanacji radonu f od wilgotności gleby, wyrażonej jako stopień nasycenia przestrzeni porowej wodą S :

$$f = 0,1 + 0,118 \cdot \left(1 - e^{-37 \cdot S \cdot \frac{\rho_w}{\rho}} \right) \quad (8)$$

Takie określenie wilgotności gleby (jako S) będzie stosowane w dalszej części rozdziału. W powyższym wzorze ρ_w oraz ρ oznaczają odpowiednio gęstość wody i gleby. Do dalszych obliczeń przyjęto $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$. Rys. 2.1 ilustruje przykładowy przebieg powyższej zależności dla określonych wartości gęstości wody (1000 kg/m^3) i gleby (1600 kg/m^3).



Rys. 2.1. Przykładowy teoretyczny przebieg zależności współczynnika emanacji radonu od wilgotności gleby

Podstawiając w równaniu (7) powyższą zależność w miejsce współczynnika emanacji f otrzymujemy:

$$J^d = A_{Ra} \cdot \rho \cdot \left[0,1 + 0,118 \left(1 - \exp\left(-37 \cdot S \cdot \frac{\rho_w}{\rho}\right) \right) \right] \cdot \sqrt{\lambda_{Rn} \cdot D} \quad (9)$$

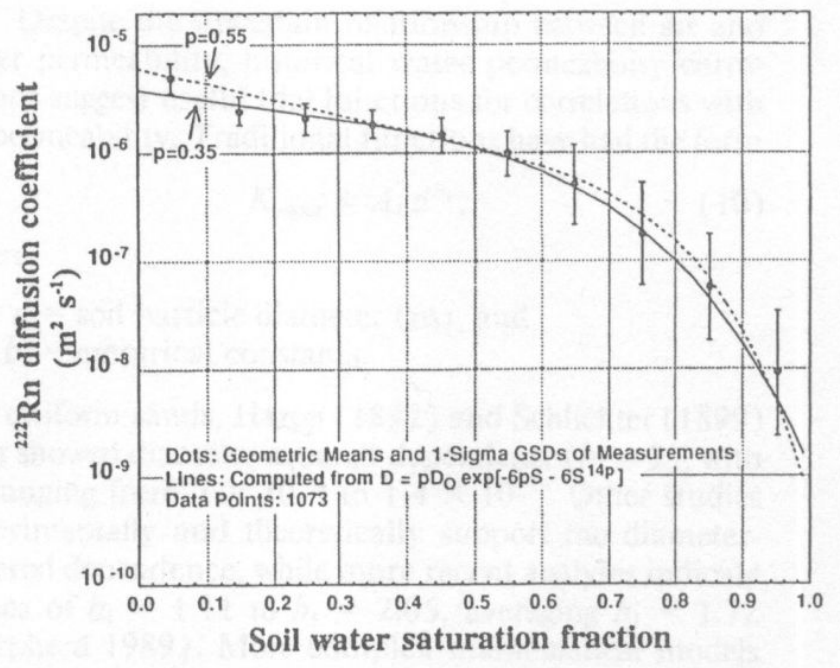
Współczynnik dyfuzji D jest także zależny od wilgotności gleby. W pracy [Rog91] autorzy podają zależność tego współczynnika od wilgotności S i całkowitej porowatości gleby ε :

$$D = D_0 \cdot \varepsilon \cdot \exp(-6S\varepsilon - 6S^{14\varepsilon}) \quad (10)$$

gdzie:

D_0 – współczynnik dyfuzji radonu w powietrzu ($1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

Rys. 2.2 ilustruje przebieg D w zależności od S (zgodnie z powyższym równaniem) oraz położenie zmierzonych wartości D . Parametr p na rysunku oznacza całkowitą porowatość ε w równaniu (10).



Rys. 2.2. Zależność współczynnika dyfuzji radonu D od wilgotności gleby S [Rog91]

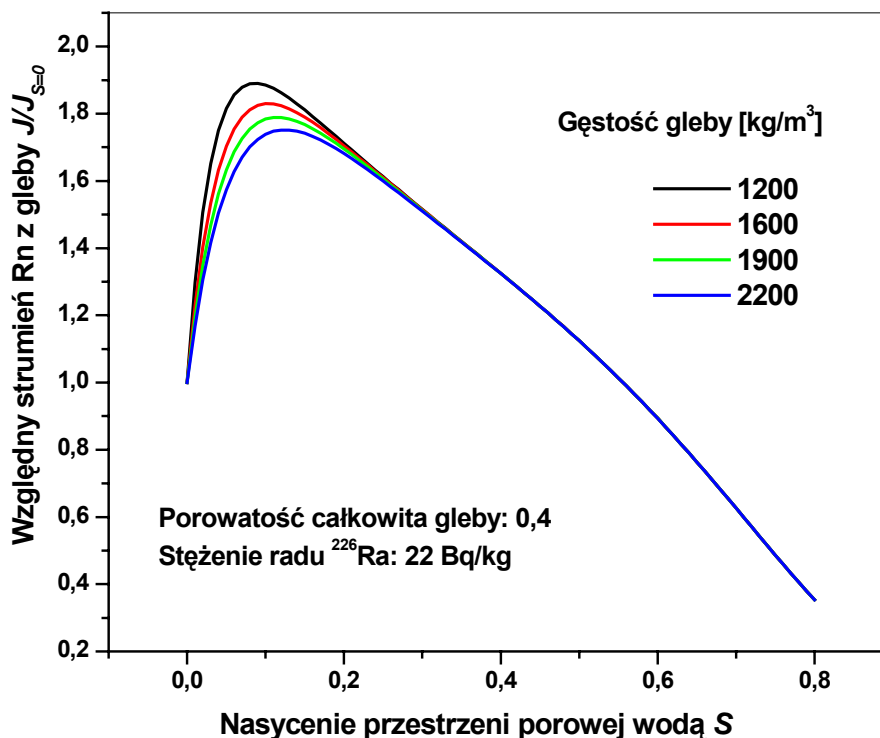
Wyrażając porowatość „powietrzną” gleby jako: $\varepsilon_a = \varepsilon(1-S)$ otrzymuje się następującą postać zależności opisującej gęstość strumienia dyfuzyjnego radonu z gleby J^d w funkcji gęstości, porowatości i wilgotności gleby:

$$J^d = A_{Ra} \cdot \rho \cdot [0,1 + 0,118(1 - \exp(-37 \cdot S \cdot \rho_w / \rho))] \cdot \sqrt{\lambda_{Rn} \cdot D_0} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \exp(-6S\varepsilon - 6S^{14\varepsilon})} \quad (11)$$

2.3. Teoretyczne przebiegi zmian dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby

Zależność (11) można potraktować jako teoretyczny opis zależności zjawiska ekshalacji radonu z gleby od gęstości i porowatości gleby, a także od jej wilgotności, która z kolei ma związek z warunkami meteorologicznymi (opady, temperatura, wiatr). Graficzny obraz tej zależności przedstawiają Rysunki 2.3 i 2.4. Przedstawiono na nich przebieg względnej wartości gęstości strumienia radonu z gleby $J/J_{S=0}$ (znormalizowanego do wartości dla suchej gleby, $S = 0$) od procentowej wartości nasycenia przestrzeni porowej wodą S . Wartości strumieni J i $J_{S=0}$ obliczono według wzoru (11).

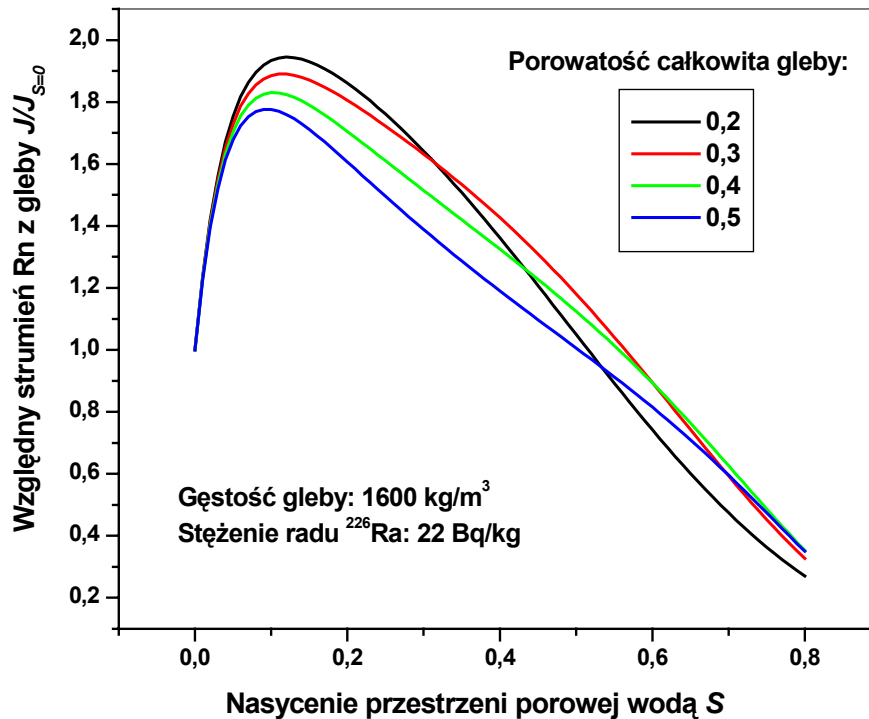
Na Rys. 2.3 parametrem zmiennym jest gęstość gleby (w zakresie od 1200 do 2200 kg/m³, typowym dla gleb w Polsce), porowatość całkowitą gleby przyjęto równą 0,4.



Rys. 2.3. Zależność względnego strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: gęstość gleby)

Strumień radonu z gleby o niskim nasyceniu porów wodą ($S < 0,15$) jest wyższy niż w przypadku gleby suchej (Rys. 2.3). Wzrost nasycenia powyżej 0,6 powoduje silne zmniejszenie strumienia radonu w stosunku do jego wartości dla gleby suchej. Z wykresu widać, że zmienność gęstości gleby nie ma znaczącego wpływu na wielkość strumienia radonu.

Rys. 2.4 przedstawia analogiczną zależność względnego strumienia radonu z gleby $J/J_{S=0}$ od wilgotności gleby (S), jednakże tutaj parametrem zmiennym jest porowatość całkowita gleby (w zakresie od 0,2 do 0,5) natomiast ustalono gęstość gleby (1600 kg/m³). Na rysunku widać duży wpływ porowatości gleby na wielkość strumienia radonu, zwłaszcza dla wilgotności S powyżej 0,1. Maksymalna różnica gęstości strumienia radonu występuje przy wilgotności gleby w zakresie od 0,1 do 0,4 (np. w glebie o porowatości 0,3 i wilgotności 0,4 gęstość strumienia radonu osiąga ok. 1,5 wartości tego strumienia dla suchej gleby natomiast przy takiej samej wilgotności z gleby o porowatości 0,5 strumień radonu wynosi ok. 1,2 wartości dla suchej gleby). Najwyższą wartość (powyżej 1,9 w stosunku do suchej gleby) ma gęstość strumienia radonu z gleby o porowatości 0,2 przy wilgotności około 0,1.



Rys. 2.4. Zależność względnego strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: porowatość gleby)

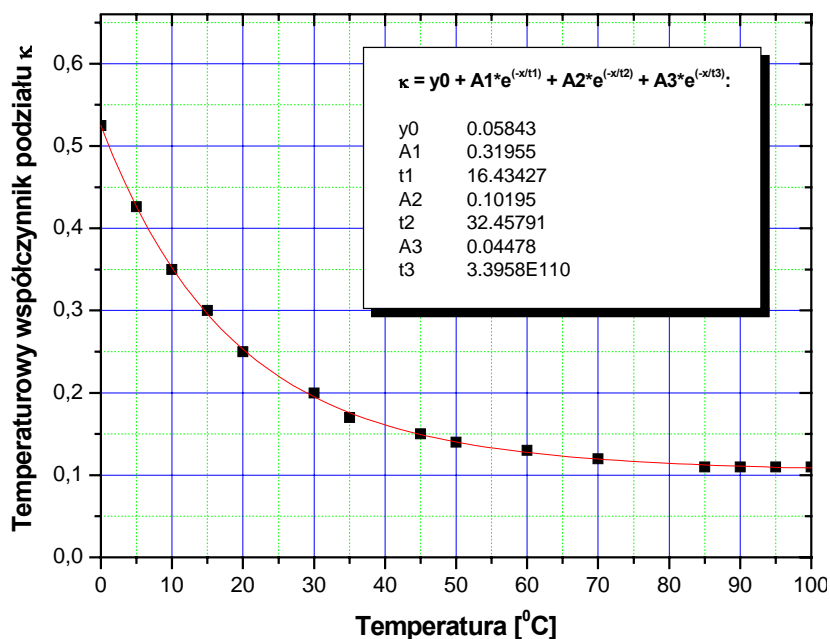
W celu zbadania wpływu temperatury gleby na wartość gęstości strumienia radonu wpływającego z niej zastosowano przytoczony wcześniej wzór (6), w którym rozbudowany jest człon opisujący porowatość gleby [Naz92].

We wzorze tym współczynniki κ oraz K są zależne od temperatury gleby. Współczynnik κ podziału radonu między fazę „powietrzną” i „wodną” przestrzeni porowej jest znaną funkcją temperatury T . Wzór opisujący tę zależność uzyskano dopasowując metodą najmniejszych kwadratów funkcję wykładniczą w oparciu o dane z pracy [Cle85]:

$$\kappa = 0,05843 + 0,31955 \cdot e^{(-T/16,43427)} + 0,10195 \cdot e^{(-T/32,45791)} + 0,04478 \cdot e^{(-T/3,3958E+110)} \quad (12)$$

Przebieg tej funkcji przedstawia Rys. 2.5.

Można przyjąć, że charakter zależności współczynnika K od temperatury jest analogiczny jak w przypadku zjawiska adsorpcji atomów radonu na węglu aktywnym.



Rys. 2.5. Zależność współczynnika κ podziału radonu między fazę „powietrzną” a „wodną” od temperatury

W pracy *Pojera i in.* [Poj90] przedstawiono zależność współczynnika adsorpcji radonu na węglu k w postaci funkcji eksponencjalnej:

$$k \approx e^{Q/RT}$$

gdzie:

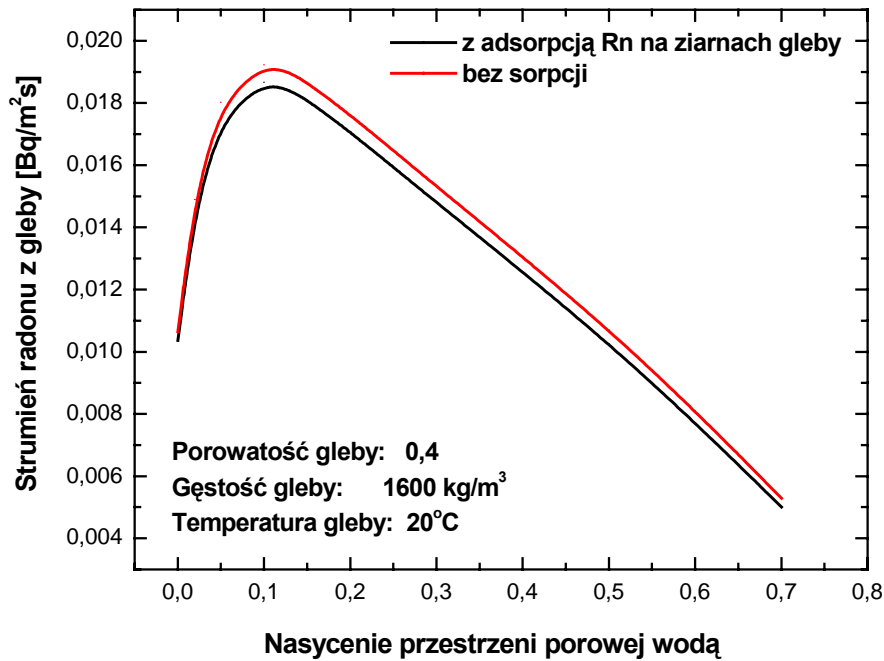
Q – ciepło adsorpcji ^{222}Rn na węglu

R – stała gazowa ($8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)

T – temperatura w stopniach Kelvina

Poniżej omówiono wpływ adsorpcji atomów radonu na ziarnach gleby w przestrzeni porowej. Rys. 2.6 pokazuje strumień radonu z gleby w funkcji jej wilgotności (nasylenia przestrzeni porowej wodą S) – dla ustalonych, najbardziej typowych parametrów gleby oraz dla konkretnych wartości współczynników κ i K : $\kappa = 0,25$, $K = 1,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ [Naz92]. Jak widać, uwzględnienie adsorpcji atomów radonu na ziarnach gleby zmniejsza wartość wypływającego z powierzchni gleby strumienia tego gazu o około 3% dlatego też, w dalszych rozważaniach zaniechano wpływ adsorpcji radonu na powierzchni ziaren w przestrzeni porowej gleby.

Wpływ temperatury gleby rozpatrywano zatem uwzględniając jedynie zależność współczynnika κ (tzn. podział radonu między fazę „powietrzną” a „wodną”) od temperatury.

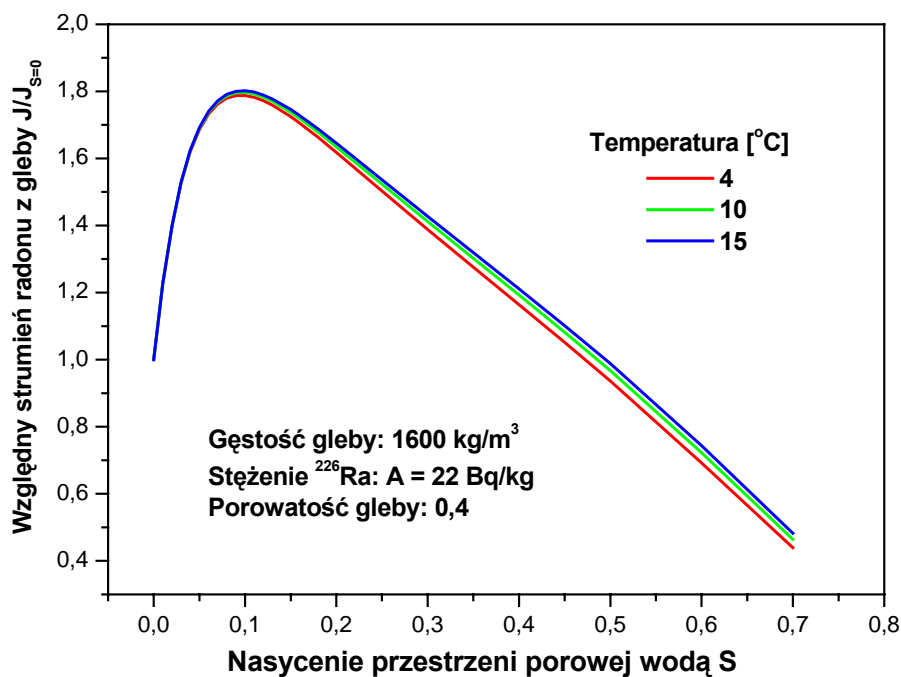


Rys. 2.6. Zależność strumienia radonu z gleby od nasylenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: wielkość adsorpcji atomów radonu na ziarnach gleby).

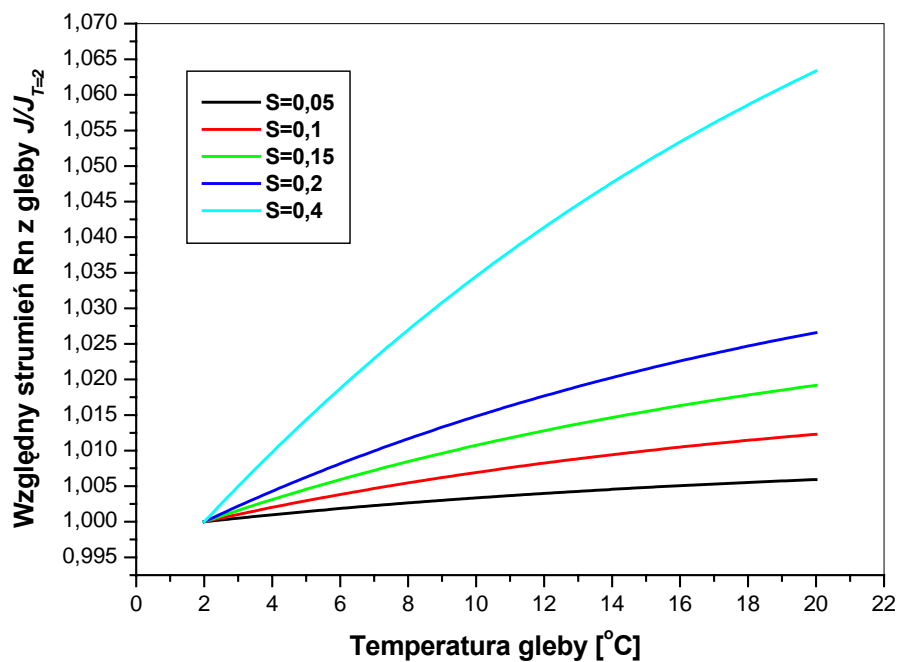
Wzór (6) można rozwinąć wstawiając w miejsce współczynnika emanacji f oraz współczynnika dyfuzji D przedstawione wcześniej zależności tych parametrów od wilgotności gleby:

$$J^d = A_{Ra} \cdot \rho \cdot \sqrt{\lambda_{Rn} D_0} \cdot [0,1 + 0,118 \cdot (1 - \exp(-37 \cdot S \cdot \rho_w / \rho))] \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon(1-S) \cdot \exp(-6S\varepsilon - 6S^{14\varepsilon})}{1 + S(\kappa - 1)}} \quad (13)$$

Opierając się na wzorze (13) i zależności (12) oraz ustalając gęstość gleby równą 1600 kg/m^3 i porowatość całkowitą równą $0,4$ przedstawiono graficznie zależność względnej wartości strumienia radonu od wilgotności gleby wyrażonej przez wartość S dla kilku wartości jej temperatury (Rys. 2.7). Obserwowany jest wpływ temperatury gleby na wartość strumienia wypływającego radonu. Największe różnice pomiędzy strumieniem wypływającym z gleby o temperaturze 4°C i o temperaturze 15°C występują dla wilgotności gleby równej $0,5$ i $0,6$ i wynoszą około 6% wartości strumienia obliczonego dla suchej gleby.



Rys. 2.7. Zależność względnego strumienia radonu z gleby od nasycenia przestrzeni porowej gleby wodą (parametr: temperatura gleby)



Rys. 2.8. Zależność względnego strumienia radonu z gleby od temperatury gleby (parametr: nasycenie przestrzeni porowej gleby wodą S)

Na Rys. 2.8 przedstawiono zależność względnego strumienia radonu (J^d) z gleby od temperatury gleby (T). Względny strumień radonu znormalizowano do wartości strumienia dla najniższej obserwowanej w trakcie pomiarów temperatury gleby ($T = 2^\circ\text{C}$). Obliczenia przeprowadzono wykorzystując wzór (13), w którym ustalono (podobnie jak w poprzednich rozważaniach) następujące własności gleby: gęstość 1600 kg/m^3 i porowatość całkowitą $0,4$. Zależność względnego strumienia od temperatury przedstawiono dla wartości S równych $0,05$; $0,1$; $0,15$; $0,2$ i $0,4$. Widać, że wpływ temperatury gleby na wielkość strumienia radonu jest mniejszy niż wpływ wilgotności gleby i uwidacznia się wyraźniej przy wyższych wartościach wilgotności. Jest to potwierdzenie wyniku przedstawionego na Rys. 2.7. Dla wartości $S = 0,4$ gęstość strumienia J^d wzrasta o 6% przy wzroście temperatury od 2°C do 20°C . Ten sam wzrost temperatury powoduje zwiększenie się wartości J^d tylko o około $0,6\%$ jeśli $S = 0,05$.

Przedstawione powyżej rozważania dotyczą sytuacji teoretycznej, a więc bardzo uproszczonej w stosunku do rzeczywistych warunków środowiskowych. Wszystkie przedstawione modele stosują upraszczające założenia nie uwzględniające wpływu „zewnętrznych” czynników meteorologicznych na badany proces. Uzupełnienie i rozbudowanie wzorów opisujących strumień radonu z gleby pozwoliło na powiązanie strumienia bezpośrednio z temperaturą gleby i nasyceniem przestrzeni porowej gleby wodą. Wykresy przedstawiają zmiany strumienia radonu z gleby obliczone w oparciu o model zakładający jedynie dyfuzyjny transport radonu. Dyfuzja jako mechanizm transportu radonu dominuje w przypadku granicy gleba-atmosfera, jednakże w rzeczywistości nie można wykluczyć całkowicie mechanizmu konwekcyjnego. Drugim istotnym uproszczeniem jest założenie stałej temperatury gleby w profilu pionowym. Mierzone w ramach wykonanej pracy wartości temperatury w glebie na kilku głębokościach (10 cm , 40 cm , 70 cm i 100 cm) wskazują na jej zmienność w zakresie kilku stopni Celsjusza w miesiącach jesienno-zimowych lub nawet kilkunastu stopni Celsjusza w miesiącach wiosennych.

Podsumowując przedstawiony teoretyczny opis zjawiska ekshalacji radonu z gleby (jako matematyczne przedstawienie dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby) można stwierdzić, że proces ten zależny jest w dużym stopniu od wilgotności gleby, a także w mniejszym stopniu od jej temperatury. Przedstawione zależności funkcyjne (Rys. 2.3, 2.4, 2.6, 2.7) nie mają charakteru monotonicznego, co świadczy o złożoności procesu ekshalacji radonu. Konsekwencje takich zmienności odzwierciedlą się przy analizie wyników eksperymentalnych, co będzie przedstawione w dalszej części pracy.

Kolejne rozdziały pracy poświęcono próbie odpowiedzi na pytanie jaki wpływ na szybkość ekshalacji radonu z gleby mają czynniki meteorologiczne zmieniające bezpośrednio wilgotność i temperaturę gleby, czyli kluczowe jej własności wpływające z kolei na zjawisko ekshalacji radonu. Podobnie jak przedstawione powyżej wyniki teoretyczne również rzeczywiste zależności nie są prostymi zależnościami liniowymi.

3. WYBRANE METODY STOSOWANE W POMIARACH RADONU

3.1. Pomiar współczynnika emanacji radonu

Opisane w różnych pracach metody pomiaru współczynnika emanacji radonu opierają się na jego definicji, tzn. polegają na określeniu ilości radonu wydostającego się z ziaren materiału w stosunku do całkowitej ilości, powstałej w ziarnie.

Większość metod można zaliczyć do tzw. metod akumulacyjnych – próbkę materiału (gleby, skały, materiału budowlanego) umieszcza się w szczelnym pojemniku i bada po jakimś czasie ilość radonu zebranego w pojemniku, która porównana z ilością radu obecnego w próbce (a więc ilością wyprodukowanego radonu) stanowi miarę współczynnika emanacji [Bai01, Mar92, Fer02, DeM98].

Baixeras i in. [Bai01] badali współczynnik emanacji radonu z próbek gleby pobranych w rejonie Barcelony w Hiszpanii oraz w okolicach Lund w Szwecji. Rodzaj gleby był typowy dla danego regionu. Każda próbka została wysuszona i umieszczona w plastikowym pojemniku o objętości 1 l. Rozmiary pojemnika zostały tak dobrane, aby minimalizować rejestrację śladów pochodzących od toronu. Każdy pojemnik był napełniany próbką gleby do około 60% objętości. Detektory śladowe (folie LR-115 firmy Kodak) były umieszczane na wewnętrznej stronie pokrywy pojemnika. Zamknięte pojemniki umieszczano jeszcze w plastikowych, szczelnych torbach i pozostawiano na okres 15-23 dni. Po tym czasie odczytywano detektory śladowe i określano stężenie radonu w pojemniku. Jednocześnie dla każdej próbki określano stężenie uranu ^{238}U i toru ^{232}Th metodą spektrometrii promieniowania gamma. Stosunek stężenia radonu w pojemniku do stężenia uranu w próbce stanowił miarę współczynnika emanacji. Uzyskane wartości zawierają się w granicach od 0,2% do ponad 22%.

Emanację radonu badali także *Markkanen i Arvela*, [Mar92]. Przedstawili oni wyniki dla 400 próbek gleby. Przebadano próbki gleby z terenów przeznaczonych pod planowane budowy. Wiele próbek pochodziło z miejsc, gdzie spodziewano się wysokich stężeń radu w podłożu (południowa Finlandia). Współczynnik emanacji radonu określano jako stosunek stężenia radu (Ra-226) w próbce do stężenia radonu (Rn-222) uwolnionego z próbki. Uzyskane średnie wartości współczynnika emanacji mieściły się w granicach od 17% (dla piasku) do 24% (dla gliny).

Nieco inną odmianę metody „akumulacyjnej” pomiaru współczynnika emanacji radonu w skałach przedstawili *Ferry i in.*[Fer02]. W tej metodzie narastanie stężenia radonu przez 21 dni w zamkniętym pojemniku zawierającym próbkę jest w sposób ciągły

monitorowane za pomocą komory jonizacyjnej aktywnego miernika radonu AlphaGUARD. Pojemnik z próbką jest metalowym cylindrem, który w czasie pomiaru jest przykręcony do okienka komory jonizacyjnej. Próbka skały w kształcie cylindrycznego „plastra” jest umieszczona w pojemniku przy okienku komory jonizacyjnej. Grubość próbki musi być dobrana w taki sposób, by spełnić dwa warunki: musi być mała w porównaniu z długością drogi dyfuzji w badanej skale (ok. 1 cm) i jednocześnie na tyle duża by stanowić odpowiednio „silne” źródło radonu, co zmniejszy błąd określenia jego stężeń. Badane próbki miały grubości: 2,0 cm, 1,0 cm, 0,5 cm oraz 0,3 cm. Wykazano wpływ grubości próbki na mierzone wartości współczynnika emanacji, który jest wyższy dla próbek cieńszych: wynosi on 0,14 - 0,16 dla próbek o grubości 3 mm i 5 mm, zaś dla próbki o grubości 2 cm wynosi 0,04. Efekt ten tłumaczono „stratami” radonu w wyniku rozpadu promieniotwórczego podczas jego dyfuzji przez grubszą próbkę.

W pracy [DeM98] przedstawiono „akumulacyjną” metodę pomiaru współczynnika emanacji radonu w próbkach gleby. Metoda oparta jest na połączeniu spektroskopii alfa (do pomiaru ilości radonu i toronu wydostających się z próbki) oraz spektroskopii gamma (do pomiaru aktywności radu i toru w próbce). Pojemnik „akumulacyjny” jest metalowym cylindrem o objętości 1,6 dm³. Próbkę gleby umieszcza się na dnie pojemnika i przykrywa metalową siatką, która jest połączona ze ścianami pojemnika za pomocą metalowego pierścienia. Na górnej wewnętrznej pokrywie pojemnika umieszczony jest krzemowy detektor powierzchniowy, odizolowany od ścian pojemnika. Do ścian pojemnika przykłada się napięcie 3,5 kV. Zasada pomiaru opiera się na elektrostatycznym przyciąganiu jonów polonu (²¹⁸Po, ²¹⁶Po, ²¹⁴Po i ²¹²Po) – produktów rozpadu radonu i toronu. Detektor krzemowy umożliwia rejestrację cząstek α tylko od bezpośrednich produktów rozpadu radonu i toronu – izotopów ²¹⁸Po i ²¹⁶Po odpowiednio, stąd określa się aktywność radonu w pojemniku. Współczynnik emanacji radonu obliczono jako stosunek ilości radonu zebranego w pojemniku (po osiągnięciu stanu równowagi) do jego ilości powstającej w próbce gleby (tę przyjęto jako równą aktywności radu obecnego w próbce, którą zmierzono za pomocą detektora półprzewodnikowego). Uzyskano wartości współczynnika emanacji w zakresie od 0,06 do 0,6.

Pomiar współczynnika emanacji radonu z próbek skał był przedmiotem pracy *Przylibskiego* [Prz2000]. Przedstawił on metodę pomiaru współczynnika emanacji radonu ze skał krystalicznych do wód podziemnych. Metoda opierała się na pomiarze stężenia radonu C_w w wodach podziemnych i wykorzystaniu wzoru opisującego zależność tego stężenia

od parametrów takich jak: współczynnik emanacji f , stężenie radu w skale A_{Ra} , porowatość ε i gęstość ρ skały, nasycenie jej wodą S , czas t przepływu wody przez strefę emisji radonu ze skały (przyjmuje się 10 czasów połowicznego zaniku radonu, po tym okresie pozostaje tylko około 0,098% pierwotnej ilości radonu):

$$f = \frac{C_w}{\frac{A_{Ra} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho}{S} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Rn} \cdot t})} \quad (14)$$

Powyższy sposób jest prosty i daje możliwość szybkiego określenia współczynnika emanacji radonu, niemniej jednak może być obciążony znacznym błędem z powodu dużej niedokładności oznaczenia porowatości skały i stopnia nasycenia jej wodą w trudnych warunkach naturalnych.

3.2. Pomiar szybkości ekshalacji radonu

Metody pomiaru szybkości ekshalacji radonu można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

1. Metody laboratoryjne – polegają na rejestracji narastania stężenia radonu w zamkniętym szczelnie pojemniku, gdzie umieszczona jest próbka. Ten typ pomiarów służy najczęściej do określania szybkości ekshalacji radonu z surowców i materiałów budowlanych.
2. Metody terenowe pomiaru szybkości ekshalacji radonu z gruntu (*in situ*) z wykorzystaniem detektorów aktywnych lub pasywnych. Takie pomiary dają bardziej wiarygodną informację o rzeczywistej szybkości ekshalacji radonu na danym obszarze, mogą zatem być wykorzystane do określania potencjału radonowego tego obszaru.

Pomiary laboratoryjne

Metody pomiarów laboratoryjnych szybkości ekshalacji radonu można określić jako metody tzw. „akumulacyjne” – zasada jest podobna jak w przypadku pomiarów współczynnika emanacji radonu w różnych materiałach. Próbkę umieszcza się w szczelnie zamkniętym pojemniku, a następnie mierzy się stężenie radonu, który wydostał się z tej próbki do pojemnika. Szybkość ekshalacji określana jest na podstawie zmierzonego stężenia radonu, objętości pojemnika, masy lub powierzchni próbki, czasu pomiaru.

W pracy *Al-Jarallaha i in.* [Alj01] przedstawiono metodę określenia szybkości ekshalacji radonu z próbek materiałów budowlanych (granit, marmur, materiał ceramiczny do produkcji dachówek) za pomocą dwóch rodzajów technik „akumulacyjnych” –

z wykorzystaniem aktywnego miernika radonu oraz wykorzystując śladowe detektory pasywne.

W pierwszym przypadku w pojemniku ekshalacyjnym o objętości ok. 50 dm³ umieszczono próbkę oraz komorę jonizacyjną AlphaGUARD (aktywny miernik radonu), która rejestrowała co godzinę narastające stężenie radonu. Czas pomiaru dla każdej próbki wynosił średnio 140 godzin. Szybkość ekshalacji E obliczano ze wzoru:

$$E = C_k \cdot \lambda_{Rn} \cdot \frac{V}{F} \quad (15)$$

gdzie:

V – objętość pojemnika [m³]

F – całkowita powierzchnia próbki [m²]

C_k – końcowe stężenie radonu w stanie równowagi po czasie ok. 27 dni (7 czasów połowicznego zaniku radonu).

Wartość C_k obliczano dopasowując krzywą teoretyczną do eksperymentalnych wyników narastania stężenia radonu $C(t)$ w czasie zamknięcia próbki w pojemniku:

$$C(t) = C_k \cdot (1 - e^{-\lambda_{Rn} t}) \quad (16)$$

Drugi rodzaj metody „akumulacyjnej” polegał na umieszczeniu na powierzchni każdej próbki dwóch detektorów śladowych i przykryciu każdego z nich małym szczelnym pojemnikiem o średnicy 6,4 cm i wysokości 4,5 cm. Detektory były w ten sposób ekspozowane na próbce przez 180 dni, a następnie odczytywano gęstość śladów cząstek α emitowanych przez radon i określano stężenie radonu w pojemniku (znając współczynnik kalibracji, którą przeprowadza się zawsze dla detektorów śladowych przed ich ekspozycją). Otrzymane wartości szybkości ekshalacji były najwyższe dla próbek granitu. Mieściły się w granicach od 0,33 Bq/m²·h do 0,93 Bq/m²·h (średnia wartość: 0,72 Bq/m²·h). Dla próbek marmuru i materiału ceramicznego wartości szybkości ekshalacji okazały się poniżej progu detekcji.

Podobną technikę pomiarów laboratoryjnych szybkości ekshalacji radonu z materiałów budowlanych z użyciem śladowych detektorów LR-115 przedstawili *Amrani i Cherouati* [Amr99]. Jako pojemnik akumulacyjny zastosowano cylinder o średnicy 7 cm i wysokości 10 cm. Folię LR-115 umieszczano od dołu na górnej wewnętrznej podstawie cylindra. Dolna podstawa była przyłożona do powierzchni ściany, podłogi lub sufitu i szczelnie przyklejona. W ten sposób badano szybkość ekshalacji radonu z powierzchni materiałów budowlanych w istniejących budynkach. Innym wariantem tej metody było umieszczanie zmielonej próbki materiału budowlanego wewnątrz takiego pojemnika.

Czas ekspozycji w obu przypadkach wynosił około 2 miesiące. Określanie szybkości ekshalacji radonu opierało się na pomiarze stężenia radonu w pojemniku i wykorzystaniu zależności (15) i (16).

Nieco zmodyfikowaną technikę „akumulacyjną” pomiaru szybkości ekshalacji radonu i toronu z próbek materiałów budowlanych przedstawili *Sharma i Virk*, [Sha01]. W opisanej przez nich metodzie na powierzchni każdej próbki były umieszczane po dwa cylindryczne, plastikowe pojemniki o wysokości 4,5 cm oraz średnicy 3,1 cm. W każdym pojemniku na wewnętrznej stronie górnej ścianki znajdowały się detektory śladowe (folie LR-115). Otwarte strony każdego pojemnika, przylegające do powierzchni danej próbki były przykryte różnymi rodzajami filtrów: jeden – filtrem z włókna szklanego (w tym przypadku detektor śladowy rejestrował cząstki α zarówno od radonu jak i toronu), drugi – lateksową membraną o grubości 15 μm (tu detektor rejestrował tylko ślady od radonu). Czas ekspozycji detektorów wynosił 2 miesiące. Określona po pomiarze gęstość śladów pozwalała obliczyć całkowitą ekspozycję oddzielnie od radonu i toronu w [$\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$], a następnie odpowiednie szybkości ekshalacji.

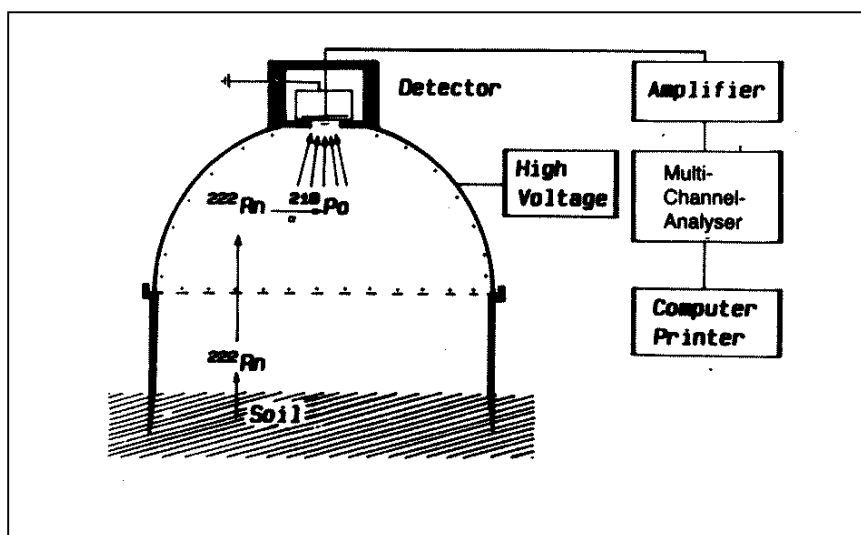
W laboratoryjnych pomiarach szybkości ekshalacji radonu stosowane są także detektory śladowe CR-39. *Shafi-ur-Rehman i in.* [Sha06] opisali metodę „akumulacyjną” pomiaru szybkości ekshalacji radonu z próbek gleby i piasków, gdzie stężenie radonu w pojemniku z próbką mierzono za pomocą detektorów śladowych CR-39. Zmielone i wysuszone próbki (każda ważąca 500 g) były umieszczane w pojemniku cylindrycznym o objętości 5400 cm^3 . Detektor CR-39 znajdował się na wysokości 25 cm nad powierzchnią próbki. Czas ekspozycji detektora wynosił trzy tygodnie. Do określenia szybkości ekshalacji radonu stosowano równanie analogiczne do (15), które zostało uzupełnione o czynnik opisujący zjawisko „back diffusion” – dyfuzji radonu z przestrzeni pojemnika do próbki. Zjawisko to zaczyna mieć wpływ na wynik pomiaru szybkości ekshalacji radonu w przypadku dłużej trwających pomiarów ze względu na „nasylenie” radonem objętości pojemnika.

Pomiary terenowe

Do pomiarów *in situ* szybkości ekshalacji radonu używa się często detektorów pasywnych, np. pojemników z węglem aktywnym, ale możliwe jest też stosowanie aktywnych mierników radonu, np. komory jonizacyjnej typu AlphaGUARD.

Odmianą nieco metodę pomiaru ekshalacji radonu z gleby zaproponowali *Keller i Schütz*, [Kel88]. Opiera się ona na elektrostatycznym osadzaniu się jonów polonu ^{218}Po , pierwszego produktu rozpadu radonu, na powierzchni czynnej detektora półprzewodnikowego z barierą powierzchniową. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiony jest na Rys. 3.1.

Uwolniony z gleby radon wchodzi do komory pomiarowej, która jest dodatnio naładowaną metalową półkulą ograniczoną siatką. W wyniku rozpadu atomu radonu w tej półkuli powstaje cząstka α i jon polonu ^{218}Po , który osiada na ujemnie naładowanej powierzchni detektora. Polon nadal rozpada się emitując cząstki α , których widmo jest rejestrowane w analizatorze wielokanałowym w kolejnych odstępach czasowych. Szybkość ekshalacji radonu z gleby jest określana na podstawie wzrostu koncentracji polonu (a więc i radonu) w mierzonej objętości. Pomiar trwa dwie godziny, a co 15 minut odbywa się odczyt scałkowanej w tym interwale czasowym koncentracji polonu. Badano tą metodą ekshalację radonu z gleby w obszarze, gdzie stwierdzono wyższe jego stężenia w domach.



Rys. 3.1. Schemat stanowiska do pomiaru ekshalacji radonu [Kel88]

Do pomiarów ekshalacji radonu *in situ* stosuje się też detektory z węglem aktywnym, gdzie wykorzystuje się zdolność węgla do adsorpcji radonu. Zasada pomiaru polega na ustawieniu pojemników z węglem aktywnym w miejscu pomiaru na glebie lub na

powierzchni badanego materiału na określony czas (czas ekspozycji), a następnie wyznaczeniu aktywności produktów rozpadu radonu w oparciu o analizę widma promieniowania gamma [Bog02, Obe96; Meg73; Esc99; Yu96; Due07].

W przypadku pomiarów spektrometrycznych z detektorem scyntylicyjnym NaI(Tl) analizuje się najczęściej linię promieniowania gamma bizmutu ^{214}Bi (609 keV). Spektrometr z detektorem półprzewodnikowym HPGe pozwala, z uwagi na dużo większą zdolność rozdzielczą, analizować pozostałe linie promieniowania gamma produktów rozpadu radonu zaadsorbowanego na węglu.

Pomiar ekshalacji radonu z użyciem tylko detektorów węglowych ma pewne ograniczenia. Z powodu krótkiego czasu połowicznego rozpadu radonu istnieje konieczność stosunkowo szybkiego pomiaru detektora po zakończeniu ekspozycji. To utrudnia znacznie pomiary na większą skalę. Ponadto, jeśli w trakcie ekspozycji detektora zachodzą wyraźne zmiany szybkości ekshalacji, to na średnią wartość ekshalacji zmierzoną detektorem największy wpływ będzie miał końcowy odcinek czasu ekspozycji, co może być przyczyną nieprawidłowego określenia średniej wartości szybkości ekshalacji.

Ciekawą odmianę metody z zastosowaniem detektorów węglowych przedstawili *Stranden i in.* [Str85], którzy połączyli pojemniki z węglem aktywnym oraz detektory termoluminescencyjne TLD typu $\text{CaF}_2:\text{Dy}$. Zastosowanie kombinacji pojemników z węglem aktywnym i umieszczonych w nim detektorów TLD pozwala uniknąć powyższych problemów. Zestaw pomiarowy składał się z pojemnika o objętości 150 cm^3 wypełnionego węglem aktywnym, w którym umieszczono detektor TLD. Pojemnik miał zakręcaną przykrywkę, na której umocowano drugi detektor TLD służący do pomiaru tła. W miejscu pomiaru odkręcano przykrywkę i zastępowano plastikowym cylindrem zakończonym z jednej strony siatką i gwintem do zakręcenia na pojemniku. Po przymocowaniu cylindra do pojemnika odwracano całość do góry dnem i umieszczano na glebie wciskając brzegi cylindra na głębokość około 2-3 cm. Przykrywka z przymocowanym drugim detektorem TLD (pomiar tła) była położona na górze zestawu. Pojemniki były eksponowane 3 doby, czas po zakończeniu ekspozycji do odczytu detektora TLD (tzw. czas opóźnienia) wynosił też z reguły 3 doby.

Po zakończeniu ekspozycji pojemniki były ponownie zamykane szczelnie przykrywką i zabierane do laboratorium, gdzie następował odczyt detektora TLD. Wartość stopnia ekshalacji określano na podstawie całkowitej dawki pochłoniętej D_{TLD} [Gy], jaką zarejestrował detektor TLD umieszczony w węglu. W dawce tej uwzględniona jest zarówno

część pochodząca od radonu adsorbowanego na węglu w czasie ekspozycji t_e jak i w czasie opóźnienia t_d . Można ją wyrazić wzorem:

$$D_{TLD} = k_k \cdot E \cdot \left(t_e - \frac{1}{\lambda_{Rn}} (1 - e^{-\lambda_{Rn} t_d}) \cdot e^{-\lambda_{Rn} t_d} \right) \quad (17)$$

gdzie:

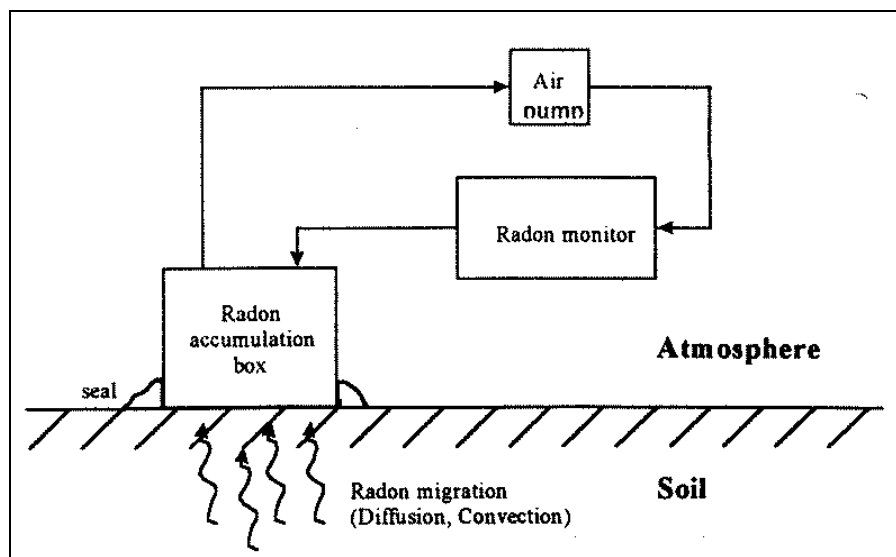
E – szybkość ekshalacji [Bq/m²·h]

λ_{Rn} - stała rozpadu radonu [1/h]

k_k – współczynnik kalibracji

Współczynnik kalibracji k_k określono wykonując 15 pomiarów ekshalacji i określając ją zarówno z odczytów detektorów TLD jak i pomiarów spektrometrycznych – mierząc aktywność produktów rozpadu radonu zaadsorbowanego na węglu. Szybkość ekshalacji E wyliczano przekształcając powyższy wzór. Zaletą tej metody jest brak konieczności pomiarów spektrometrycznych detektora węglowego. Służy on jedynie jako „wzmacniacz” sygnału dla TLD. Stosując tę metodę zmierzono szybkość ekshalacji radonu z gleby w 46 miejscach w Danii i w 42 miejscach w Norwegii. Mierząc wcześniej radon w domach na tych terenach stwierdzono silną korelację pomiędzy stężeniem radonu w domach a szybkością ekshalacji z gleby – wysokie stężenia w domach występowały w miejscach gdzie ekshalacja była również wysoka.

Stosunkowo szybkim i wygodnym sposobem pomiaru ekshalacji radonu z gleby jest wykorzystanie aktywnego miernika radonu – komory jonizacyjnej AlphaGUARD [PHARE94]. Na glebie umieszcza się pojemnik akumulacyjny. Wewnątrz niego znajduje się miernik radonu, który umożliwia ciągłą rejestrację stężenia radonu w pojemniku. Miernik może być umieszczony na zewnątrz pojemnika i połączony z nim przepływowo. Ta wersja pomiaru jest przedstawiona na Rys. 3.2.



Rys. 3.2. Stanowisko do pomiaru ekshalacji radonu z gleby z użyciem aktywnego miernika radonu [PHARE94]

Narastanie stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej jest wprost proporcjonalne do tempa wydzielania radonu z gleby, czyli szybkości ekshalacji E . Wartość tę można obliczyć jako pochodną zmian stężenia radonu C w czasie t . W obliczeniach bierze się pod uwagę pole powierzchni gleby F nakrytej pojemnikiem akumulacyjnym, jego objętość V oraz czas akumulacji t_A , tzn. czas trwania pomiaru:

$$E = \frac{dC}{dt} \cdot \frac{V}{F} = \frac{(C - C_0)}{t_A} \cdot \frac{V}{F} \quad (18)$$

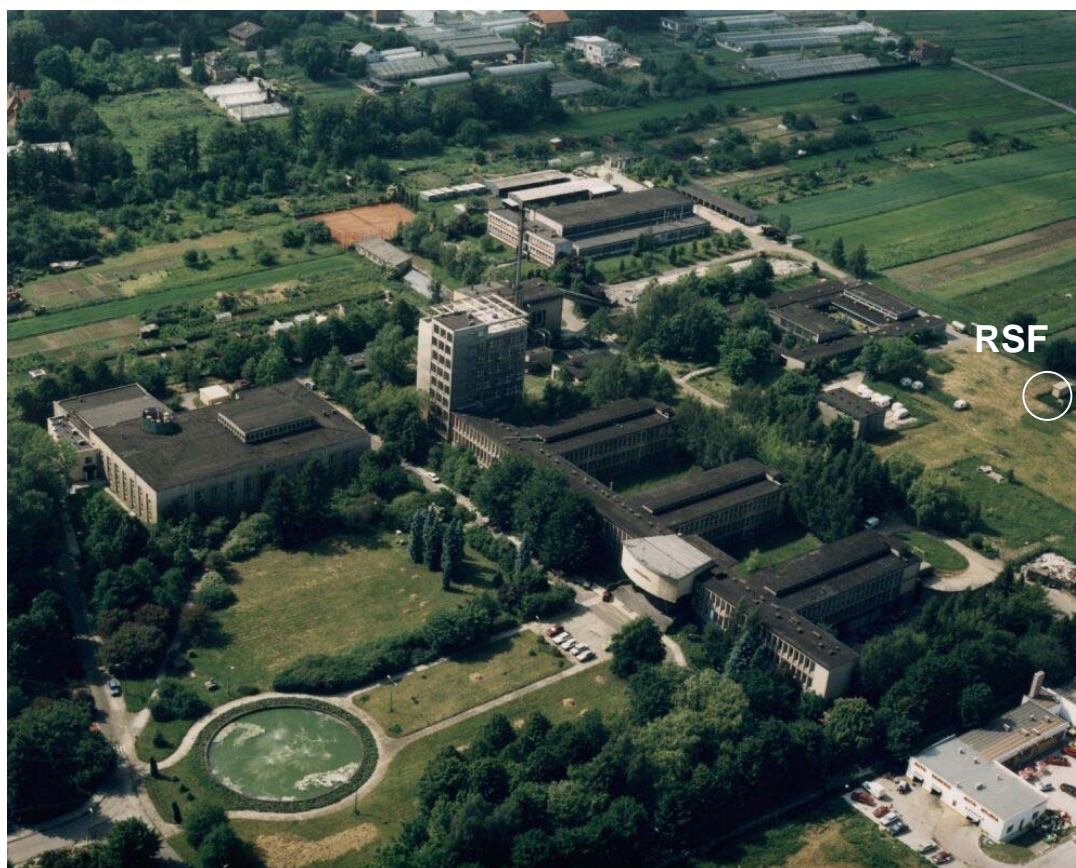
We wzorze powyższym C_0 oznacza stężenie radonu w pojemniku w chwili $t=0$, C – jest stężeniem radonu w pojemniku w chwili $t=t_A$. Czasy akumulacji w tego typu pomiarach są rzędu 1 godziny, kiedy narastanie stężenia radonu jest liniowe. Wtedy także można zaniedbać wpływ efektu „dyfuzji wstecznej” oraz ewentualnej ucieczki radonu przez nieszczelności pojemnika. Tę metodę pomiaru szybkości ekshalacji radonu z gleby wykorzystano w długoterminowych pomiarach prowadzonych przez autorkę pracy. Metoda ta jest omówiona bardziej szczegółowo w rozdziale 5.

W literaturze prezentowane są wyniki pomiarów uzyskane ze stosunkowo niedługich przedziałów czasowych (rzędu kilku dni) i z częstotliwością maksimum 1 pomiar na dobę. Wyjątkiem jest praca [Fer01], gdzie przedstawiono pomiary szybkości ekshalacji z okresu 1 miesiąca wykonywane 8 razy w ciągu doby za pomocą automatycznego urządzenia.

4. STANOWISKO DO POMIARÓW RADONU *in situ* W IFJ PAN – „RADON STUDY FIELD (RSF)”

Badanie dynamiki procesu ekshalacji radonu z powierzchni gleby wymagało utworzenia specjalnego stanowiska do prowadzenia długoterminowych pomiarów terenowych. Stanowisko zostało zlokalizowane na terenie IFJ PAN w jego północnej części w pobliżu stacji do poboru aerozoli z przyziemnej warstwy atmosfery (ASS-500) oraz stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych powietrza (PMS).

Radon Study Field jest usytuowane na otwartej przestrzeni z dala od budynków. Takie położenie gwarantuje brak wpływu czynników zakłócających prowadzone badania. Ogólny widok terenu IFJ PAN przedstawia Rys. 4.1, na którym zaznaczono orientacyjne położenie RSF. Na terenie RSF znajduje się kontener, w którym umieszczona jest aparatura pomiarowa oraz mierniki stacji meteorologicznej Weather Monitor firmy DAVIS (Rys. 4.2).



Rys. 4.1. Widok ogólny IFJ PAN oraz położenia Radon Study Field



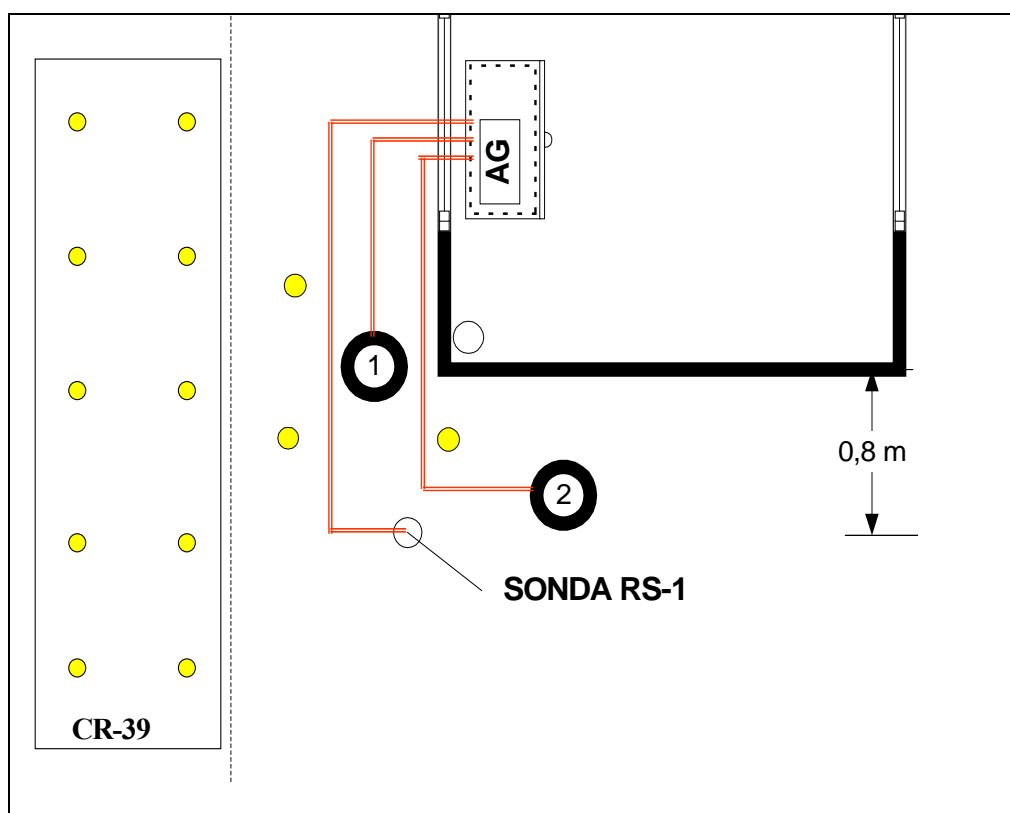
Rys. 4.2. Radon Study Field – kontener z aparaturą i stacja meteorologiczna Weather Monitor

Przy projektowaniu stanowiska pomiarowego RSF przyjęto następujące założenia:

- geologiczne rozpoznanie terenu
- znajomość parametrów fizyko-chemicznych gleby
- znajomość stężeń izotopów promieniotwórczych w glebie
- możliwość ciągłej rejestracji wybranych parametrów meteorologicznych
- możliwość długoterminowej rejestracji stężeń radonu na głębokości 1 m
- możliwość wykonywania pomiarów chwilowych stężeń radonu na głębokości 1 m
- możliwość pomiaru temperatury i wilgotności gleby na kilku głębokościach (do 1 m)
- możliwość stałych pomiarów ekshalacji

Radon Study Field powstało jesienią 2003 roku i od tego czasu ulegało kolejnym udoskonaleniom i rozbudowie [Maz04].

Na terenie RSF utworzono stanowiska do pomiarów zarówno stężenia radonu w glebie jak i ekshalacji radonu z gleby. Metody pomiarów stężenia radonu w glebie, jak również metody pomiaru ekshalacji radonu z gruntu są omówione szczegółowo w rozdziałach 5 i 6 pracy. Schemat rozmieszczenia stanowisk dla poszczególnych pomiarów na terenie RSF pokazuje Rys. 4.3. Na terenie RSF były prowadzone także pomiary stężenia radonu w glebie metodą pasywną z wykorzystaniem detektorów śladowych typu CR-39.



Legenda:

1, 2 - stanowiska do pomiaru ekshalacji radonu z gruntu: (1-ExhBox; 2-AutoExh)

SONDA RS-1 stanowisko do pomiarów chwilowych stężenia radonu w powietrzu glebowym

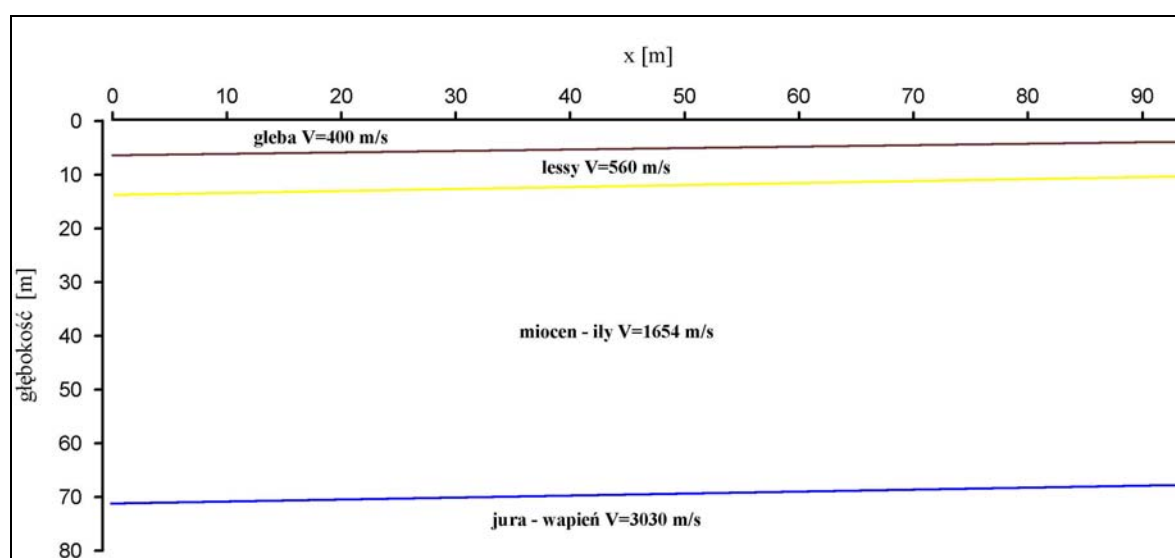
● rozmieszczenie detektorów CR-39

Rys. 4.3. Rozmieszczenie stanowisk do pomiaru stężenia radonu w glebie (Sonda RS-1 i detektory CR-39) oraz ekshalacji radonu z gleby na terenie RSF.

4.1. Geologiczne rozpoznanie terenu

Rozpoznanie głębokiej struktury podłoża i układu warstw geologicznych terenu RSF wykonano metodą sejsmiki powierzchniowej we współpracy z AGH [Dec02]. Dzięki zastosowaniu tej metody uzyskano obraz budowy podłoża do głębokości kilkuset metrów.

W wyniku interpretacji wszystkich uzyskanych sejsmogramów sporządzony został głębokościowy przekrój sejsmiczny (Rys. 4.4). Teren RSF jest jednorodny i nie występują na nim uskoki tektoniczne. Warstwa gruntu na całym przekroju ma grubość od 5 m do 8 m, pod nią znajduje się warstwa lessów o grubości ok. 10 m. Między 15 m a 70 m zalegają ily mioceńskie położone z kolei na warstwie wapieni jurajskich.



Rys. 4.4. Przekrój głębokościowy Radon Study Field

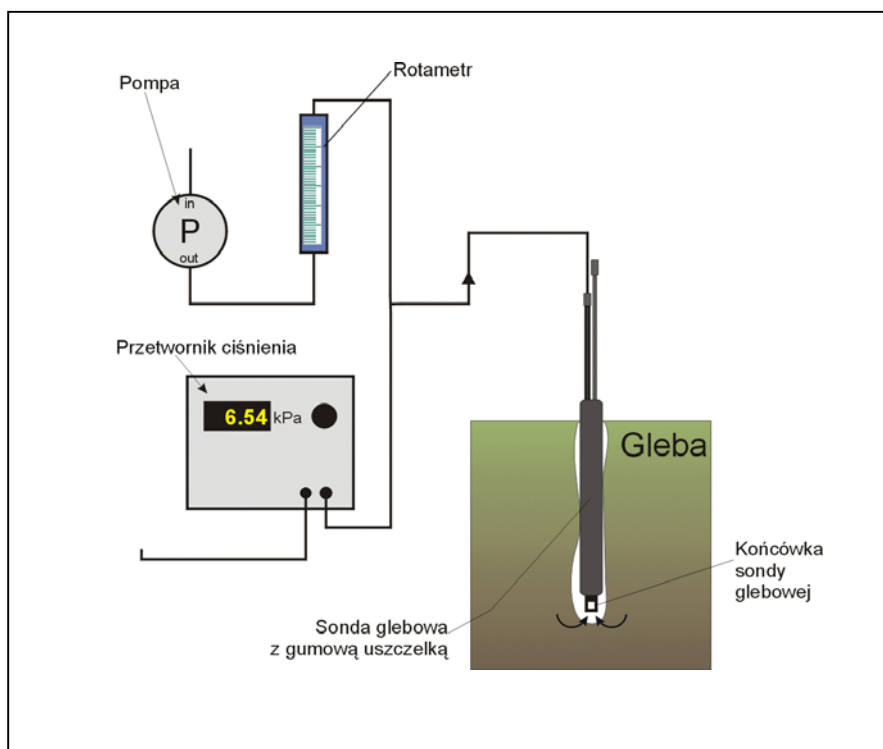
4.2. Podstawowe parametry gleby na terenie RSF

Pomiar przepuszczalności gleby wykonywany był *in situ* metodą opracowaną w IFJ PAN, opisaną w pracy doktorskiej Janika [Jan05]. Metoda, oparta na prawie Darcy'ego, polega na wyznaczeniu dwóch wielkości: prędkości wymuszonego przepływu gazu glebowego oraz różnicy ciśnień: atmosferycznego i ciśnienia gazu glebowego na głębokości 1 m. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na Rys. 4.5. Po wywierceniu w glebie otworu o średnicy 4 cm i głębokości 1,0 m wprowadzana była do otworu sonda glebowa. Po uszczelnieniu sondy wykonywany był pomiar wymienionych wyżej dwóch wielkości.

W pomiarze stosowany był miernik różnicy ciśnień (typ VDPT-10S) oraz pompa AlphaPUMP o regulowanej szybkości przepływu od 0,3 dm³/min do 1,0 dm³/min.

Pomiar przepływu wykonywany był za pomocą przystawki MultiSensorUNIT D/P do profesjonalnego miernika radonu AlphaGUARD.

Do obliczenia przepuszczalności konieczne jest wyznaczenie tzw. współczynnika kształtu sondy W , co wykonuje się na specjalnym stanowisku kalibracyjnym w IFJ PAN [Jan05].



Rys. 4.5. Schemat stanowiska do pomiaru przepuszczalności gleby [Jan05]

Przepuszczalność gleby k [m^2] wyznaczano w oparciu o zmodyfikowane prawo Darcy'ego:

$$k = \eta \cdot \frac{1}{W} \cdot \frac{v}{dp} \quad (19)$$

gdzie:

W – współczynnik kształtu sondy glebowej [m],

η – lepkość dynamiczna powietrza [Pa·s],

v – prędkość przepływu gazu glebowego przepompowanego przez sondę [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

dp – różnica ciśnień: atmosferycznego i ciśnienia gazu glebowego na głębokości 1 m [Pa]

Pomiary przepuszczalności gleby były prowadzone na terenie RSF w dwóch punktach położonych w pobliżu stanowiska sondy RS-1 (Rys. 4.3). W pierwszym punkcie pomiary

trwały od września 2005 do maja 2006. Natomiast od maja do lipca 2006 prowadzono pomiary przepuszczalności w drugim punkcie. Punkty były oddalone od siebie o około 1 m. W punkcie pierwszym wykonano 82 pomiary. Średnia wartość przepuszczalności gleby wynosiła $7,25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$. Maksymalną wartość równą $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ zanotowano w grudniu 2005 natomiast minimalną wartość $2,79 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ zmierzono w marcu 2006. Średnie sezonowe wartości przepuszczalności gleby nie wykazywały istotnych różnic:

- jesień 2005: $k = 8,88 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
- zima 2006: $k = 5,22 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
- wiosna 2006: $k = 6,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

W punkcie drugim wykonano 34 pomiary przepuszczalności w okresie wiosna-lato 2006; średnia wartość wynosiła $1,05 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ (maksymalna wartość: $1,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$; minimalna wartość: $9,97 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$).

Zmierzone na terenie RSF przepuszczalności gleby w granicach $10^{-11} \div 10^{-12} \text{ m}^2$ świadczą o średnim poziomie przepuszczalności gleby zgodnie z klasyfikacją przedstawioną przez *Nazaroffa* [Naz92]. Taką przepuszczalność wykazują gleby typu piaszczystego i piaszczysto-ilastego.

Gęstość gleby określono metodą piknometryczną, umożliwiającą wyznaczenie masy i objętości próbki sypkiej z dużą dokładnością. Zastosowano multipiknometr (Quantachrome Corporation) znajdujący się w Zakładzie Fizyki Transportu Promieniowania IFJ PAN [Qua91]. Próbkę gleby wysuszono w temperaturze 105°C do stałej masy. Zasada pomiaru opierała się na określeniu objętości próbki poprzez pomiar różnicy ciśnień znanej ilości helu, który przepływał z naczynia referencyjnego (o znanej dokładnie objętości) do naczynia zawierającego próbkę. Przeprowadzono po 6 pomiarów różnicy ciśnień dla każdej z dwóch próbek gleby, co stanowiło podstawę do wyznaczenia ich objętości, a następnie obliczenia gęstości badanej gleby. Zmierzona tą metodą gęstość gleby z terenu RSF wynosiła $2,631 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$.

4.3. Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w glebie

Pomiary stężeń naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych w glebie na terenie RSF przeprowadzono w laboratorium z wykorzystaniem toru spektrometrycznego SP-1 z detektorem scyntylicyjnym NaI(Tl) [Koz04]. Podstawowe parametry techniczne toru spektrometrycznego zamieszczono w Tabeli. 4.1.

Próbki glebowe pobrano za pomocą próbnika glebowego z głębokości od 50 cm do 100 cm. W celu określenia średnich stężeń izotopów naturalnych próbki gleby pobrano z pięciu miejsc (wierzchołki kwadratu 1 m x 1m i jego środek) i po ujednoczeniu otrzymano w ten sposób 1 próbkę o objętości 1,2 dm³. Próbkę rozdrobniono do granulacji < 5 mm, suszono w temperaturze 105°C i umieszczono w szczelnie zamkniętym naczyniu typu Marinelli na okres 21 dni w celu osiągnięcia równowagi promieniotwórczej między radem (²²⁶Ra) a radonem (²²²Rn). Duża wydajność rejestracji emitowanych przez badaną próbkę kwantów promieniowania gamma i stosowana geometria pomiaru (naczynie Marinelli) umożliwia pomiar badanej próbki w krótkim czasie (ok.3h). Analizowane były linie pochodzące od izotopów ⁴⁰K (1,46 MeV), ²¹⁴Bi (1,76 MeV) i ²⁰⁸Tl (2,62 MeV). Opracowanie wyników przeprowadzono porównawczą metodą „trójoknową” w oparciu o atestowane wzorce kalibracyjne: potasowy uranowy i torowy (dane poszczególnych wzorców przedstawione są w Tabeli 4.2).

Tabela 4.1. Dane techniczne toru spektrometrycznego SP-1:

Detektor	Sonda scyntylicyjna NaI (Tl) Typ 12S12/3a (HARSHAW)
Wymiary detektora	76,2 mm x 76,2 mm (3"x 3")
Zdolność rozdzielcza FWHM	7% dla 661 keV (Cs-137)
Oslona detektora	Pb: 200 mm (górną osłoną Pb: 250 mm); Fe: 3,0 mm, Cu: 1,0 mm, Cd: 1,8 mm
Elektronika:	
MCA, ADC, MemBuf.	karta PC Typ: 916A (ORTEC)
Wzmacniacz	Ampl. 572 (ORTEC)
HV	ZWN-42 (POLON)
Oprogramowanie _	Gamma Vision-32 (ORTEC)

Tabela 4.2. Dane wzorców kalibracyjnych

Wzorzec	URANOWY	TOROWY	POTASOWY
Kod wzorca	U/DM/01	Th/DM/01	K/DM/01
Skład	100 ppm uranu naturalnego z blendy smolistej o zawartości 3,9% U ₃ O ₈	100 ppm Th-232	52,5 % potasu naturalnego
Nośnik	niskoaktywny selekcyjowany piasek kwarcowy (CLOR)	niskoaktywny selekcyjowany piasek kwarcowy (CLOR)	cz.d.a. KCl
Aktywność	2 270 Bq	Th-232: 750 Bq Ra-226: 90 Bq	16 672 Bq
Błąd aktywności na poziomie ufności 95%	(±0,2%)	(±3,6%)	(±1,6%)
Masa	1,851 kg	1,852 kg	1,048 kg
Geometria/ Objętość	Naczynie Marinelli, V=1,2 dm ³		
Producent	standard 3-B New Brunswick Laboratory USA	standard 7-A New Brunswick Laboratory USA	IFJ

Ponadto na terenie RSF przeprowadzono pomiar *in situ* promieniowania gamma w ramach współpracy z Uniwersytetem Śląskim w Katowicach (dr B. Kłos, mgr J. Dorda).

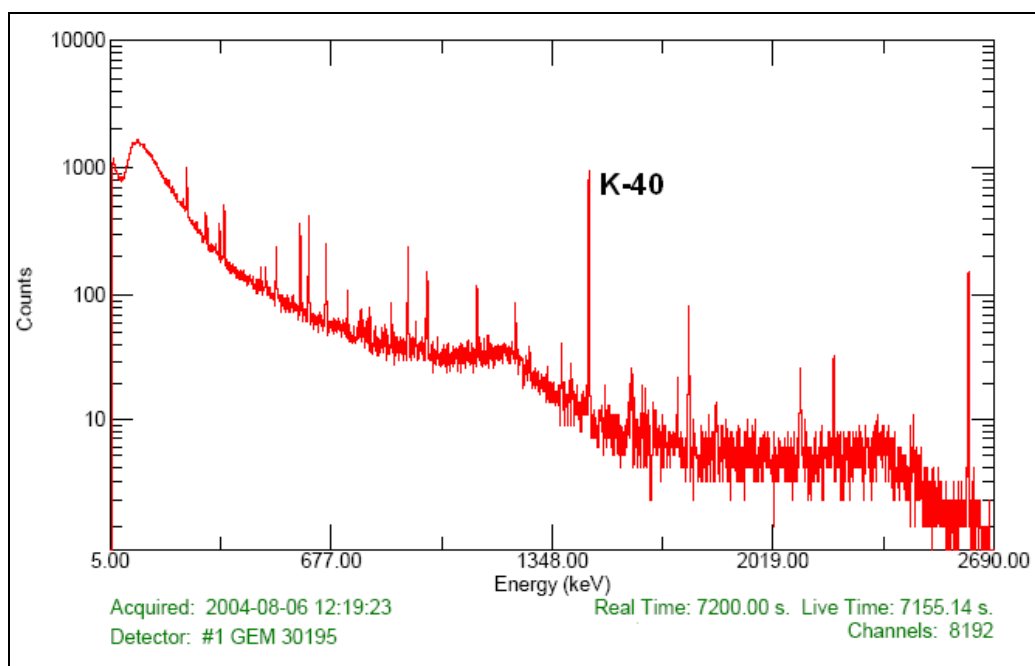


Rys. 4.6. Pomiar gamma spektrometryczny *in situ* na terenie RSF

Do rejestracji widma promieniowania gamma zastosowano przenośny spektrometr promieniowania gamma (*M-1 In Situ Gamma Spectroscopy*) firmy EG&G ORTEC z detektorem GEM 30195 o wydajności względnej 30%, umożliwiającą bezpośrednio w terenie rejestrację promieniowania gamma emitowanego przez obecne w glebie izotopy promieniotwórcze pochodzenia naturalnego i sztucznego.

W trakcie pomiaru trwającego 7200 s detektor był zorientowany w dół i umocowany na wysokości 1 m nad powierzchnią gruntu (Rys. 4.6). Obliczenia stężeń izotopów gamma promieniotwórczych w oparciu o zarejestrowane widmo promieniowania gamma (Rys. 4.7) przeprowadzono za pomocą programu *ORTEC M-1-B32 v1.10*. Do obliczeń ilościowych stężeń izotopów w gruncie przyjęto następujące parametry: gęstość objętościowa gleby: $1,61 \text{ kg/dm}^3$ zaś gęstość powietrza $0,0012 \text{ kg/dm}^3$.

Przeprowadzone pomiary, zarówno pomiar *in situ* jak i pomiar laboratoryjny wykazały zadowalającą zgodność otrzymanych stężeń izotopów gamma promieniotwórczych w gruncie na terenie RSF. Wyniki przedstawiono w Tabeli 4.3.



Rys. 4.7. Widmo promieniowania gamma – pomiar *in situ* na terenie RSF

Stężenia izotopów z szeregu uranowego (^{214}Pb , ^{214}Bi) oraz z szeregu torowego (^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{228}Ac) wyznaczano jako średnią na podstawie pomiarów uwzględniających kilka energii emitowanych kwantów gamma.

Pomiar *in situ* pozwolił dodatkowo na określenie stężenia kosmogenicznego izotopu berylu (^7Be) oraz sztucznego izotopu cezu (^{137}Cs).

Dużą rozbieżność wyników zanotowano dla stężenia ^{226}Ra – w pomiarze *in situ* otrzymano wynik 68 ± 26 Bq/kg zaś pomiar laboratoryjny dał wynik 22 ± 3 Bq/kg. Metoda określania stężenia izotopu ^{226}Ra w metodzie pomiarów *in situ* na podstawie linii promieniowania gamma o energii 186 keV obarczona jest dużym błędem m.in. z uwagi na jej położenie na wysokim tle wynikającym z rozproszenia „comptonowskiego”.

Można zauważyć dużą zgodność stężeń określonych w pomiarze *in situ* dla izotopów ^{214}Pb (33 ± 14 Bq/kg.) i ^{214}Bi (27 ± 13 Bq/kg) z wyznaczonym laboratoryjnie stężeniem ^{226}Ra (22 ± 3 Bq/kg). Te wyniki bardziej wiarygodnie reprezentują rzeczywiste stężenie ^{226}Ra na badanym obszarze.

Tabela 4.3. Wyniki stężeń izotopów gamma promieniotwórczych na terenie RSF (pomiar *in situ* i pomiar laboratoryjny).

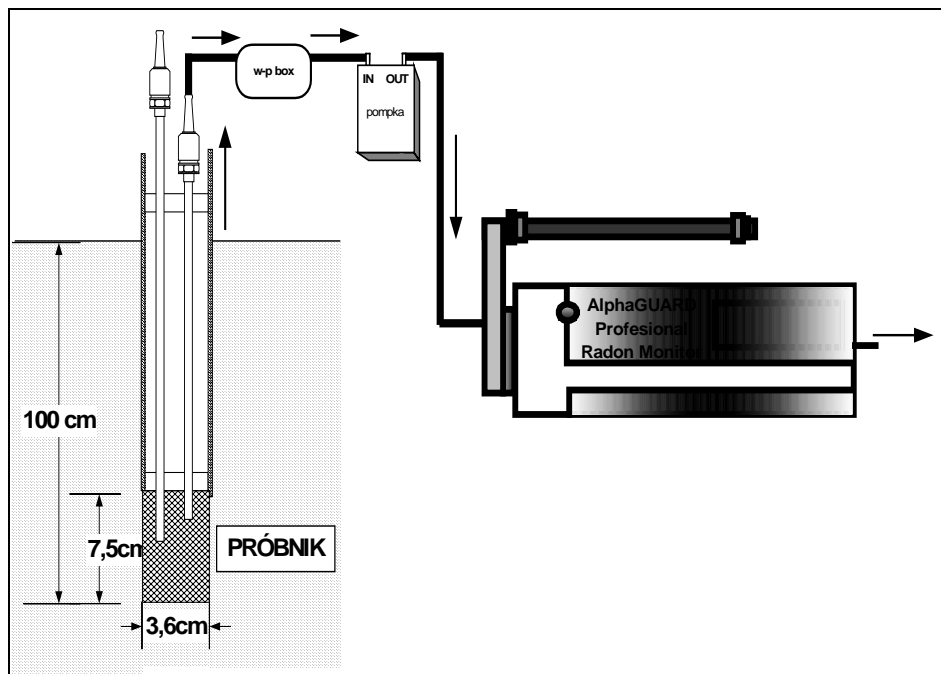
IZOTOP	Pochodzenie	E_γ [keV]	STĘŻENIE $\pm 1 \sigma$ [Bq/kg]	
			Pomiar <i>in situ</i>	Pomiar laboratoryjny
^{40}K	naturalny	1460.8	394 ± 56 Bq/kg	340 ± 20
^{226}Ra	U	186,00	68 ± 26 Bq/kg	22 ± 3
^{214}Pb	U	352.0	33 ± 14 Bq/kg	
		295.2		
		241.9		
^{214}Bi	U	609,3	27 ± 13 Bq/kg	
		1764,5		
^{212}Pb	Th	1120,3	26 ± 6 Bq/kg	
		238.6		
^{228}Ac	Th	300,1	30 ± 7 Bq/kg	30 ± 3
		911,0		
		969,0		
^{212}Bi	Th	338,40	26 ± 13 Bq/kg	
		1620,6		
^7Be	kosmogenny	893,4	31 ± 8 Bq/kg	
^{137}Cs	sztuczny	477.6	264 ± 34 Bq/m ²	

4.4. Pomiary stężenia radonu w glebie na terenie RSF

Pomiary chwilowe stężenia radonu w glebie prowadzono wykorzystując specjalnie do tego celu zaprojektowaną i wykonaną sondę glebową RS-1, która została zainstalowana na stałe na terenie RSF. Do pomiaru używano ponadto komorę jonizacyjną AlphaGUARD, model PQ2000 PRO (umożliwiający pracę w trybie przepływowym) oraz pompę AlphaPUMP. Schemat stanowiska pomiarowego pokazuje Rys. 4.8.

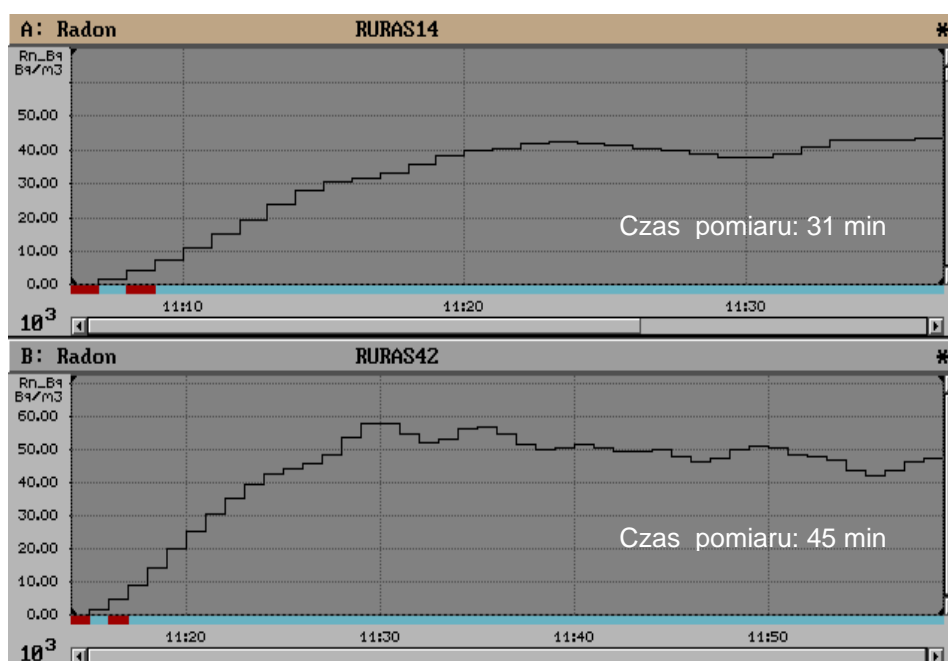
Sonda RS-1 składa się z cylindrycznej obudowy PCV o średnicy wewnętrznej 36 mm zakończonej próbnikiem (metalowym „koszyczkiem”), z którego powietrze glebowe było wypompowywane w trakcie pomiaru do komory jonizacyjnej AlphaGUARD. Sonda uszczelniona została krążkami metalowymi w celu zapewnienia izolacji termicznej miejsca poboru powietrza glebowego od warunków zewnętrznych (Rys. 4.8). Prędkość przepływu wynosiła $0,3 \text{ dm}^3/\text{min}$, co zapewniało stabilne warunki pomiaru zabezpieczając przed zbyt szybkim wypompowaniem powietrza glebowego z niewielkiej objętości próbника ($0,076 \text{ dm}^3$). Wewnątrz obudowy znajdują się dwie metalowe rurki (o średnicach wewnętrznych 10 mm), które służą do pobierania próbek powietrza glebowego z objętości próbника. Rurki zakończone są u góry szybkozłączami typu Swagelock, do których łatwo było podpiąć przewody łączące sondę z pozostałymi elementami stanowiska pomiarowego. W układ włączono także naczynie „w-p box” stanowiące dodatkowe zabezpieczenie pompy i komory jonizacyjnej przed ewentualnym przedostaniem się do nich wilgoci. Kiedy nie był prowadzony pomiar, próbnik był odizolowany od powietrza atmosferycznego (szybkozłącza zamknięte).

W momencie rozpoczęcia pomiaru przewód był podłączany do jednej z rurek i powietrze glebowe było wypompowywane z próbника. Tryb pracy komory jonizacyjnej AlphaGUARD dawał możliwość rejestracji średnich stężeń radonu w 1-minutowych interwałach czasowych. Przeprowadzono szereg pomiarów w celu ustalenia optymalnego czasu poboru próbki powietrza glebowego. Wynikiem tych testów był wybór czasu pomiaru nie dłuższy niż 20-30 minut. Przez około 15 minut obserwowano narastanie stężenia, a następnie utrzymywało się ono na stałym poziomie. W przypadku dłuższych niż 30 minut czasów pomiaru zauważano niekiedy spadek stężenia w wyniku zubożenia w radon objętości gleby w bezpośrednim sąsiedztwie punktu poboru. Występowanie (lub brak) tego efektu związane było z parametrami gleby i warunkami atmosferycznymi panującymi w czasie trwania pomiaru.



Rys. 4.8. Schemat stanowiska do pomiaru stężenia radonu w glebie

Rys. 4.9 przedstawia przykłady zarejestrowanych przez AlphaGUARD zmian stężenia radonu w trakcie poboru próby powietrza glebowego dla różnych czasów trwania pomiarów. W przypadku czasu pomiaru równego 45 minut (Rys. 4.9 – dolny) maksymalne stężenie radonu (ok. 58 kBq/m^3) po czasie 15 min obniża się do 40 kBq/m^3 . Jak widać na rysunkach, po początkowym narastaniu ustalał się pewien stały poziom stężenia radonu, który utrzymywał się przez następnych kilkanaście – kilkadziesiąt minut. Stężenie radonu w powietrzu glebowym obliczane było jako wartość średnia z wszystkich zarejestrowanych przez AlphaGUARD średnich 1-minutowych stężeń radonu w obszarze tego właśnie „plateau” stężenia. Obliczenia te wykonywane były za pomocą programu AlphaExpert. Oprogramowanie to pozwala także na określenie błędu odczytanego średniego stężenia radonu w powietrzu glebowym.



Rys. 4.9. Przykłady rejestracji zmian stężenia radonu przez AlphaGUARD w pomiarach „glebowych”

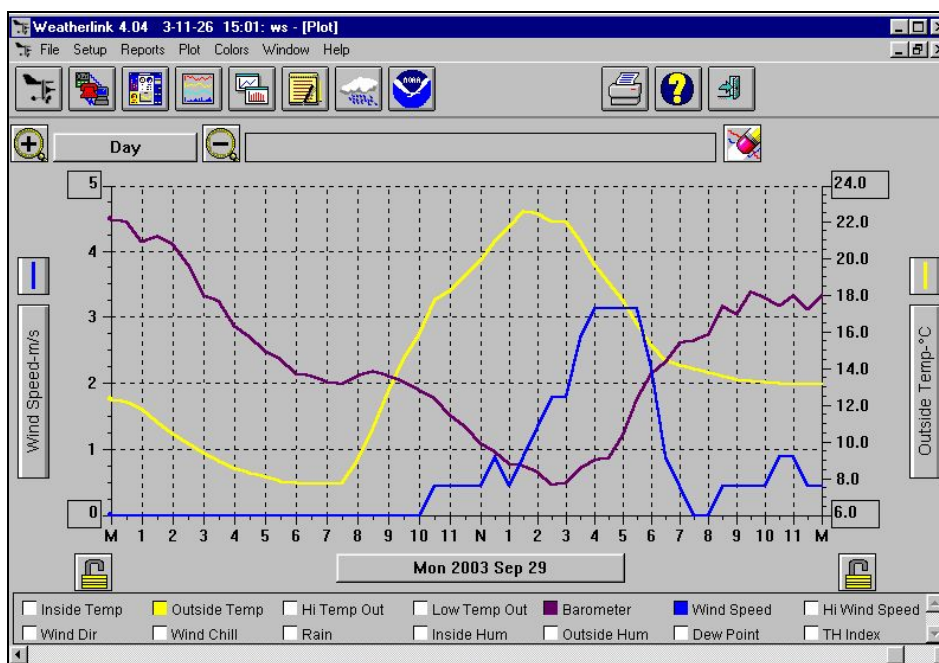
Opisana wyżej metoda umożliwia pomiar sumarycznego stężenia obu izotopów radonu (radonu ^{222}Rn i toronu ^{220}Rn) w powietrzu glebowym. Stosując ten układ pomiarowy można także wyznaczyć stężenie samego toronu [Swa05]. W tym celu bezpośrednio po przeprowadzeniu powyższej procedury pomiarowej wyłączano miernik AlphaGUARD i zamykano szczelnie komorę jonizacyjną. Po ponownym uruchomieniu komory jonizacyjnej – tym razem w trybie dyfuzyjnym z rejestracją średnich stężeń co 10 minut – przeprowadzano pomiar przez około 1 godzinę. Czas połowicznego zaniku toronu wynosi 56 sekund, więc po odrzuceniu wskazań miernika z pierwszych 20-30 minut (w tym czasie 99,9% toronu ulegnie rozpadowi) odczytywano średnie stężenie radonu ^{222}Rn . Stężenie toronu wyznaczano jako różnicę wyników tych dwóch pomiarów, a błąd obliczano metodą różniczki zupełnej wg wzoru:

$$\sigma_{C_{Tn}} = \sqrt{(\sigma_{C_{sum}})^2 + (\sigma_{C_{Rn}})^2}$$

gdzie: $\sigma_{C_{sum}}$ i $\sigma_{C_{Rn}}$ są odpowiednio błędami średnich wartości sumarycznego stężenia obu izotopów radonu i stężenia samego izotopu ^{222}Rn .

4.5. Rejestracja parametrów meteorologicznych

Rejestracja warunków meteorologicznych na terenie RSF odbywała się za pomocą działającej od maja 1999 stacji meteorologicznej „Weather Monitor II” firmy DAVIS. Stacja umożliwiała ciągłą rejestrację wszystkich parametrów mających wpływ na poziom ekshalacji radonu z gleby, a więc: temperatury i wilgotności powietrza, ciśnienia atmosferycznego, prędkości wiatru, wielkości opadów. Rejestracja odbywała się z krokiem 30 min lub 60 min, zależnie od ustawienia przez użytkownika. Oprogramowanie (Weatherlink v.5.6) umożliwiało przedstawianie danych zarówno w formie graficznej (wykresy zmian poszczególnych parametrów w wybranym okresie czasu) jak i eksportowanie ich w formacie ASCII w celu dalszej analizy lub zaimportowania do innych programów. Przykładowy wykres zmian temperatury powietrza, ciśnienia atmosferycznego i prędkości wiatru z okresu 1 doby przedstawia Rys. 4.10.



Rys. 4.10. Przykład graficznego przedstawiania danych meteorologicznych rejestrowanych przez stację Weather Monitor II

4.6. Pomiar wilgotności gleby

Do pomiarów wilgotności gleby zastosowano czujniki wilgotności ThetaProbe typu ML2x (Rys. 4.11) połączone z systemem rejestracji i archiwizacji zbieranych danych (rejestrator polowy do zapisu wyników LB-741).



Rys. 4.11. Wygląd zewnętrzny czujnika wilgotności gleby Theta Probe, typ ML2x [Th99]

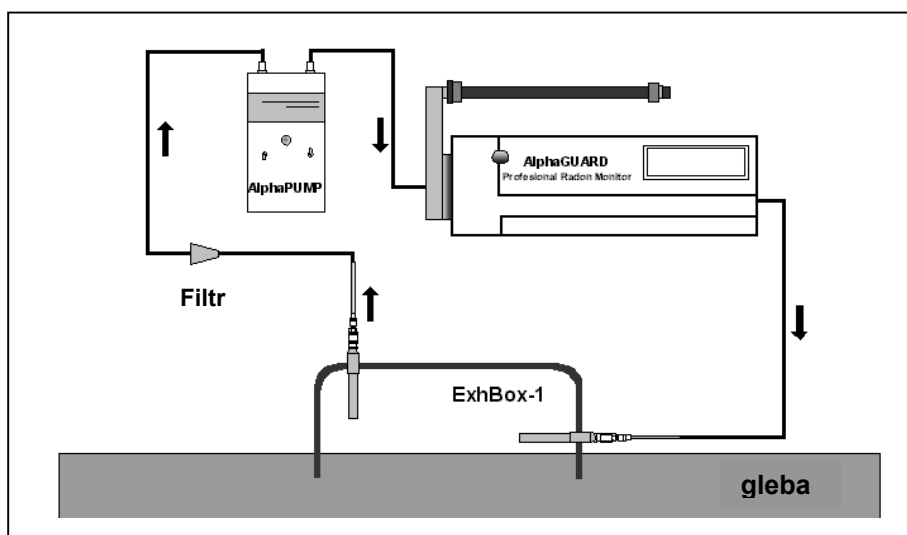
Czujnik ThetaProbe składa się z wodoszczelnej obudowy zawierającej pomiarowe układy elektroniczne oraz z dołączonych przy jednym końcu czterech zaostzonych elektrod ze stali nierdzewnej, które są wbijane do gleby.

Woda ma względną stałą dielektryczną (ok. 81), dużo większą od względnej stałej dielektrycznej fazy stałej gleby (ok. 4) i powietrza glebowego (ok. 1). Efektywna stała dielektryczna gleby zależy zatem w istotny sposób od wilgotności gleby. Zasada pomiaru polega na rejestrowaniu metodą pojemnościową przez czujnik ThetaProbe zmian stałej dielektrycznej gleby, które są następnie konwertowane na zmiany napięcia. Sygnał wyjściowy sondy to napięcie będące funkcją wilgotności gleby, która jest definiowana jako stosunek objętości wody do całkowitej objętości próbki. Wartość wilgotności gleby obliczano po dopasowaniu funkcji wielomianowej (podanej w dokumentacji urządzenia) do otrzymanych w trakcie pomiarów wartości napięcia zapisywanych w rejestratorze polowym LB-741 połączonym z czujnikami ThetaProbe. Pomiar wilgotności gleby prowadzono na trzech głębokościach: 100 cm, 50 cm i 6 cm pod powierzchnią gleby w miejscu prowadzenia pomiarów szybkości ekshalacji radonu. Dokładność pomiaru wilgotności gleby za pomocą sondy ThetaProbe wynosi $\pm 0,05$ w zakresie temperatur od 0°C do 70°C .

5. DŁUGOTERMINOWE POMIARY Szybkości EKSHALACJI RADONU Z GLEBY NA TERENIE RSF

5.1 Metoda pomiaru

Do pomiaru ekshalacji radonu z gleby wykorzystywany był referencyjny miernik radonu – komora jonizacyjna AlphaGUARD, model PQ 2000 Pro umożliwiający pomiar stężenia radonu w trybie przepływowym. W skład zestawu pomiarowego wchodziła ponadto pompa AlphaPUMP oraz specjalnie skonstruowana komora ekshalacyjna (ExhBox-1). Konstrukcja komory ekshalacyjnej oparta została na komorze wykorzystywanej w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach. Wszystkie elementy pracowały w zamkniętym obiegu. Schemat układu pomiarowego przedstawia Rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat układu do pomiarów ekshalacji radonu z gleby

W czasie pomiaru komora ekshalacyjna była umieszczana na glebie (Rys. 5.2) i połączona za pomocą rurek PCV z pompą i miernikiem AlphaGUARD, które znajdowały się wewnątrz kontenera pomiarowego. Zawory (szybkozłącza typu Swagelock) w komorze ExhBox-1 zapewniały szczelność połączenia i łatwość mocowania rurek PCV. Pomiar był przeprowadzany w trybie przepływowym pracy miernika AlphaGUARD. W 10-minutowych interwałach czasowych miernik rejestrował narastające w komorze stężenia radonu. Pompa może pracować z trzema prędkościami przepływu: 0,3 dm³/min, 0,5 dm³/min i 1 dm³/min. Pomiary prowadzono przy prędkości 0,3 dm³/min, aby nie wymuszać dodatkowo wypływu radonu z gleby, a tym samym zachować jak najbardziej naturalne warunki panujące w czasie pomiaru ekshalacji.



Rys. 5.2. Komora ekshalacyjna w czasie pomiaru

Z czasem stanowisko udoskonalono poprzez umieszczenie w glebie na stałe pierścienia metalowego o średnicy dobranej do średnicy komory ekshalacyjnej (Rys. 5.3). Na czas przeprowadzania pomiaru nakładano pojemnik na pierścień, co zapewniało szczelność i stałą objętość przestrzeni zamkniętej pojemnikiem i redukowało tym samym niepewność pomiaru wynikającą z niejednakowej głębokości wbijania pojemnika do gleby (zmiany objętości komory).



Rys. 5.3. Komora ekshalacyjna oraz pierścień mocujący do gleby

Pierścień mocujący zaopatrzone w krótką rurkę przepływową zakończoną zaworem Swagelock, dzięki któremu można było sprawdzać różnicę ciśnień: panującego wewnątrz

komory ekshalacyjnej i atmosferycznego. Pomiar taki przeprowadzono wykorzystując dodatkowe wyposażenie miernika AlphaGUARD – tzw. Multisensor Unit D/T czyli miernik temperatury i różnicy ciśnień. Wyniki pomiarów wykazały niewielkie podciśnienie panujące wewnątrz komory (około 2 Pa) zarówno w przypadku przepompowywania powietrza w obiegu zamkniętym (wg Rys. 5.1) jak i bez wymuszonego przepływu powietrza.

5.2 Obliczanie wartości szybkości ekshalacji

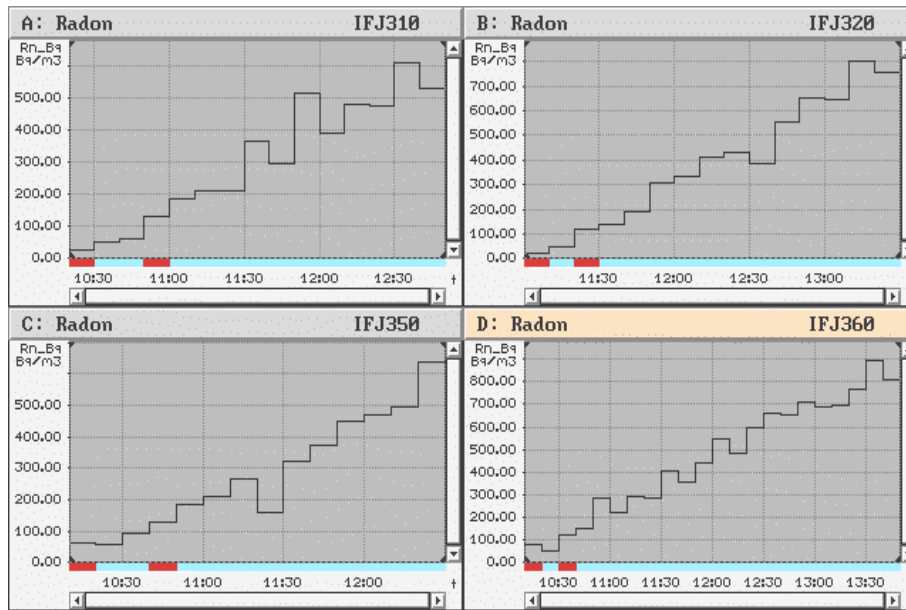
Przykład zmian stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej pokazany jest na Rys. 5.4. Wartość szybkości ekshalacji radonu E jest wprost proporcjonalna do pochodnej zmian stężenia radonu C w czasie pomiaru. Można więc liczyć ją według wzoru (18) opisanego w rozdziale 3.2.

Inna metoda obliczania szybkości ekshalacji E opiera się na dopasowaniu linii prostej do punktów pomiarowych (wartości stężeń radonu) rejestrowanych w 10-minutowych interwałach czasowych. Współczynnik kierunkowy B tej prostej jest pochodną zmian stężenia radonu w czasie, wobec czego szybkość ekshalacji E można przedstawić jako:

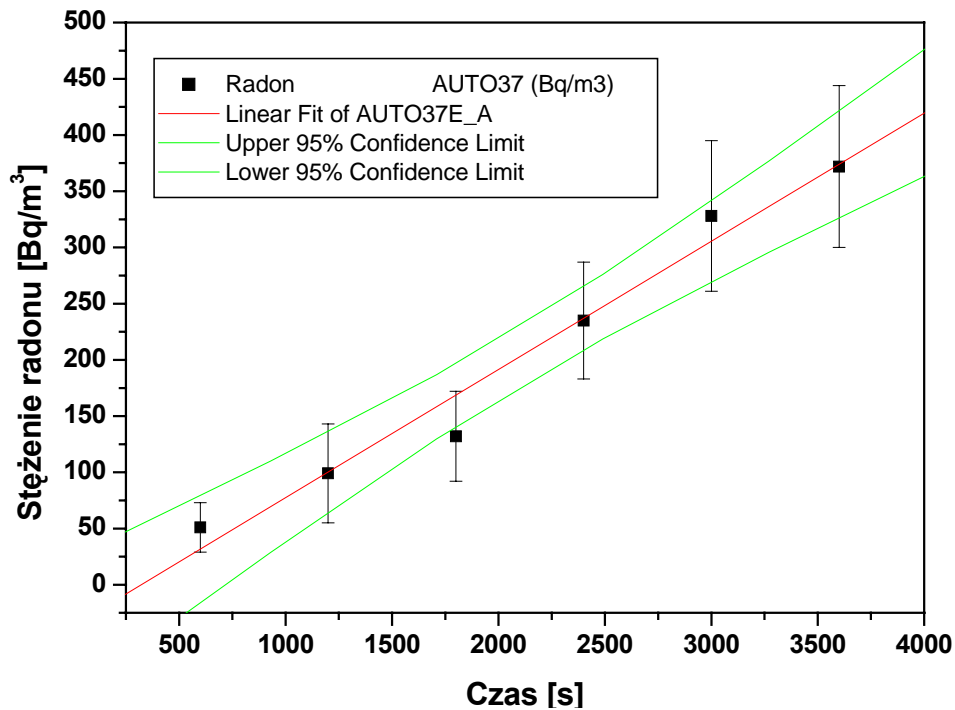
$$E = B \cdot \frac{V}{F} \quad (20)$$

Jest to inna forma wzoru (18), gdzie pochodna dC/dt jest zastąpiona współczynnikiem kierunkowym B dopasowanej prostej. Ten sposób liczenia E stosowano w pracy.

Dla każdego pomiaru ekshalacji przeprowadzono dopasowanie prostej do danych pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów. Przykład dopasowania przedstawia Rys. 5.5, gdzie zaznaczono także przedziały ufności wyznaczone na poziomie 95%. Obliczenia prowadzono korzystając z pakietu Origin v.6.0. W każdym przypadku obliczano także błąd wyznaczenia E stosując metodę różniczki zupełnej. Błąd ten zależy przede wszystkim od błędu wyznaczenia współczynnika kierunkowego prostej B (błędy objętości układu ekshalacyjnego σV oraz pola powierzchni σF gleby pod komorą nie zmieniają się i wynoszą $\sigma V = 0,00005 \text{ m}^3$ i $\sigma F = 0,0005 \text{ m}^2$). Z kolei błąd B jest podyktowany wartością współczynnika dopasowania prostej do danych pomiarowych. Dla współczynników dopasowania $r > 0,9$ błąd wartości E mieści się w granicach 5% ÷ 10%, natomiast wzrasta do 30% dla $r = 0,8$. Maksymalne błędy wyznaczenia E to 70% dla $r = 0,5$. Znaczna większość błędów wyznaczenia szybkości ekshalacji E przyjmuje wartości z zakresu 10% ÷ 25%.



Rys. 5.4. Przykładowe przebiegi zmian stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej w funkcji czasu



Rys. 5.5. Przykład dopasowania prostej do wyników pomiaru narastania stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej ExhBox-1

5.3 Automatyczne stanowisko do ciągłego pomiaru szybkości ekshalacji (AutoExh)

Kluczowym problemem w trakcie badań dynamiki szybkości ekshalacji radonu jest uzyskanie dużej bazy wyników. W celu zwiększenia częstotliwości wykonywania pomiarów został wykonany system do ich automatyzacji [Maz05]. Po ustaleniu założeń zaprojektowano urządzenie, które umożliwiała automatykę pomiarów ekshalacji. Urządzenie pozwalające na automatyczne przeprowadzenie pomiarów w ustalonych godzinach kilka razy w ciągu doby zostało wykonane i było wykorzystywane w ramach tej pracy. Widok ogólny urządzenia do automatycznych pomiarów szybkości ekshalacji radonu z gleby (AutoExh) przedstawia Rys. 5.6, zaś schemat jego budowy pokazano na Rys. 5.7.

Urządzenie umożliwiała ciągle (w zadanych przedziałach czasowych) pomiar szybkości ekshalacji radonu z gleby. Stanowisko składało się z następujących zasadniczych elementów:

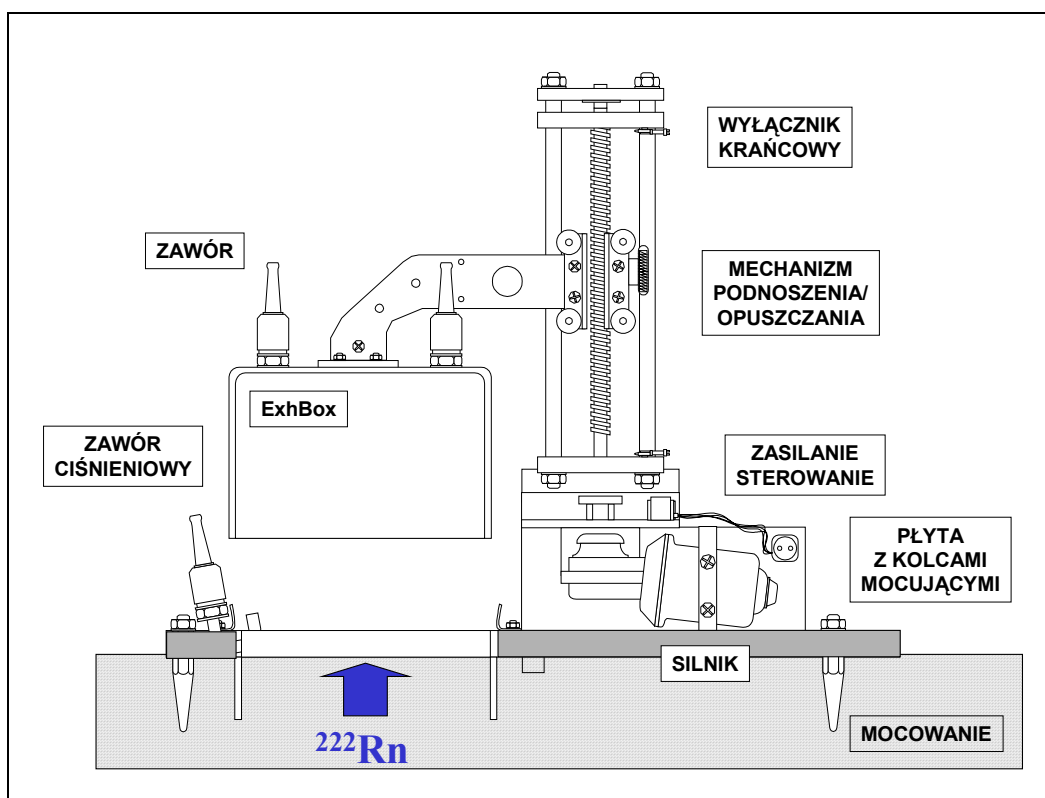
- a) płyta z kołcami mocującymi,
- b) zasilanie elektryczne,
- c) automat sterowania elektronicznego,
- d) mechanizm podnoszenia i opuszczania komory ExhBox,
- e) komora ExhBox z zaworami.



Rys. 5.6. Widok ogólny stanowiska AutoExh

Przy pomiarach ekshalacji bardzo istotne jest dokładne zdefiniowanie pola powierzchni pod komorą ekshalacyjną oraz zapewnienie szczelności całego układu pomiarowego.

Płyta z kołcami mocującymi posiadała otwór o średnicy 216 mm zakończony kołnierzem wbijanym w glebę na głębokość 60 mm. Zapewniało to możliwość dokładnego obliczenia pola powierzchni wykorzystywanego w obliczeniach szybkości ekshalacji. W płycie umieszczony był także zawór ciśnieniowy, który wykorzystywano do pomiaru różnicy ciśnień.



Rys.5.7. Schemat budowy stanowiska AutoExh.

AutoExh zasilane było napięciem zmiennym 220V. Zastosowanie transformatora i prostownika pozwalało na zasilanie silnika prądu stałego o mocy 20W. Silnik ten stanowił element mechanizmu napędu ramienia z komorą ExhBox. Napęd ramienia przenoszony był z silnika poprzez zastosowanie przekładni stożkowej wraz ze sprzęgłem (Rys 5.8a).

Układ napędzał śrubę trapezową, do której zamocowane było ramię z komorą ExhBox. Pionowy ruch ramienia zapewniał układ jezdny w prowadnicach. Sprzęgło stanowiło zabezpieczenie całego mechanizmu napędowego oraz zapewniało uzyskanie odpowiedniego nacisku przy opuszczaniu komory ExhBox.

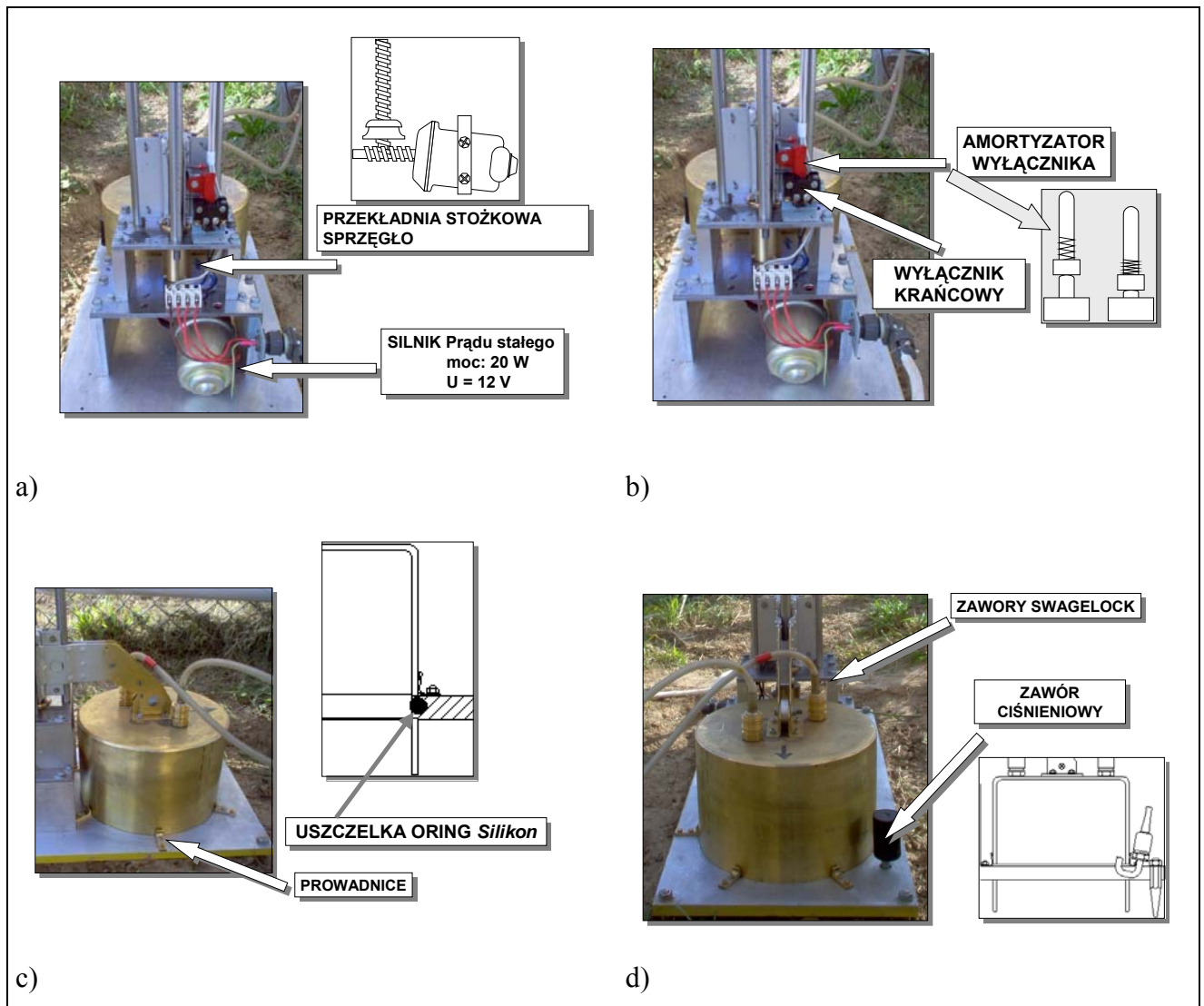
Zakresy pionowego ruchu ramienia z komorą ExhBox były wyznaczone przez zainstalowanie wyłączników krańcowych odcinających zasilanie po dojściu ramienia do ustalonych położeń. Wyłączniki wyposażono w amortyzatory, które zapobiegały uszkodzeniom spowodowanych bezwładnością mechanizmu napędowego (Rys 5.8b).

Szczelność układu pomiarowego w pozycji zamkniętej (ExhBox opuszczona) zapewniono poprzez zastosowanie silikonowej uszczelki umieszczonej na brzegu otworu w płycie mocującej. Dokładne centryczne ustawienie ExhBox w otworze było możliwe poprzez prowadnice zamocowane na obwodzie otworu (Rys 5.8c).

Komora ExhBox posiadała szybkozłącza typu Swagelock do połączenia z pompką i komorą jonizacyjną AlphaGUARD (Rys. 5.8d).

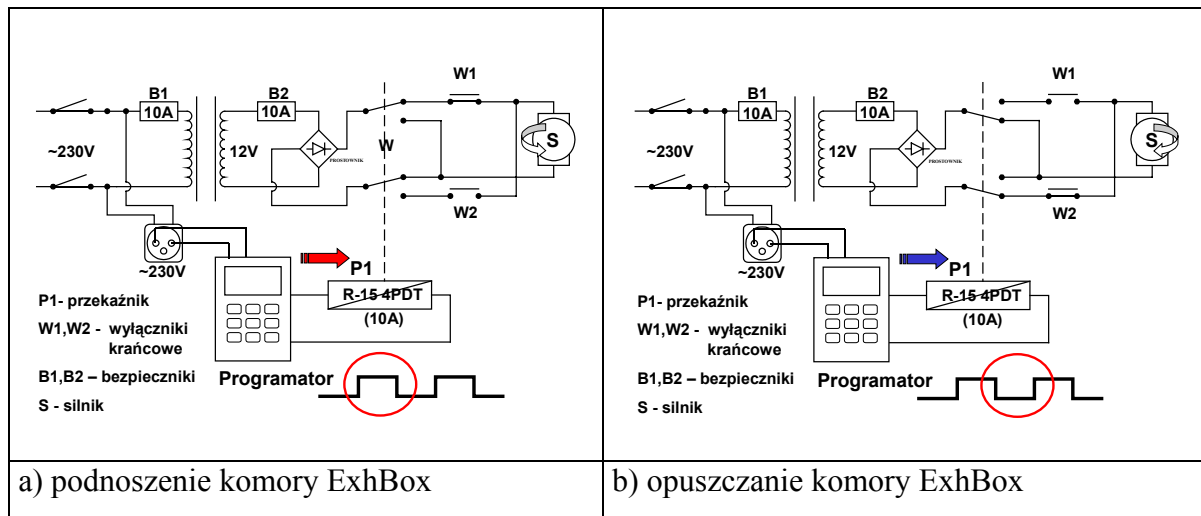
System sterowania mechanizmem podnoszenia i opuszczania ExhBox został zrealizowany za pomocą układu elektronicznego zbudowanego w oparciu o przekaźnik i programator [Maz05]. Włączenie w układ wyłączników krańcowych (W1, W2) umożliwiło ustalenie pozycji zamknięcia i otwarcia układu pomiarowego. Schemat budowy i działania systemu sterowania przedstawia Rys. 5.9. Zastosowano komercyjny programator, który pozwalał na ustawienie godzin opuszczenia i podniesienia komory ExhBox, czyli czasu trwania i częstotliwości wykonywania pomiaru ekshalacji. Sygnał z programatora ustawiał styki przekaźnika w pozycji *W* (Rys. 5.9a) co powodowało włączenie mechanizmu podnoszenia ExhBox do momentu zadziałania wyłączników krańcowych W1 i W2. Po dojściu do położeń krańcowych system sterowania zapewniał zmianę biegunowości zasilania silnika (S), co w efekcie, po kolejnym włączeniu silnika, wymuszało zmianę zwrotu ruchu ramienia z ExhBox. Kolejny sygnał z programatora (P1) zmieniał położenie styków przekaźnika (Rys. 5.9b) co powodowało włączenie zasilania silnika S. System sterowania zabezpieczony był za pomocą bezpieczników B1 i B2.

W czasie pomiarów testowych sprawdzano działanie urządzenia i ustalono częstotliwość pracy. Ostatecznie zdecydowano się na wykonywanie 4 pomiarów w ciągu doby w cyklu: 1,5 godziny pomiar i 4,5 godziny wietrzenie układu. Dłuższy czas podniesienia komory ekshalacyjnej miał na celu zachowanie jak najbardziej naturalnych warunków prowadzenia pomiarów (wpływ warunków meteorologicznych na miejsce pomiaru ekshalacji), a także pozwalał na dobre wietrzenie układu, przede wszystkim komory jonizacyjnej AlphaGUARD.

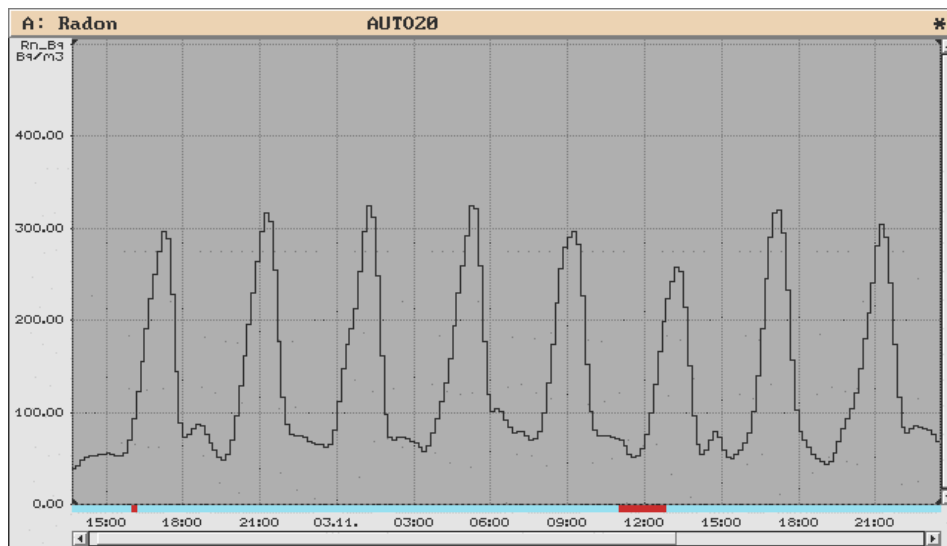


Rys. 5.8. Szczegóły techniczne stanowiska AutoExh

Na Rys. 5.10 pokazano przykład zarejestrowanych przez miernik AlphaGUARD zmian stężenia radonu w komorze ExhBox w czasie kilkudniowego cyklu pomiarowego z użyciem stanowiska AutoExh. Obliczenia szybkości ekshalacji radonu wykonywano metodą opisaną w rozdziale 5.2 dla każdego cyklu narastania stężenia radonu.



Rys. 5.9. Schemat budowy i działania systemu sterującego stanowiska AutoExh



Rys. 5.10. Przykładowy przebieg zmian stężenia radonu zarejestrowany przez AlphaGUARD w czasie pomiaru za pomocą urządzenia AutoExh

6. ANALIZA WYNIKÓW

Pomiary ekshalacji radonu z gruntu prowadzone były na terenie Radon Study Field w latach 2003-2006. W czasie całego okresu pomiarowego rejestrowano także w sposób ciągły, w miejscu prowadzonych pomiarów, wybrane parametry meteorologiczne przy pomocy stacji meteorologicznej DAVIS (opisanej w rozdziale 4 niniejszej pracy).

W tabeli 6.1 zestawiono metody i harmonogram pomiarów szybkości ekshalacji radonu z gruntu w ciągu całego okresu pomiarowego w latach 2003 – 2006. Tabela zawiera informacje o stosowanej metodzie pomiarowej i częstotliwości wykonywania pomiarów ekshalacji.

Tabela 6.1. Zestawienie metod i harmonogram pomiarów szybkości ekshalacji radonu z gruntu

METODA POMIARU	CZĘSTOŚĆ POMIARÓW	DATA	ILOŚĆ POMIARÓW NA DOBĘ GODZINY POMIARÓW
ExhBox	3 x w tygodniu	od 17.09.2003 do 30.07.2004	1x / 24h 10:00 ÷ 14:00
	6 ÷ 7x w tygodniu	od 31.07.2004 do 12.09.2005	1x / 24h 10:00 ÷ 14:00
AutoExh	7x w tygodniu	od 13.09.2005 do 04.10.2005	8x / 24h 00:00, 3:00, 6:00, 9:00; 12:00, 15:00, 18:00, 21:00
		od 05.10.2005 do 01.11.2005	6x / 24h 01:00, 05:00, 09:00, 13:00, 17:00, 21:00
		od 02.11.2005 do 23.11.2005	6x / 24h 03:00, 07:00, 11:00, 15:00, 19:00, 23:00
		od 24.11.2005 do 26.09.2006	4x / 24h 4:00, 10:00, 16:00, 22:00

W okresie od jesieni 2003 do września 2005 pomiary szybkości ekshalacji radonu prowadzono używając komory ekshalacyjnej ExhBox-1. Budowa komory ExhBox-1, metoda pomiarów i metodyka obliczania wartości szybkości ekshalacji radonu opisana jest w rozdziałach 5.1 i 5.2. W okresie od października 2003 do końca lipca 2004 pomiary tą metodą były wykonywane o tej samej porze dnia (między godziną 10⁰⁰ a 14⁰⁰) trzy razy w tygodniu. Po wstępnej analizie uzyskanych wyników okazało się, że dla celów tej pracy (tzn. badania wpływu warunków meteorologicznych na dynamikę procesu ekshalacji) należy prowadzić pomiary z większą częstotliwością. W związku z tym od sierpnia 2004 pomiary prowadzono 6 – 7 razy w tygodniu z zachowaniem wspomnianej wcześniej reguły wykonywania pomiaru w tej samej porze doby.

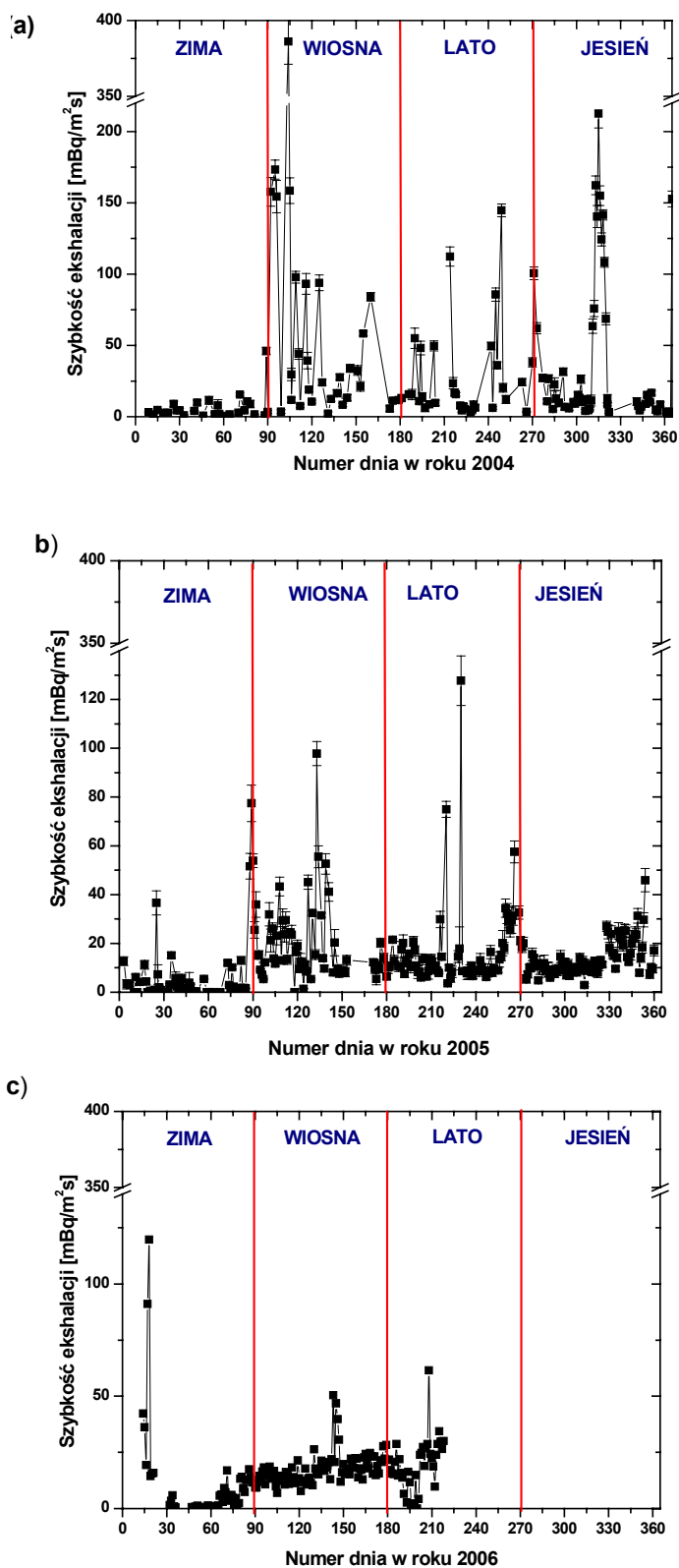
W celu rejestracji dobowych zmian szybkości ekshalacji oraz podjęcia próby znalezienia zależności pomiędzy szybkością ekshalacji a wybranymi parametrami meteorologicznymi wynikła konieczność kolejnego zwiększenia częstotliwości wykonywania pomiarów. Cel ten

został zrealizowany dzięki zastosowaniu (od września 2005) opracowanego przez autorkę i wykonanego w IFJ PAN automatycznego stanowiska do ciągłego pomiaru szybkości ekshalacji (AutoExh). Szczegółowy opis konstrukcji i działania stanowiska AutoExh zawiera rozdział 5.3. Pomiary prowadzone tą metodą umożliwiły rejestrację szybkości ekshalacji kilka razy w ciągu doby w regularnych odstępach czasowych. Urządzenie AutoExh nie działało w sposób nieprzerwany. W dniu 27.12.2005 zostało zdemontowane w celu wykonania konserwacji silnika i systemu napędowego. Ponowne uruchomienie pomiarów nastąpiło w dniu 13.01.2006. Między 12.07.2006 ÷ 20.07.2006 nastąpiła tygodniowa przerwa w pomiarach spowodowana bardzo wysokimi temperaturami zewnętrznymi (powyżej 30°C). Temperatura w pomieszczeniu kontenera przekraczała 35°C i nastąpiła awaria elektroniki sterującej pracą AutoExh. W ciągu całego okresu pomiarowego zdarzały się krótkie (2, 3 dniowe) przerwy w pomiarach ekshalacji spowodowane koniecznością użycia miernika radonu AlphaGUARD w celu wykonania innych pomiarów terenowych lub przerwy związane z wyłączeniem zasilania. Od dnia 20.07.2006r. do układu pomiarowego włączono nowo zakupiony ze środków Unii Europejskiej miernik radonu AlphaGUARD PQ2000 PRO, który zastąpił poprzednio używany model tego miernika. Pomiary zakończono 26.09.2006.

Pełny zestaw wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu wraz z kompletem danych meteorologicznych rejestrowanych w okresie pomiarowym 2003 – 2006 zebrano w arkuszach programu Microsoft Excel i zapisano w formie elektronicznej na płycie CD dołączonej do niniejszej pracy (katalog *Wyniki*). Ta forma prezentacji, z uwagi na zgromadzony bardzo obszerny zestaw wyników, pozwala na dołączenie pełnej dokumentacji z prowadzonych badań. Opis tabel grupujących te dane jest podany w Aneksie.

6.1 Analiza statystyczna wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu w latach 2003-2006

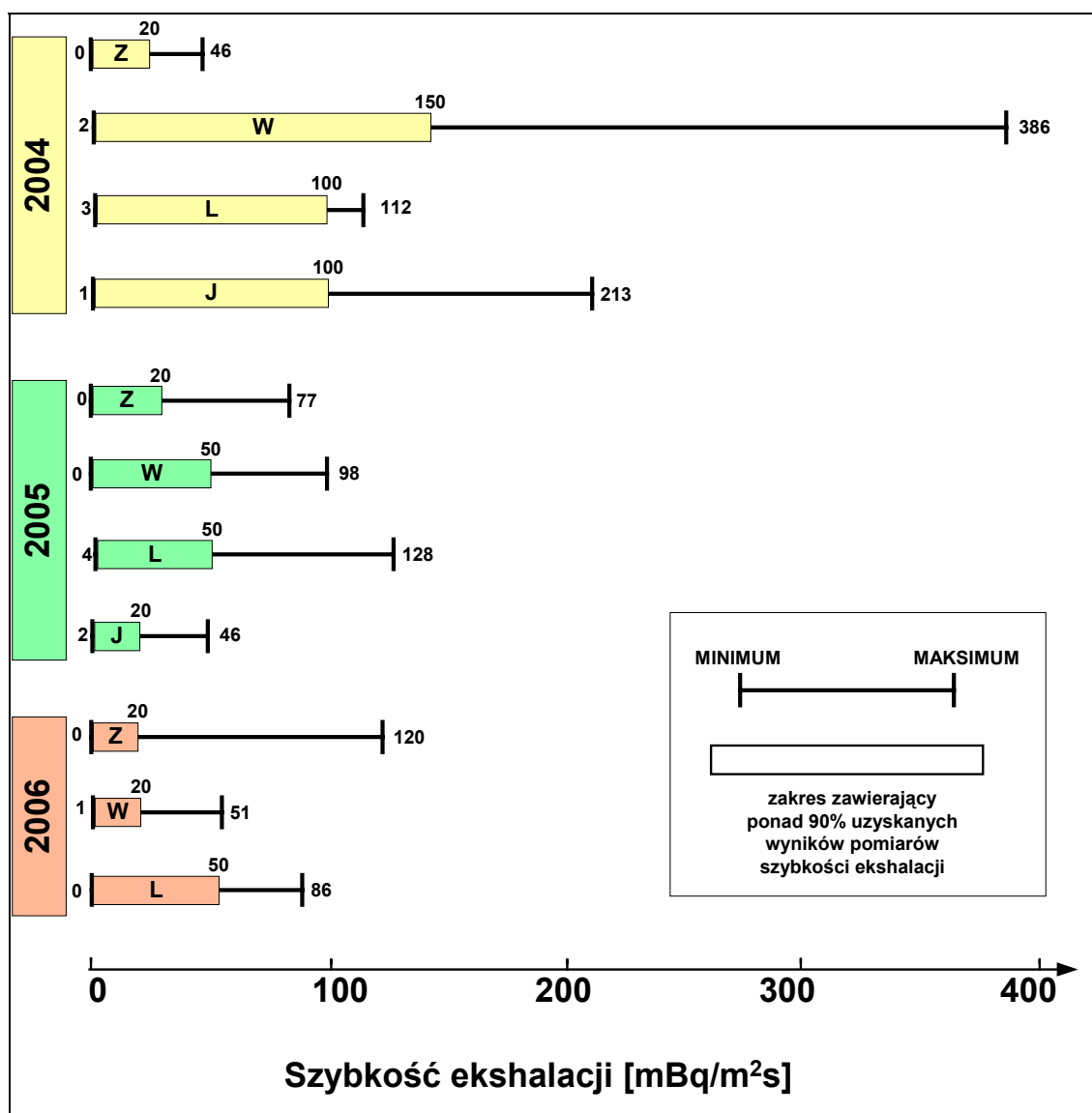
Wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu w kolejnych latach pomiarów (2004, 2005, 2006) przedstawione są na Rys. 6.1. W celu ułatwienia porównania tych wartości w poszczególnych latach zastosowano tę samą skalę na osiach pionowych (wartość szybkości ekshalacji) oraz poziomych (kolejne dni roku). Pionowymi liniami rozdzielono 3-miesięczne okresy czasu, odpowiadające porom roku, ustalone na potrzeby analizy danych w następujący sposób: zima (od 1 stycznia do 31 marca), wiosna (od 1 kwietnia do 30 czerwca), lato (od 1 lipca do 30 września), jesień (od 1 października do 31 grudnia). W dalszej części rozdziału analizę zmian sezonowych wartości ekshalacji radonu przeprowadzono zgodnie z tym podziałem.



Rys. 6.1. Szybkość ekshalacji radonu z gruntu w kolejnych latach pomiarowych
a) 2004, b) 2005, c) 2006

Zarejestrowane w okresie prowadzenia pomiarów wartości szybkości ekshalacji wykazują dużą zmienność. Maksymalne wartości ekshalacji są w kolejnych latach różne, jednak zaobserwowano podobną tendencję w dynamice tego zjawiska – niskie wartości w okresie zimowym, a następnie wyraźny wzrost wartości ekshalacji w okresie wiosennym.

Zestawienie zakresów zmierzonych wartości (min ÷ max) w poszczególnych sezonach kolejnych lat przedstawiono w Tabeli 6.2 oraz na poniższym schemacie:



Wartość szybkości ekshalacji równa zero oznacza, iż nie było możliwe jej obliczenie za pomocą metody opisanej w rozdziale 5. Na schemacie zaznaczono dodatkowo zakresy, w których mieści się ponad 90% uzyskanych wyników szybkości ekshalacji (na podstawie analizy wartości szeregu skumulowanego co omówiono w dalszej części rozdziału).

Jak widać na powyższym schemacie, najmniejsze zmiany wartości ekshalacji występowały w okresach zimowych. Rok 2006 różnił się od poprzednich, ponieważ w zimie

zaobserwowano największą rozpiętość zmierzonych wartości. Wyższe wartości ekshalacji zostały zmierzone na początku sezonu zimowego (około połowy stycznia) na kilka dni przed wystąpieniem gwałtownego i znacznego ochłodzenia (do -20°C) oraz dużych opadów śniegu. W kolejnych miesiącach zimowych (do końca marca 2006) wartości ekshalacji były niskie. Często w tym okresie nie udawało się zarejestrować narastania stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej, co wynikało z faktu długotrwałego zmrożenia górnej warstwy gleby.

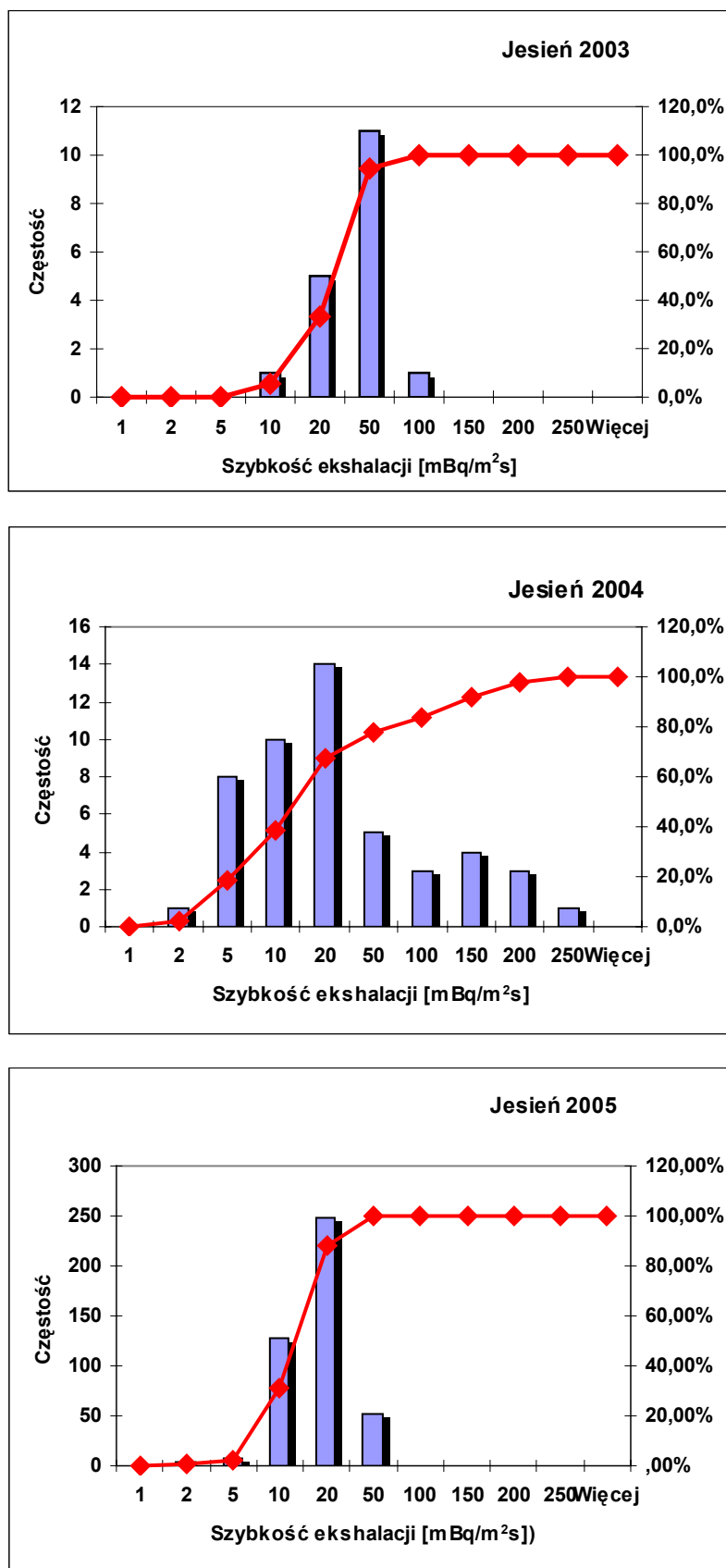
W roku 2004 największą rozpiętość zmierzonych wartości ekshalacji radonu zaobserwowano w okresie wiosennym, natomiast w 2005 roku był to okres letni. W okresach jesiennych dynamika procesu ekshalacji radonu jest słabsza. W jesieni 2004 roku zanotowano jednorazowy szybki wzrost wartości ekshalacji do ponad $200 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ w ciągu kilku dni.

W związku z dużą zmiennością szybkości ekshalacji radonu z gruntu w ciągu roku (jak pokazano powyżej) dalszą analizę dynamiki tego procesu przeprowadzono oddzielnie dla poszczególnych sezonów. Na kolejnych rysunkach (Rys. 6.2 ÷ Rys. 6.5) przedstawiono histogramy szybkości ekshalacji radonu wraz z wykresami łącznych udziałów procentowych (dystrybuanty szeregu kumulowanego) dla poszczególnych sezonów lat 2003, 2004, 2005, 2006.

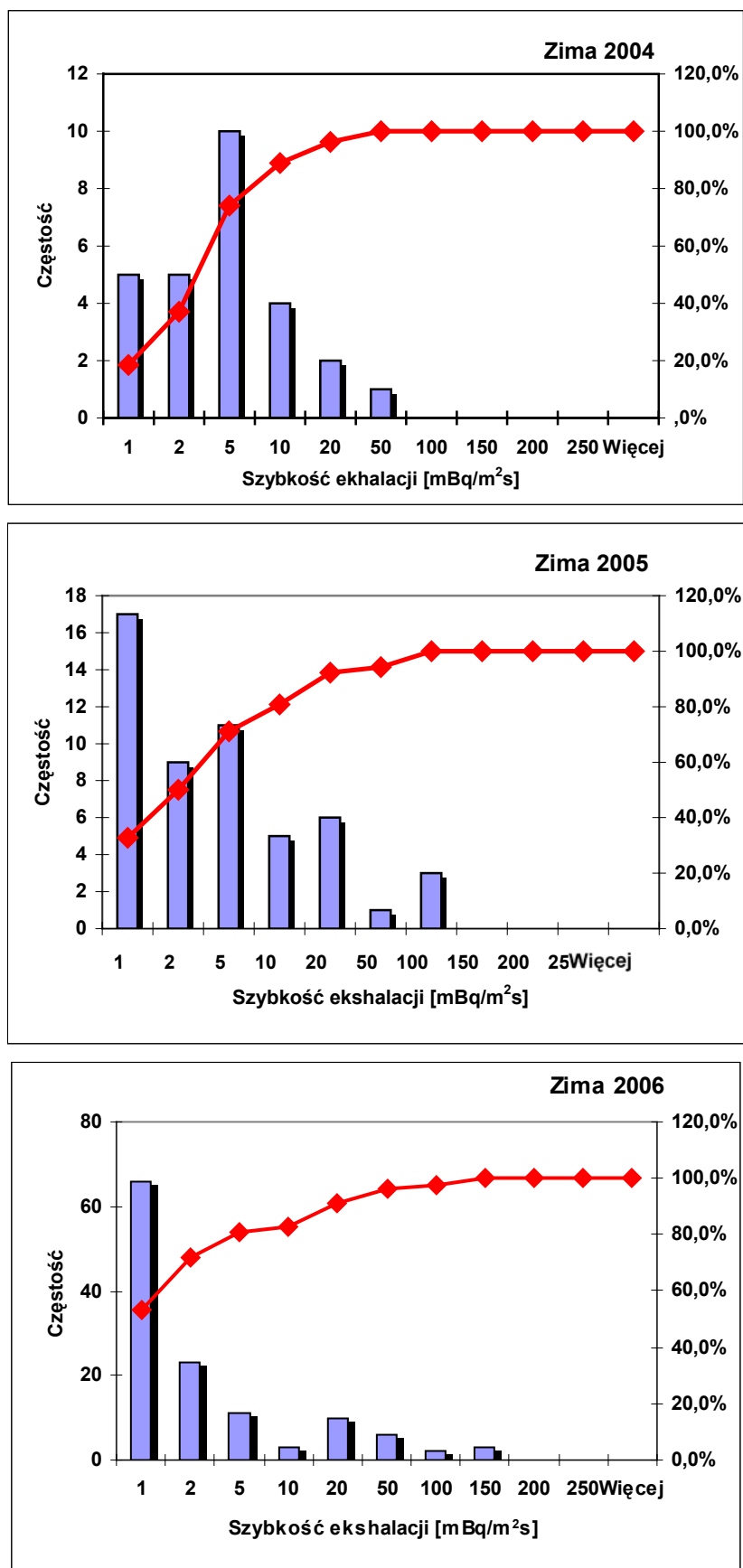
W celu zaobserwowania sezonowej dynamiki procesu ekshalacji ustalono jednakowy zbiór wartości granicznych definiujących przedziały dla wszystkich histogramów jako: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200 i $250 \text{ mBq/m}^2\text{s}$.

Sumaryczne statystyki opisowe sporządzone w oparciu o wyniki pomiarów szybkości ekshalacji zebrano w Tabeli 6.2. Pozwoliły one uzyskać informacje o zasadniczych tendencjach i zmienności wartości ekshalacji. Tabela w kolejnych kolumnach zawiera dane dotyczące ilości pomiarów ekshalacji wykonanych w danym sezonie, średnie arytmetyczne i granice przedziałów wyznaczone na poziomie ufności 95%, mediany, mody, wartości minimalne i maksymalne, wariancje, odchylenie standardowe, skośność rozkładu oraz kurtozy wraz z błędami określenia tych wielkości.

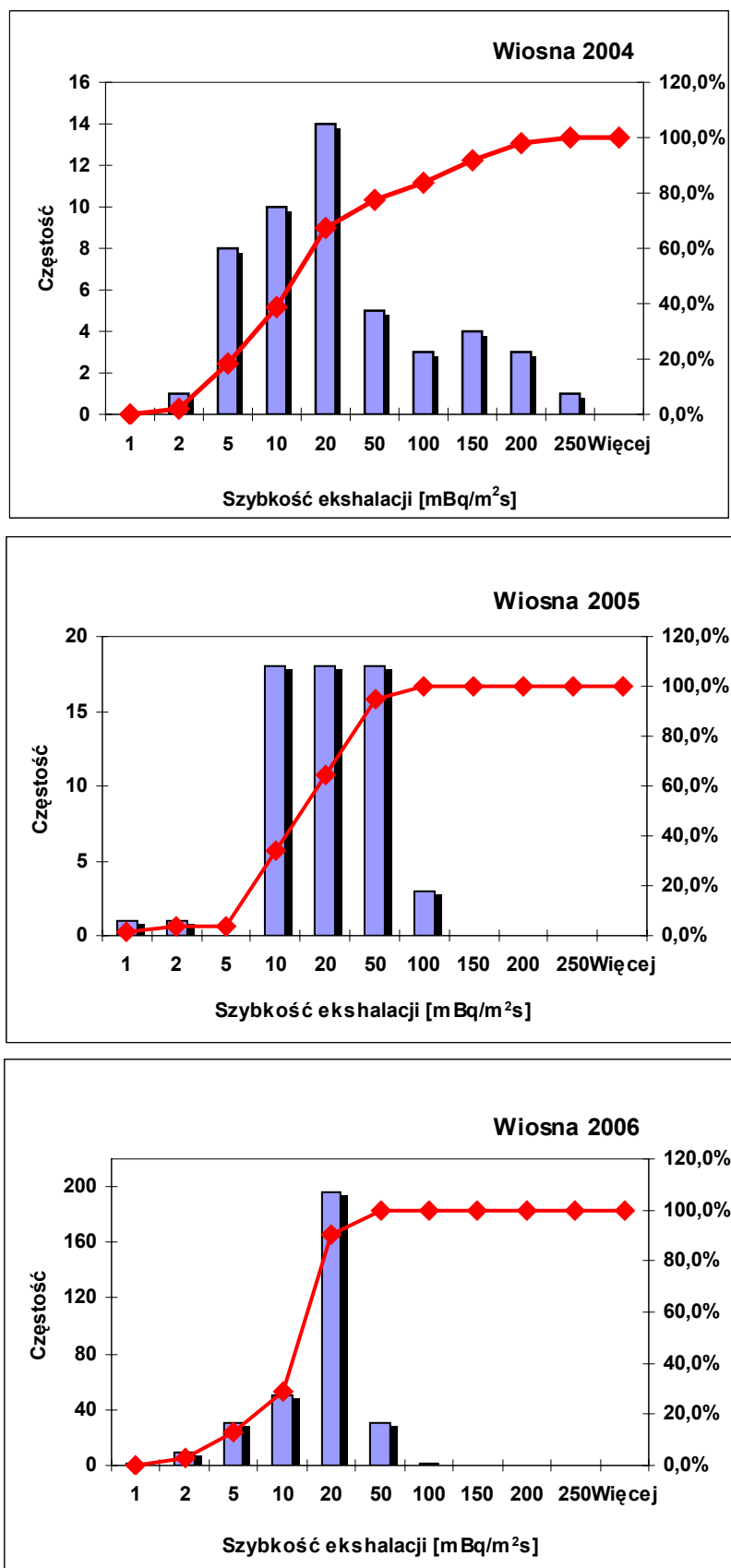
Analiza przedstawionych na rysunkach Rys.6.2 ÷ Rys.6.5 histogramów szybkości ekshalacji i wykresów dystrybuanty szeregu kumulowanego dla sezonów pomiarowych obejmujących lata 2004-2006 pozwala na stwierdzenie, że przedstawione rozkłady nie spełniają kryteriów rozkładów normalnych. Niektóre z nich (zima 2004, wiosna 2005) to rozkłady wielomodalne i silnie dodatnio skośne. Inne rozkłady, np. jesień 2004, wiosna 2004, lato 2006, zima 2006 są dwumodalne i także wykazują dodatnią skośność.



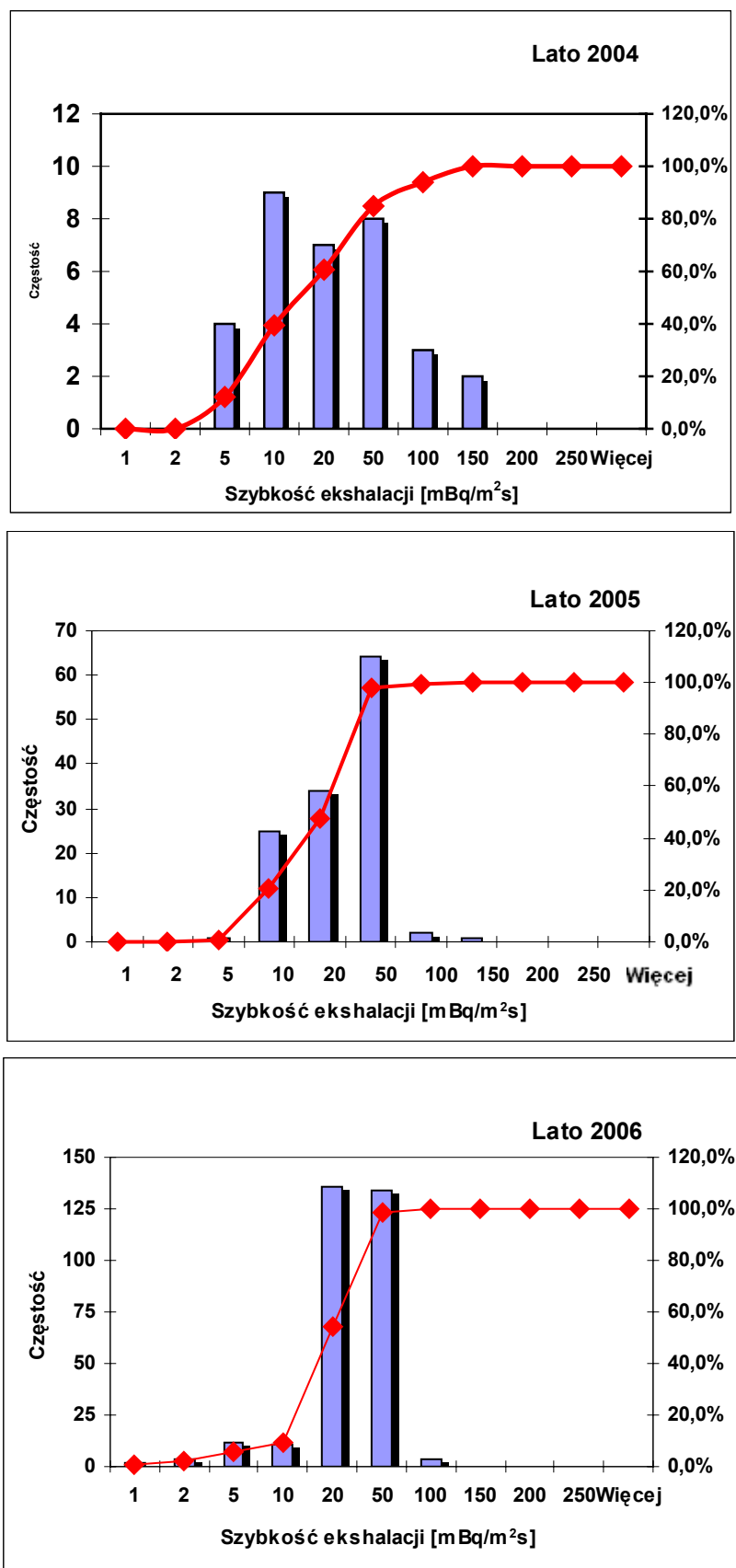
Rys.6.2. Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: jesień 2003, jesień 2004 i jesień 2005.



Rys.6.3. Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: zima 2004, zima 2005 i zima 2006.



Rys.6.4. Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: wiosna 2004, wiosna 2005 i wiosna 2006



Rys.6.5. Histogramy szybkości ekshalacji i wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego dla okresów: lato 2004, lato 2005 i lato 2006

Tabela 6.2. Statystyki opisowe wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu

	Rok	Ilość pomiarów	Średnia (przedział ufności)	Mediana	Moda	Min. ÷ Maks.	Wariancja	Odchylenie standardowe ± błąd	Skośność ± błąd	Kurtoza ± błąd
	1	2	3	6	7	8	9	10	11	12
	[mBq/m ² ·s]									
ZIMA	2004	27	5,7 (2,2÷9,1)	3,2	W.	0,3 ÷ 46,1	76,5	8,7 ± 1,7	4,1 ± 0,5	18,9 ± 0,9
	2005	52	7,23 (3,06÷11,4)	2,0	0,0	0 ÷ 77,4	224,2	15,0 ± 2,1	3,4 ± 0,3	11,6 ± 0,65
	2006	124	8,05 (4,20÷11,9)	0,9	0,0	0 ÷ 120,0	469,9	21,7 ± 2,0	4,0 ± 0,2	16,5 ± 0,4
WIOSNA	2004	32	64,9 (34,0÷95,7)	25,9	W.	2,1 ÷ 386,1	7326,2	85,6 ±15,1	2,2 ± 0,4	5,7 ± 0,8
	2005	59	19,1 (14,9÷23,3)	13,3	W.	1,4 ÷ 97,9	259,9	16,1 ± 2,1	2,5 ± 0,3	9,1 ± 0,6
	2006	318	12,9 (12,2÷13,6)	12,8	11,23	0,9 ÷ 50,5	43,5	6,6 ± 0,4	1,2 ± 0,1	5,3 ± 0,3
LATO	2004	33	26,9 (16,6÷37,1)	15,6	W	3,1 ÷ 112,3	834,0	28,9 ± 5,0	1,7 ± 0,4	2,1 ± 0,8
	2005	127	22,8 (20,1÷25,5)	20,4	W	3,6 ÷ 127,7	238,3	15,4 ± 1,4	2,9 ± 0,2	16,4 ± 0,4
	2006	304	20,0 (18,8÷21,2)	19,3	17,1	0 ÷ 86,0	108,1	10,4 ± 0,60	3,0 ± 0,1	18,4 ± 0,3
JESIEŃ	2003	18	23,5 (17,4÷29,6)	21,5	W	5,7 ÷ 63,0	151,0	12,3 ± 2,9	2,2 ± 0,5	6,2 ± 1,0
	2004	49	37,1 (21,7÷52,6)	10,8	W	1,4 ÷ 212,6	2901,1	53,9 ± 7,69	1,8 ± 0,3	2,2 ± 0,7
	2005	436	13,0 (12,5÷13,6)	11,4	10,7	1,9 ÷ 45,9	35,3	5,9 ± 0,3	1,8 ± 0,1	4,6 ± 0,2

W – rozkład wielomodalny

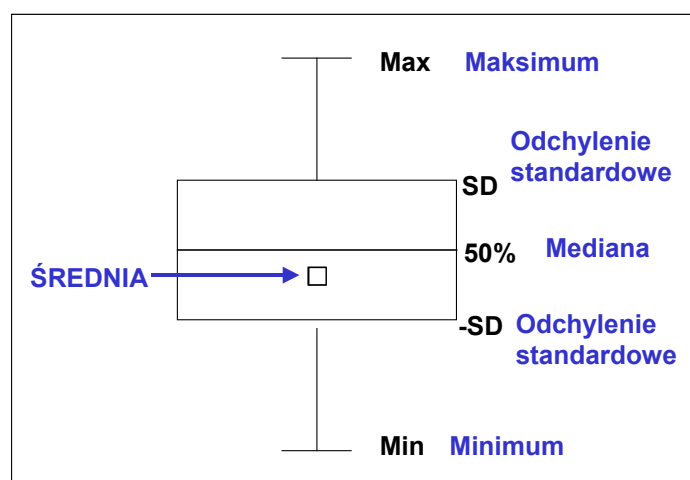
Wszystkie rozkłady obejmujące okresy letnie są podobnego typu – charakteryzują się brakiem klas mniejszych niż 5 mBq/m²·s i silnie zaznaczonymi klasami modalnymi 50 mBq/m²·s (lato 2005) i 20÷50 mBq/m²·s (lato 2006).

Na histogramach zamieszczono także wykresy dystrybuanty szeregu kumulowanego. W okresach zimowych ponad 90% uzyskanych wyników pomiarów ekshalacji mieści się w przedziale do 20 mBq/m²·s. Dla okresów wiosennych te przedziały wartości ekshalacji są bardziej zróżnicowane: do 150 mBq/m²·s (wiosna 2004), do 50 mBq/m²·s (wiosna 2005) i do 20 mBq/m²·s (wiosna 2006). Podobne zróżnicowanie występuje w przypadku jesieni: do 50 mBq/m²·s (jesień 2003), do 100 mBq/m²·s (jesień 2004) oraz do 20 mBq/m²·s

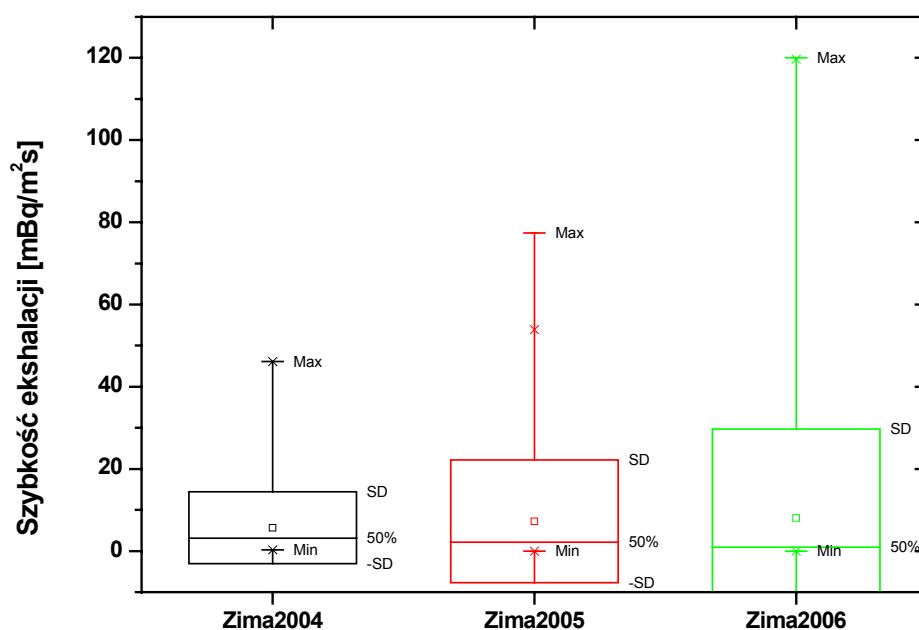
(jesień 2005). W okresach letnich ponad 90% uzyskanych wyników pomiarów ekshalacji mieści się w przedziałach do 50 mBq/m²·s (lato 2005, lato 2006) i do 100 mBq/m²·s (lato 2004).

Na rysunkach Rys. 6.7 ÷ Rys. 6.10 zebrano w formie graficznej analizę statystyczną wyników szybkości ekshalacji uzyskanych w całym okresie pomiarowym pogrupowanych sezonowo.

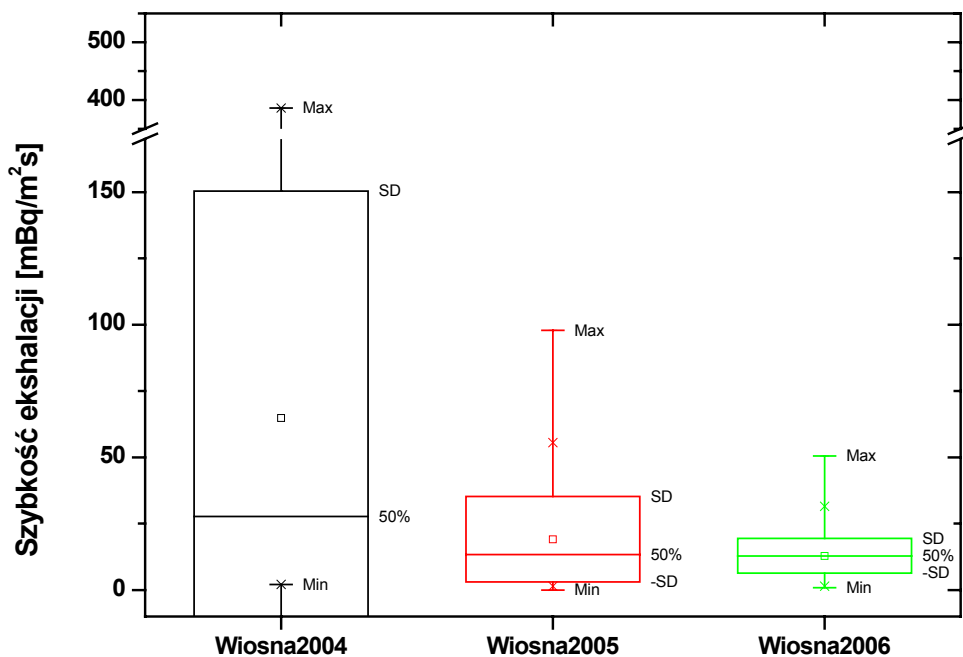
Na wykresach przedstawiono średnią wartość szybkości ekshalacji, medianę, odchylenie standardowe oraz obserwowane wartości minimalne i maksymalne. Oznaczenia tych wielkości stosowane na tych wykresach przedstawiono na Rys. 6.6.



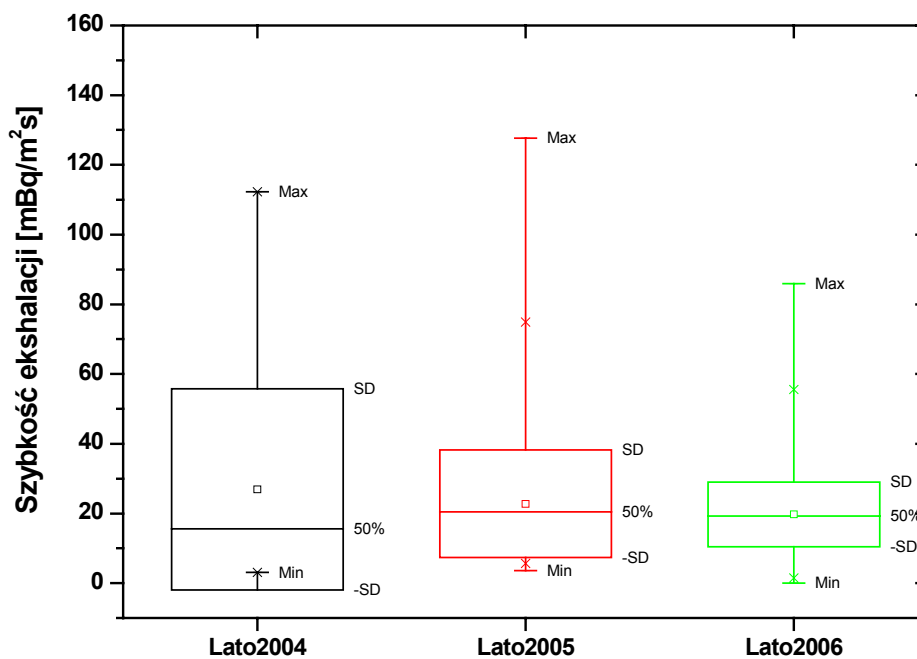
Rys. 6.6. Oznaczenie symboli stosowanych na Rys. 6.7 ÷ 6.10



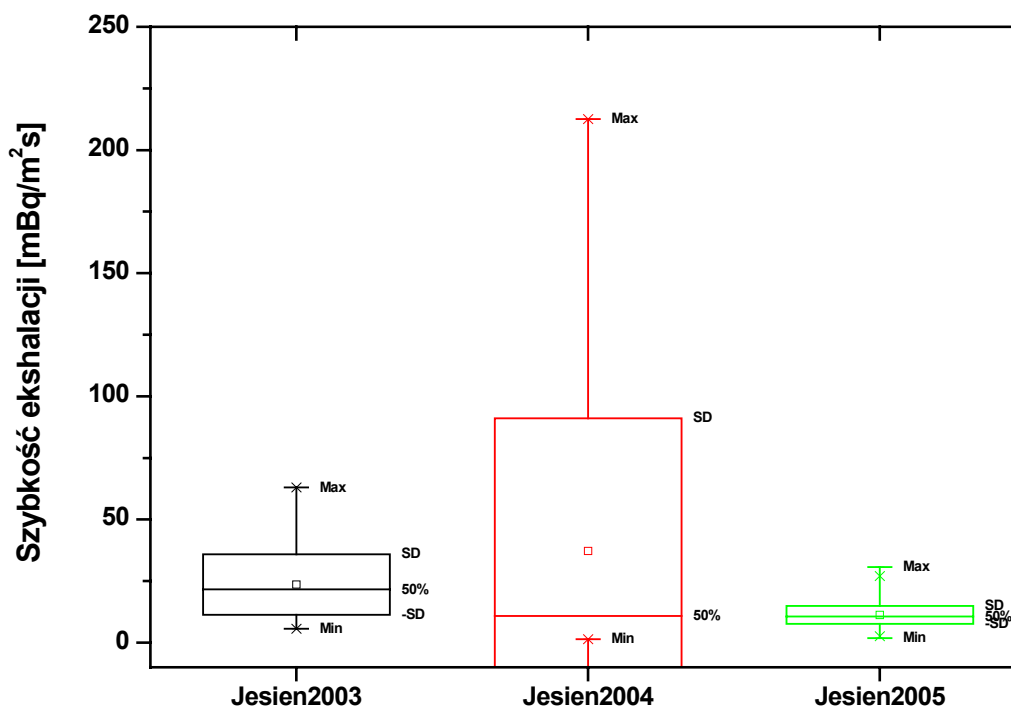
Rys.6.7. Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla zimy 2004, 2005, 2006



Rys.6.8. Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla wiosny 2004, 2005, 2006



Rys.6.9. Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla lata 2004, 2005, 2006



Rys.6.10. Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji dla jesieni 2003, 2004, 2005

Okresy zimowe charakteryzują się zbliżonymi wartościami median oraz zbliżonymi poziomami wartości średnich dla lat 2004, 2005 i 2006. Wartości maksymalne różniły się znacznie: od 46,1 mBq/m²s w zimie 2004, do 120,0 mBq/m²s w zimie 2006 roku. Najmniejsze odchylenie standardowe zaobserwowano w zimie 2004 (SD = 8,7 mBq/m²s), a największe w okresie zimowym w roku 2006 (SD = 21,7 mBq/m²s). Świadczy to o największym skupieniu wartości szybkości ekshalacji wokół wartości średniej dla okresów zimowych. Potwierdzają to również obliczone wartości skośności oraz kurtozy. Dla kolejnych lat (2004, 2005 i 2006) skośności są zbliżone i wynoszą odpowiednio: 4,1; 3,4; 4,0, zaś kurtozy są jednymi z najwyższych z całego okresu pomiarowego i wynoszą odpowiednio: 18,9; 11,6 i 16,5 (Tabela 6.2).

W **okresach wiosennych** szybkości ekshalacji charakteryzują się średnimi od 12,9 mBq/m²s (wiosna 2006) do 64,9 mBq/m²s (wiosna 2004). Średnia z okresu wiosny 2004 jest też najwyższą średnią zaobserwowaną w trakcie całego okresu pomiarowego. Mediany wiosennych szybkości ekshalacji są niższe i wynoszą: 25,9 mBq/m²s (2004 r.), 13,3 mBq/m²s (2005 r.) i 12,8 mBq/m²s (2006 r.). Tylko dla okresu wiosny 2006 obserwowane są bardzo zbliżone wartości średniej i mediany (odpowiednio: 12,9 mBq/m²s i 12,8 mBq/m²s). Skupienie wartości szybkości ekshalacji (kurtoza) wokół wartości średniej

wiosennej wynosi: 5,7 (2004 r.), 9,1 (2005 r.) i 5,3 (2006 r.), więc jest dużo mniejsze niż dla okresów zimowych. W okresie wiosennym (2004) zaobserwowano też największe zróżnicowanie wyników ($SD = 85,6 \text{ mBq/m}^2\text{s}$) i największą zarejestrowaną w ciągu całego okresu pomiarowego wartość szybkości ekshalacji wynoszącą $386 \text{ mBq/m}^2\text{s}$.

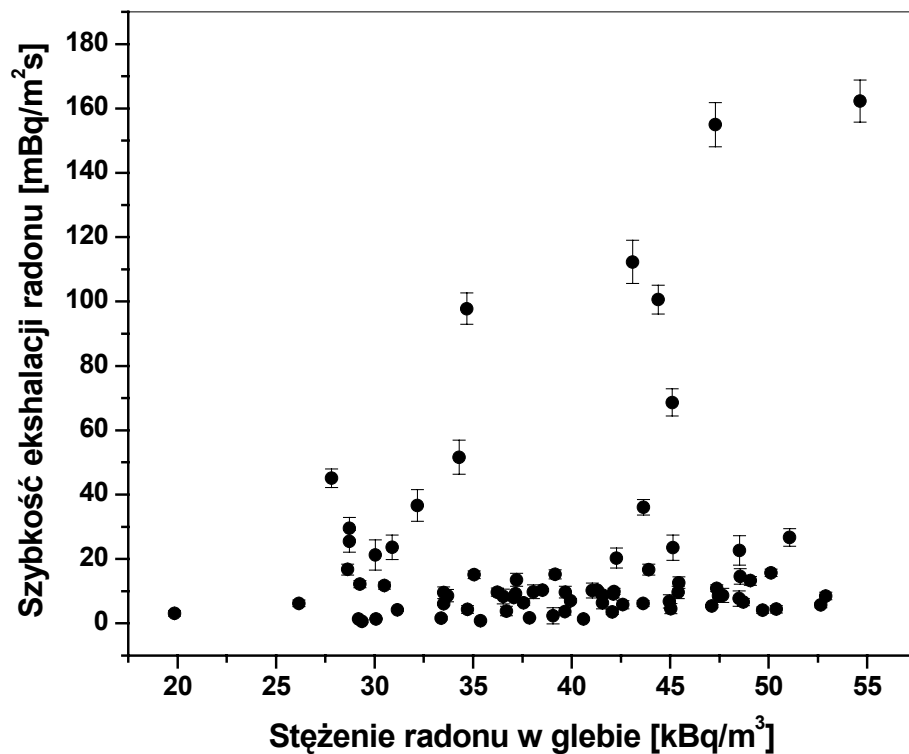
W **okresach letnich** średnie szybkości ekshalacji były podobne do wartości rejestrowanych w okresach jesiennych i osiągały: $26,9 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2004 r.), $22,8 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2005 r.) i $20,0 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2006 r.). Mediany dla tych sezonów wykazywały zgodność z wartościami średnimi poza latem 2004 gdzie wartość mediany była wyraźnie niższa ($15,6 \text{ mBq/m}^2\text{s}$). Wartości odchylenia standardowego (SD) zawierały się w przedziale od $10,4 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2006 r.) do $28,9 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2004 r.) i były najbardziej zbliżone do wartości SD dla sezonów zimowych, co świadczy o dość znacznym skupieniu wartości szybkości ekshalacji wokół średnich dla okresów letnich.

Okresy jesienne charakteryzowały, podobne jak w okresach letnich, średnie szybkości ekshalacji w zakresie od $13,0 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2005 r.) do $37,1 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ (2004 r.). Mediany podobnie jak w okresach letnich wykazywały dobrą zgodność z wartościami średnimi ekshalacji poza rokiem 2004, w którym mediana była wyraźnie niższa i wyniosła $10,8 \text{ mBq/m}^2\text{s}$. Wartości odchylenia standardowego (SD) dla okresów jesiennych w latach 2003 i 2005 miały jedne z najniższych wartości (podobnie jak okres wiosny 2006) i wynosiły odpowiednio: 12,3 (2003 r.) i 5,9 (2005 r.). Wartość odchylenia standardowego w jesieni 2004 wynosiła $53,9 \text{ mBq/m}^2\text{s}$, co świadczy o znacznie większym rozrzucie wartości szybkości ekshalacji wokół średniej niż dla okresów jesiennych pozostałych lat. W tym okresie zaobserwowano również najwyższą dla tego sezonu maksymalną wartość szybkości ekshalacji wynoszącą $213 \text{ mBq/m}^2\text{s}$.

6.2. Wpływ stężenia radonu w glebie na szybkość jego ekshalacji

Na terenie RSF poza pomiarami szybkości ekshalacji radonu z gruntu prowadzono także pomiary stężenia radonu w powietrzu glebowym, zarówno pomiary chwilowe (metoda aktywna opisana w rozdziale 4.4 pracy) jak i pomiary długoterminowe detektorami śladowymi CR-39 (metoda pasywna). Odpowiednie stanowiska pomiarowe przedstawiono na Rys. 4.3 w rozdziale 4 pracy. Pomiary chwilowe prowadzono w latach 2003 – 2005 do momentu uruchomienia automatycznego stanowiska AutoExh.

Dla potrzeb tej pracy zbadano wpływ stężenia radonu w powietrzu glebowym (C_{Rn}) na szybkość jego ekshalacji wykorzystując tylko wybrane wyniki pomiarów metodą aktywną, tj. te, które były wykonywane bezpośrednio po pomiarze szybkości ekshalacji radonu z gruntu. Przeprowadzono 77 takich pomiarów w czasie od 23 lipca 2004 roku do 9 września 2005 roku. Na Rys. 6.11 pokazano wykres zależności szybkości ekshalacji radonu od aktualnego stężenia radonu w powietrzu glebowym.



Rys. 6.11. Zależność szybkości ekshalacji radonu z gruntu od stężenia radonu w powietrzu glebowym

Widać, że zależność pomiędzy tymi wielkościami nie jest jednoznaczna. Na wykresie można zauważyć, że wyniki grupują się tworząc dwie wyraźne populacje. W obrębie jednej z nich można zaobserwować proporcjonalność prostą – wyższe stężenia radonu C_{Rn} w glebie generują wzrost szybkości ekshalacji E . Druga populacja (liczniejsza), nie wykazuje praktycznie żadnej zależności szybkości ekshalacji radonu od jego stężenia w glebie. Sugeruje to, że dla tej populacji wpływ czynników meteorologicznych na szybkość ekshalacji radonu dominuje nad bezpośrednią zależnością od jego stężenia w glebie. Wartości E w tej populacji należą do przedziału od zera do około 20 mBq/m²s. Takie wartości E występują w okresach zimowych lub w czasie bardziej intensywnych opadów, a więc w sytuacjach, gdy występuje wyraźne oddziaływanie czynników meteorologicznych na proces ekshalacji. Obecność tych dwóch populacji wyników może tłumaczyć dwumodalny charakter niektórych rozkładów szybkości ekshalacji przedstawionych w rozdziale 6.1 (jesień 2004, wiosna 2004, lato 2006, zima 2006).

Na Rys. 6.11 nie obserwuje się punktów położonych powyżej prostej opisującej liniową zależność $E = f(C_{Rn})$. Prowadzi to wniosku, iż żaden z czynników meteorologicznych nie powoduje wzrostu E poza zakres wynikający z występującego stężenia radonu w glebie. Przedstawione wyniki wskazują, że czynniki meteorologiczne mogą jedynie blokować transport radonu w ośrodku glebowym.

Fakt ten potwierdza złożoność procesu ekshalacji radonu z gruntu i dowodzi, że na szybkość ekshalacji ma wpływ szereg czynników, poza tym bezpośrednim jakim jest stężenie radonu w powietrzu glebowym.

6.3. Charakterystyka warunków meteorologicznych w okresie pomiarowym

W Tabelach 6.3 – 6.5 zebrano dane meteorologiczne charakteryzujące lata, w których prowadzono pomiary. Dane meteorologiczne opracowano zgodnie z ogólnie przyjmowaną w meteorologii procedurą National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [Wea97], na podstawie pomiarów ze stacji meteorologicznej IFJ PAN.

Zestawienia roczne rejestrowanych temperatur zebrano w Tabeli 6.3 jako średnie miesięczne wraz z podaniem maksymalnej i minimalnej wartości średniodobowej. W tabeli podano też maksymalne i minimalne temperatury dobowe oraz dzień, w którym były one zarejestrowane. Brak danych meteorologicznych w styczniu 2004 roku spowodowany był przerwą wynikającą z konserwacji czujników i wymiany oprogramowania.

Tabela 6.4 zawiera zestawienia zarejestrowanych opadów atmosferycznych – podano w niej sumaryczny opad miesięczny, maksymalny opad dobowy wraz z datą wystąpienia tego maksimum (kolumna: Data), a także w kolejnych kolumnach ilości dni w roku z opadami powyżej 0,2 mm, powyżej 2,0 mm i powyżej 20 mm.

Zestawienia roczne prędkości i kierunku wiatru przedstawiono w Tabeli 6.5. Dane obejmują wartości średnie i maksymalne prędkości wiatru w poszczególnych miesiącach w latach 2004 – 2006 wraz z datą kiedy prędkość osiągała wartość maksymalną. Ostatnia kolumna zawiera dominujący kierunek wiatru występujący w danym miesiącu.

Najwyższe średnie temperatury miesięczne w **2004 roku** (powyżej 12°C) występowały od maja do września. Najwyższa średnia temperatura (18,4 °C) dotyczy sierpnia i w sierpniu zanotowano też najwyższą temperaturę w roku wynoszącą 32,3 °C (19.08.2004). Najniższa średnia miesięczna temperatura wystąpiła w lutym (-1,7°C), a najniższą temperaturę (-17,3°C) zanotowano 7.03.2004.

W roku 2004 roczna suma opadów wynosiła 387,4 mm. Najwyższą sumą opadów (> 25 mm) charakteryzowały się miesiące od marca do października z maksimum (77,4 mm) przypadającym na lipiec. W tym miesiącu (29. lipca) wystąpił też największy opad dzienny 29,4 mm. W skali całego roku przeważały dni z dzienną sumą opadów powyżej 0,2 mm (122 dni).

Średnia prędkość wiatru w roku 2004 wynosiła 1,3 m/s. W marcu, kwietniu i listopadzie zarejestrowano średnie miesięczne prędkości wiatru wyższe lub równe 1,5 m/s (z największą wartością 1,6 m/s w kwietniu). Natomiast 19 listopada wystąpiła największa prędkość wiatru równa 21,9 m/s. Dominującym kierunkiem wiatru był kierunek zachodni (W).

W **roku 2005** najwyższe średnie temperatury występowały od czerwca (16,7°C) do września (14,5°C) z maksymalnymi średnimi w lipcu (19,3°C) i sierpniu (17,2°C). Maksymalną temperaturę (34,4°C) zaobserwowano w lipcu (29.07.2005). W czerwcu, lipcu i wrześniu maksymalne temperatury dobowe były powyżej 28°C. Najzimniejszymi miesiącami w roku 2005 były: styczeń (średnia: 0,0 °C), luty (średnia: -3,4°C) i grudzień (średnia: -0,5°C). Najniższe temperatury zanotowano w styczniu, lutym i marcu, odpowiednio -15,8°C (28.01.2005), -21,2°C (9.02.2005) i -14,1°C (2.03.2005).

Roczna suma opadów w 2005 roku kształtowała się na poziomie podobnym jak w roku poprzednim (375,7 mm). W lutym, maju, czerwcu, lipcu i sierpniu zaobserwowano najwyższe sumaryczne opady miesięczne (powyżej 30 mm). Maksymalny opad dzienny (14,4 mm)

wystąpił 4 maja, ale nie było dnia, w którym opad dzienny przekroczył 20 mm. W ciągu całego roku przeważały dni z dziennym opadem powyżej 0,2 mm (131 dni).

Średnia prędkość wiatru w roku 2005 wynosiła 1 m/s. W styczniu, lutym, marcu i grudniu zarejestrowano średnie miesięczne prędkości wiatru w zakresie 1,2 ÷ 1,5 m/s. Najwyższą prędkość wiatru równą 16,5 m/s zanotowano 9 stycznia. Dominującym kierunkiem wiatru był kierunek zachodni (W).

Rok 2006 charakteryzował się bardzo wysokimi średnimi temperaturami (powyżej 15°C) od czerwca do września. W czerwcu średnia temperatura wynosiła 17,6°C, w lipcu 21,6°C, w sierpniu 17,2°C a we wrześniu 15,6°C. Maksymalne temperatury dobowe wystąpiły 26. czerwca (32,9°C) i 21. lipca (34,8°C). Najzimniejszymi miesiącami w 2006 roku były: styczeń (ze średnią: -7,7°C) i luty (średnia: -2,4°C). Minimalną temperaturę (-25,2°C) zanotowano 23. stycznia.

W roku 2006 roczna suma opadów była nieco wyższa niż w latach poprzednich (444,8 mm). Najwyższe miesięczne sumy opadów (powyżej 50 mm) zarejestrowano w maju, czerwcu, sierpniu i listopadzie. Największy opad dzienny wystąpił 27 czerwca (21,1 mm). Podobnie jak w latach poprzednich najwięcej było dni z opadem dziennym powyżej 0,2 mm (154 dni) i tylko 1 dzień z opadem powyżej 20 mm.

Średnia prędkość wiatru w roku 2006 wynosiła 0,9 m/s. W lutym, maju i listopadzie średnie miesięczne prędkości wiatru przekraczały średnią roczną i wynosiły odpowiednio: 1,1 m/s, 1 m/s i 1 m/s. Najwyższą prędkość wiatru równą 14,8 m/s zanotowano 4 września. Dominującym kierunkiem wiatru był kierunek zachodni (W).

Zestawione w wyżej wymienionych tabelach dane meteorologiczne przedstawiono w formie wykresów sporządzonych dla kolejnych lat na rysunkach 6.12, 6.13 oraz 6.14.

Sumaryczne roczne zestawienie danych meteorologicznych (temperatur, opadów, szybkości i kierunku wiatru) dla lat, w których prowadzono pomiary szybkości ekshalacji radonu zebrano w Tabeli 6.6.

Tabela 6.3. Zestawienia roczne wartości temperatury powietrza [°C]

MIESIĄC	TEMPERATURA			TEMPERATURA DOBOWA				
	średnia miesięczna	maksymalna	minimalna	maksymalna	dzień	minimalna	dzień	
ROK 2004	1	-	-	-	-	-	-	
	2	-1,7	1,7	-5,3	6	22	-10,9	20
	3	3,2	7,4	-1	20,9	19	-17,3	7
	4	9,3	14,6	3,9	20,5	22	-1,9	3
	5	12,6	17,9	7	25	4	1,1	15
	6	16,7	22,1	11,2	27,8	23	6,9	22
	7	18	23,3	12,8	30,8	18	7,7	3
	8	18,4	24,5	12,6	32,3	19	8	24
	9	13,6	19,8	7,5	27,6	14	1,8	18
	10	10	16	5	24,9	6	-2,6	13
	11	4,4	7,1	1,5	19	4	-8,9	22
	12	0,8	3,8	-2,3	11,1	25	-8,5	22
ROK 2005	1	0	3,2	-3,5	13,2	8	-15,8	28
	2	-3,4	-0,1	-6,7	6,2	13	-21,2	9
	3	1,1	6	-4	16,7	25	-14,1	2
	4	9,5	15,4	3,2	22,3	18	-4,1	22
	5	14	19,9	7,4	33	30	1,2	14
	6	16,7	22	10,7	29,4	25	5,4	2
	7	19,3	24,9	13,8	34,4	29	8,6	25
	8	17,2	22,2	12,1	27,6	30	8,4	10
	9	14,5	21,1	8,4	28,3	9	2,8	22
	10	9,1	14,6	4,4	21	8	-4,9	30
	11	2,4	6,3	-1,7	14,7	3	-7,9	24
	12	-0,5	1,6	-2,9	6,6	4	-9,6	19
ROK 2006	1	-7,7	-3,2	-11,8	3,4	21	-25,2	23
	2	-2,4	0,7	-5,8	10,8	18	-19,4	7
	3	0,7	4,7	-3,5	16,1	28	-1,9	7
	4	9,6	15,2	3,8	23,5	26	-3,3	7
	5	13,7	19,5	7,8	26,2	22	3,4	11
	6	17,6	23,2	11,6	32,9	26	5,5	2
	7	21,6	28,9	13,8	34,8	21	9,0	4
	8	17,2	22,6	12,4	30,9	18	8,3	27
	9	15,6	22,6	9,4	27,4	7	5,5	10
	10	10,2	17,6	3,8	24,2	1	-6,0	31
	11	5,6	9,8	1,8	18,2	16	-4,8	3
	12	2,8	6,9	-0,7	17,6	9	-5,6	12

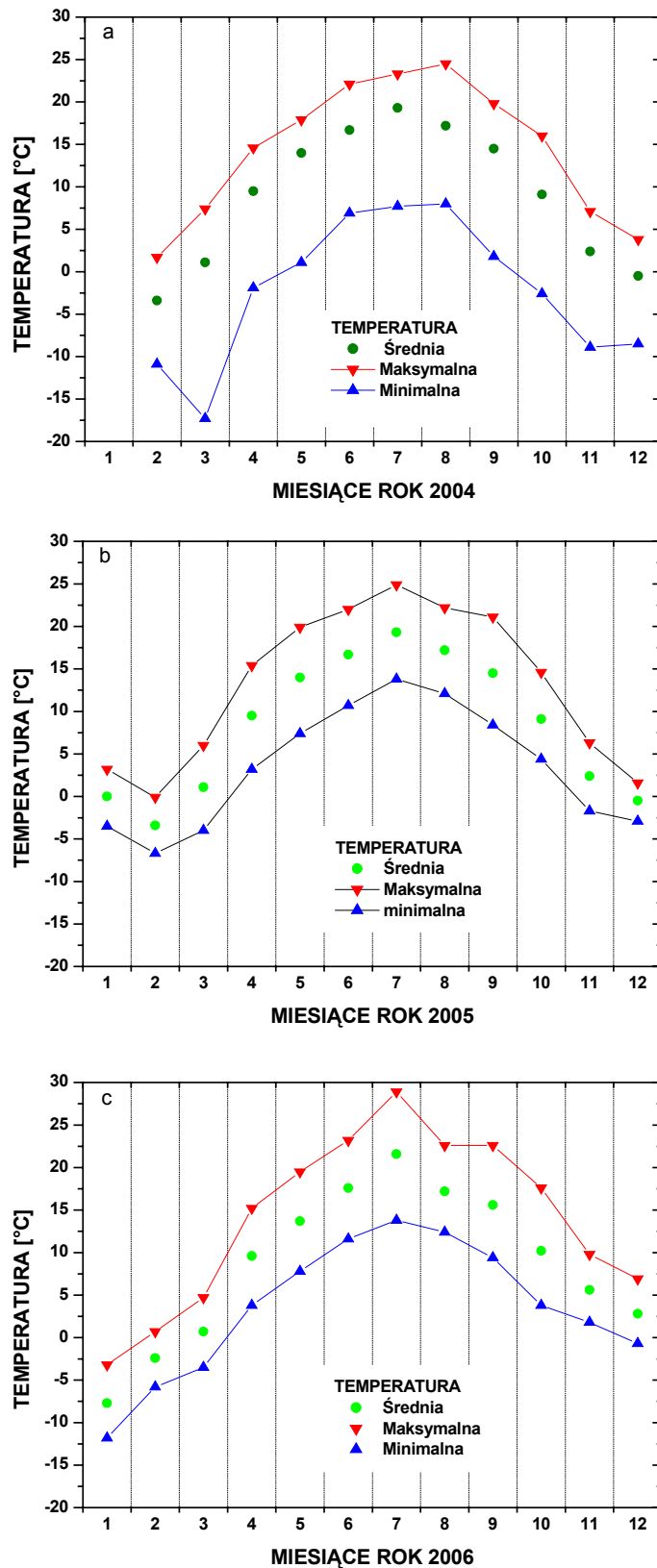
Tabela 6.4. Zestawienia roczne opadów atmosferycznych [mm]

	MIESIĄC	Suma opadów	Maksymalny opad dobowy	Data	Ilość dni z opadami		
					>0,2 mm	>2 mm	>20 mm
ROK 2004	1	-	-	-	-	-	-
	2	10,4	3,4	27	6	3	0
	3	49,2	8,8	25	16	8	0
	4	25,4	13,2	7	8	2	0
	5	45,2	11,4	11	14	6	0
	6	59,6	13,8	20	17	9	0
	7	77,4	29,4	29	19	10	1
	8	37,4	7,6	31	15	6	0
	9	28,4	12	15	8	4	0
	10	35,2	10,6	9	10	5	0
	11	11,6	2,6	8	7	1	0
	12	7,6	4,2	27	2	1	0
ROK 2005	1	32	10,2	4	10	6	0
	2	30,4	4,8	16	14	5	0
	3	12,2	5,4	18	7	2	0
	4	26,2	7,2	26	9	4	0
	5	47,8	14,4	4	17	7	0
	6	41,6	11,2	6	11	5	0
	7	62	10,6	19	12	8	0
	8	56,6	11	8	14	6	0
	9	17,2	5,6	17	6	3	0
	10	5,6	1,6	1	4	0	0
	11	25,1	6,6	26	16	6	0
	12	19,0	8,9	6	11	3	0
ROK 2006	1	0,3	0,3	21	1	1	0
	2	1,3	0,5	19	4	0	0
	3	19,8	9,1	28	5	2	0
	4	42,4	11,9	5	17	6	0
	5	54,6	13,5	19	20	8	0
	6	85,9	21,1	27	17	10	1
	7	40,6	17,5	24	8	5	0
	8	89,9	13,0	29	19	13	0
	9	16,0	10,4	8	7	2	0
	10	18,0	12,2	29	11	2	0
	11	56,9	14,2	5	25	7	0
	12	19,0	4,8	12	20	2	0

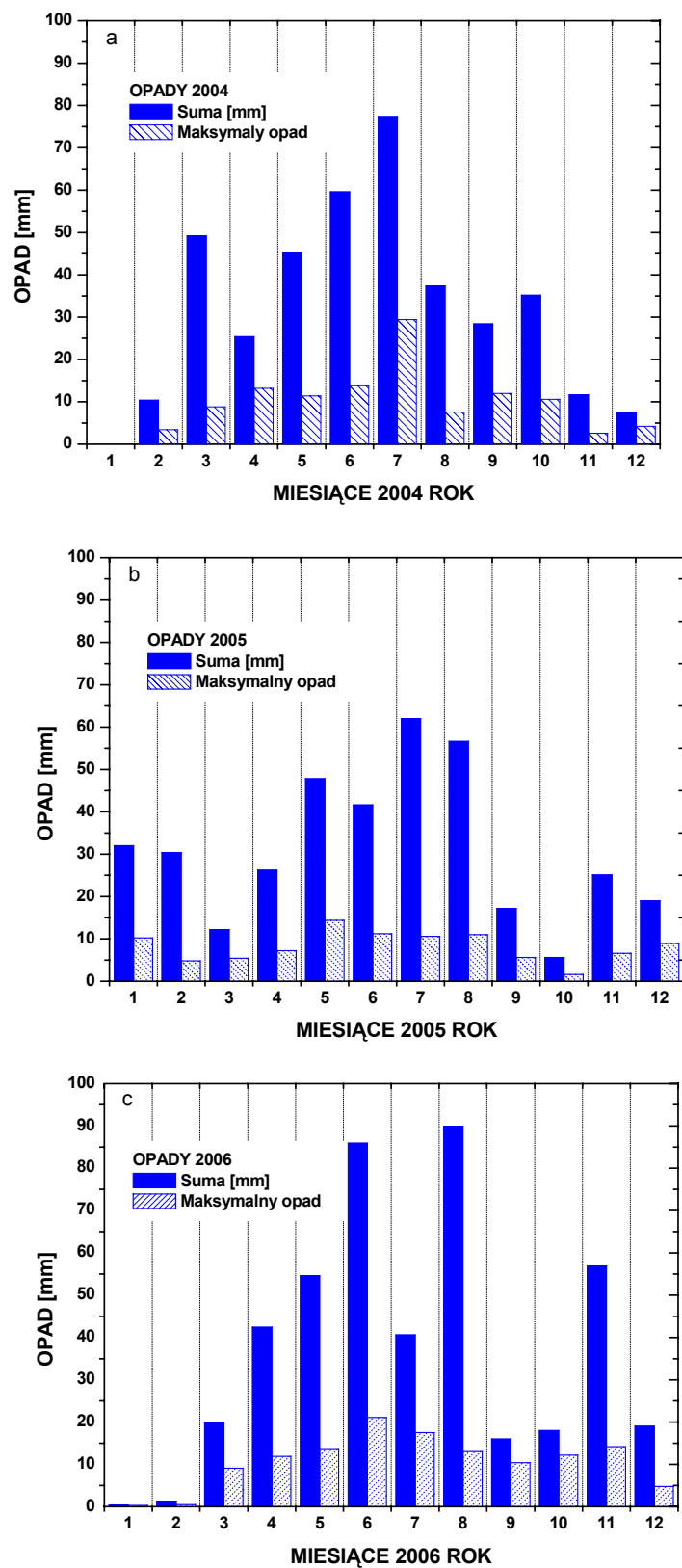
Tabela 6.5. Zestawienia roczne prędkości [m/s] i kierunku wiatru

N – kierunek północny; W – kierunek zachodni; NE – kierunek północno-wschodni

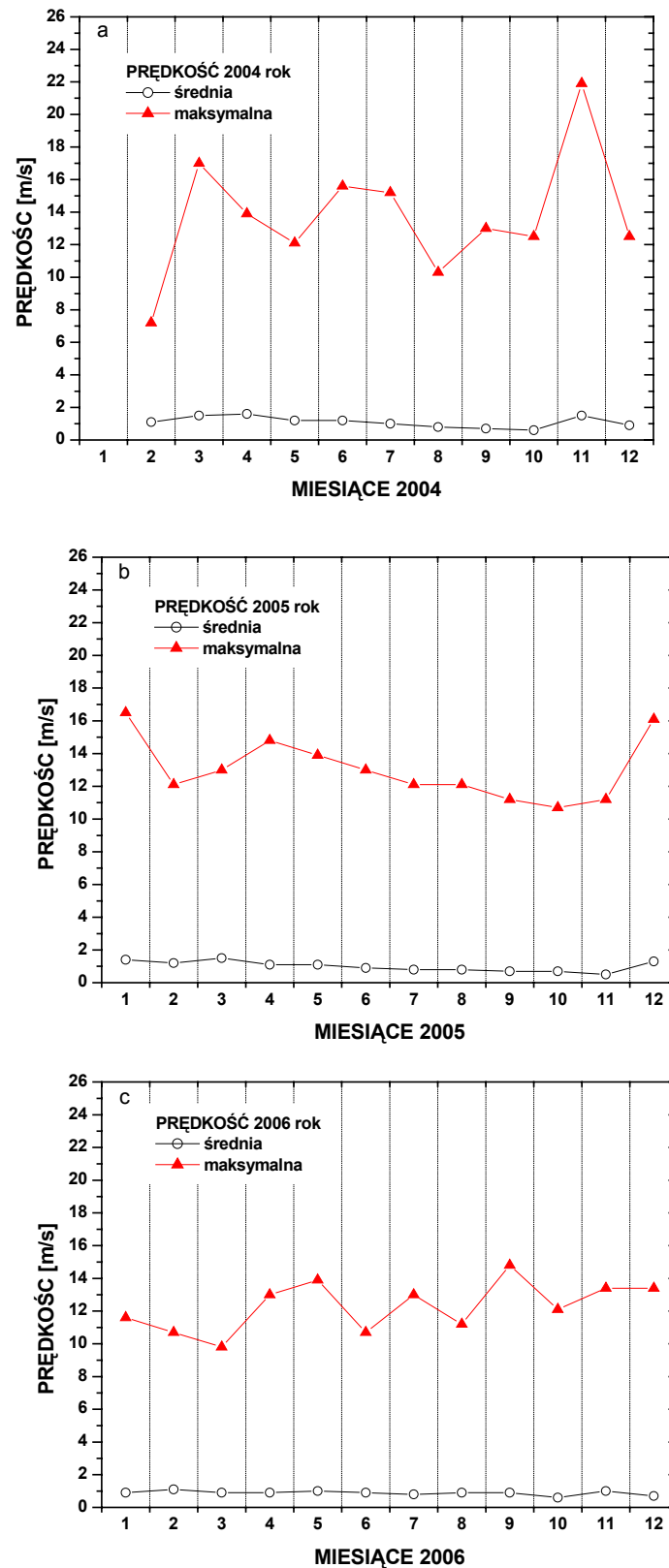
	MIESIĄC	PRĘDKOŚĆ WIATRU		DATA	DOMINUJĄCY KIERUNEK
		ŚREDNIA	MAX		
ROK 2004	1	-	-	-	-
	2	1,1	7,2	19	N
	3	1,5	17	22	NE
	4	1,6	13,9	2	NE
	5	1,2	12,1	6	W
	6	1,2	15,6	3	W
	7	1	15,2	9	W
	8	0,8	10,3	14	W
	9	0,7	13	21	W
	10	0,6	12,5	19	NE
	11	1,5	21,9	19	NE
	12	0,9	12,5	24	W
ROK 2005	1	1,4	16,5	9	W
	2	1,2	12,1	23	NE
	3	1,5	13	7	W
	4	1,1	14,8	28	NE
	5	1,1	13,9	8	W
	6	0,9	13	18	W
	7	0,8	12,1	22	W
	8	0,8	12,1	9	W
	9	0,7	11,2	19	NE
	10	0,7	10,7	26	NE
	11	0,5	11,2	17	NE
	12	1,3	16,1	16	W
ROK 2006	1	0,9	11,6	5	NE
	2	1,1	10,7	24	NE
	3	0,9	9,8	31	W
	4	0,9	13,0	15	W
	5	1,0	13,9	6	W
	6	0,9	10,7	20	NE
	7	0,8	13,0	24	NE
	8	0,9	11,2	30	W
	9	0,9	14,8	4	W
	10	0,6	12,1	29	W
	11	1,0	13,4	5	W
	12	0,7	13,4	31	W



Rys. 6.12. Temperatury powietrza: średnie, minimalne i maksymalne w danym miesiącu w latach 2004 (a), 2005 (b), 2006 (c)



Rys. 6.13. Opady sumaryczne i maksymalne w danym miesiącu w latach 2004 (a), 2005 (b), 2006 (c)



Rys. 6.14. Średnia i maksymalna prędkość wiatru w danym miesiącu w latach 2004 (a), 2005 (b), 2006 (c)

Tabela 6.6. Wybrane parametry meteorologiczne - średnie roczne w latach 2004-2006

TEMPERATURA [°C]							
ROK	TEMPERATURA ŚREDNIA			TEMPERATURA			
	roczna	maksymalna	minimalna	maksymalna	miesiąc	minimalna	miesiąc
2004	9,6	14,4	4,8	32,3	08	-17,3	03
2005	8,3	13,1	3,4	34,4	07	-21,2	02
2006	8,8	14,1	3,6	34,8	07	-25,2	01

OPADY [mm]						
ROK	Suma opadów	Maksymalny opad dzienny	Data	Ilość dni z opadami		
				>0,2 mm	>2 mm	>20 mm
2004	387,4	29,4	29.07.	122	55	1
2005	375,7	14,4	4.05.	131	55	0
2006	444,8	21,1	27.06	154	58	1

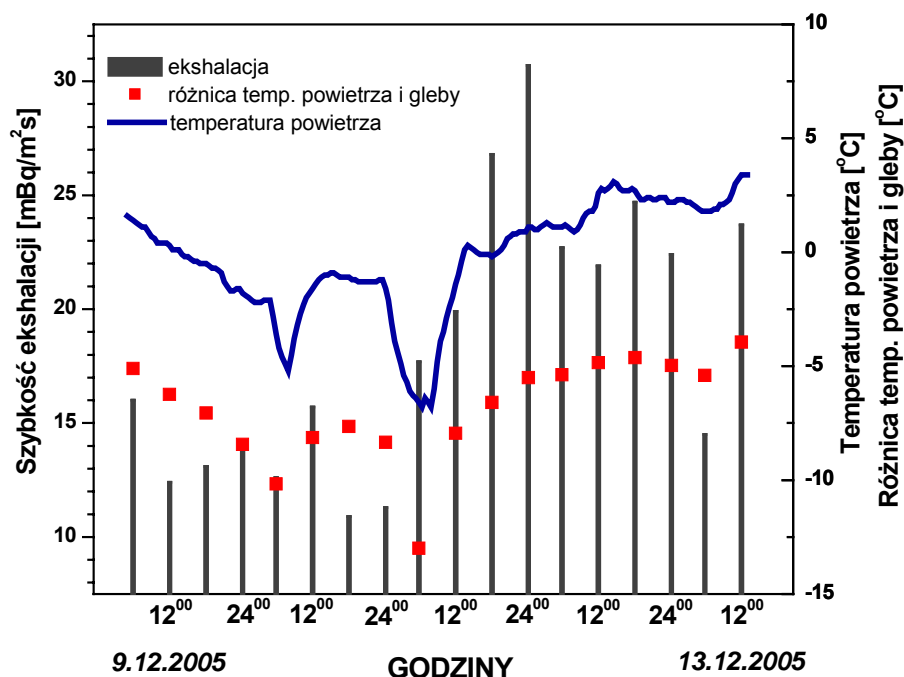
WIATR				
ROK	PRĘDKOŚĆ WIATRU [m/s]			DOMINUJĄCY KIERUNEK
	średnia	maksymalna	data	
2004	1,3	21,9	19.11.	W
2005	1,0	16,5	9.01.	W
2006	0,9	14,8	4.09.	W

CIŚNIENIE ATMOSFERYCZNE			
ROK	Wartość ciśnienia atm. [hPa]		
	średnia	maksymalna	minimalna
2004	992,0	1010,7	958,5
2005	992,0	1016,0	950,5
2006	991,5	1022,8	965,5

6.4. Analiza dobowej dynamiki szybkości ekshalacji radonu z gruntu

Zastosowanie do pomiarów ekshalacji radonu z gruntu stanowiska AutoExh umożliwiło obserwację zmian dobowych wartości ekshalacji. W związku ze zmianami temperatury powietrza, a tym samym zmianami różnicy temperatur pomiędzy powietrzem a glebą, można się spodziewać także zmienności szybkości ekshalacji radonu z gruntu. W czasie prowadzenia pomiarów ekshalacji radonu z gruntu prowadzono rejestrację temperatury gleby na głębokości 100 cm.

Na Rys. 6.15, który prezentuje 4-dniowy okres czasu (od 9 do 13 grudnia 2005) pokazane są przebiegi zmian temperatury powietrza (rejestrowane co pół godziny za pomocą stacji meteorologicznej Weather Monitor) oraz różnice temperatur powietrza i gleby na głębokości 100 cm. Widać jednakową tendencję w przebiegach zmienności obu wielkości. Na rysunku pokazano ponadto przebieg zmian szybkości ekshalacji w tym okresie.

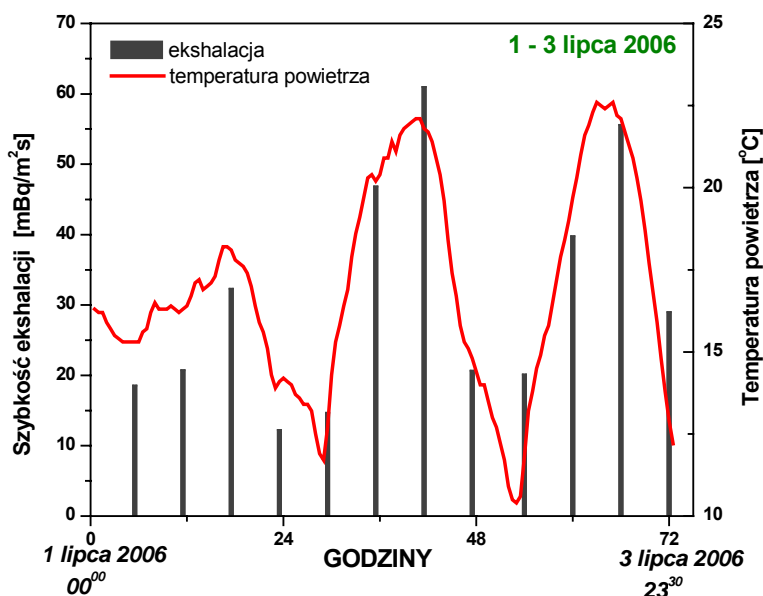


Rys. 6.15. Zmiany dobowe wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle zmian temperatury powietrza (jesień 2005)

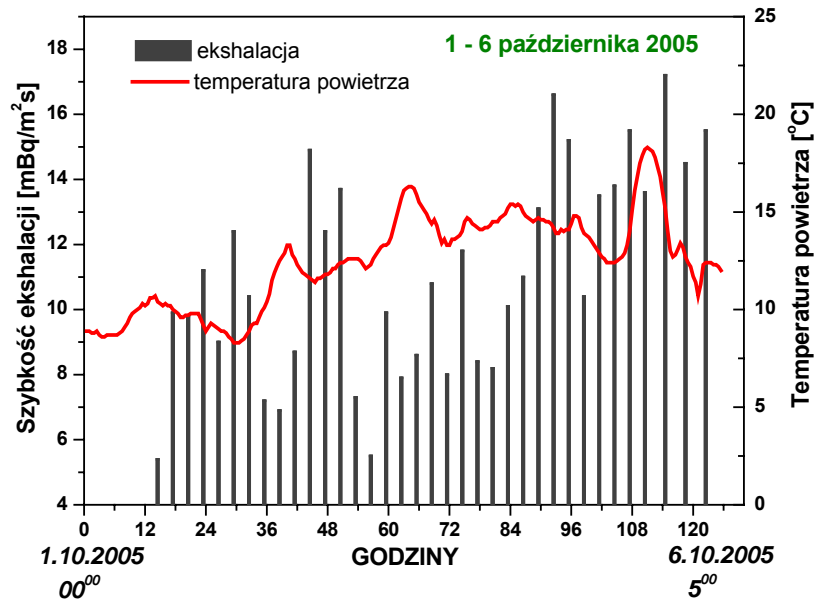
Tak wyraźna zgodność przebiegów pomiędzy temperaturą powietrza i różnicą temperatur powietrza i gleby wynika z tego, że temperatura gleby na głębokości 100 cm nie ulega tak dużym zmianom (dobowym i sezonowym) jak temperatura powietrza. W związku z tym różnica tych temperatur (Δt) dyktowana jest głównie przez zmiany temperatury powietrza.

W dalszej analizie dynamiki dobowej procesu ekshalacji radonu z gruntu przedstawiono wartości zmian dobowych ekshalacji tylko w powiązaniu ze zmianami temperatury powietrza.

Na Rys. 6.16 oraz Rys. 6.17 przedstawiono przykłady przebiegów zmian wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle krzywej dobowych zmian temperatury powietrza. Rys. 6.16 to przykład z okresu czasu kiedy temperatura powietrza zmienia się w ciągu doby regularnie, obniżając się w ciągu nocy do minimum między godzinami 4⁰⁰ ÷ 5⁰⁰ nad ranem i osiągając maksimum w ciągu dnia między godzinami 15⁰⁰ ÷ 16⁰⁰. W tych przypadkach również szybkość ekshalacji radonu z gruntu wykazuje podobny charakter zmienności. Najwyższe wartości dobowe ekshalacji przypadają w godzinach zbliżonych do tych, w których temperatura powietrza jest najwyższa. Wysoka temperatura powietrza powoduje wzrost temperatury gleby z pewnym opóźnieniem czasowym. Potwierdza to istnienie wpływu temperatury gleby na wielkość strumienia radonu. Zależność ta została omówiona w teoretycznej części opisu zjawiska ekshalacji radonu z gruntu (rozdział 2). Nie należy jednakże zapominać, że temperatura (zarówno gleby jak i powietrza) nie jest jedynym czynnikiem oddziałującym na szybkość ekshalacji radonu, w związku z tym nie należy oczekiwać, iż wyniki eksperymentalne będą dobrze odzwierciedlać uproszczone przewidywania teoretyczne. Potwierdzeniem tego jest fakt, iż regularne zmiany szybkości ekshalacji z temperaturą powietrza zdarzają się rzadko i zwykle przez krótki okres czasu (około 3 dni).



Rys. 6.16. Zmiany dobowe wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle zmian temperatury powietrza (lato 2006)



Rys. 6.17. Zmiany dobowe wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu na tle zmian temperatury powietrza (jesień 2005)

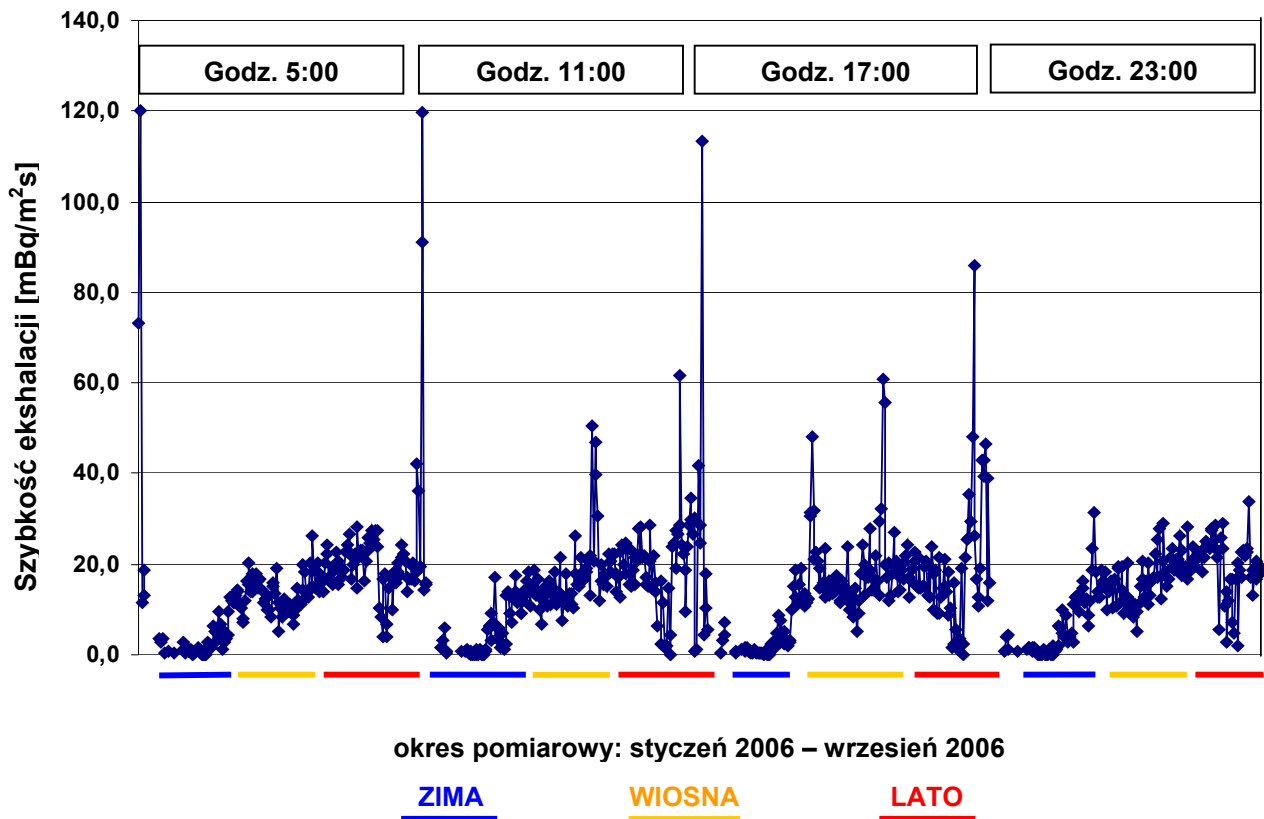
Znacznie częściej zdarzają się okresy czasu kiedy temperatura powietrza nie wykazuje regularnych wahań dobowych (Rys. 6.17). W takich sytuacjach nie obserwuje się także regularnego przebiegu zmian wartości szybkości ekshalacji radonu z gruntu.

W okresach, gdy występują regularne zmiany dobowe temperatury powietrza (z maksimami w okolicach godzin popołudniowych i minimalnymi temperaturami w godzinach nocnych) występują także cykliczne zmiany temperatury gleby (z pewnym opóźnieniem). Zatem obniżenie temperatury powietrza (przy jednocześnie rosnącej temperaturze gleby) odpowiada za zwiększenie udziału mechanizmu konwekcji w transporcie radonu.

W ramach analizy dobowej dynamiki szybkości ekshalacji radonu z gruntu zestawiono wyniki pomiarów uzyskane w okresie od stycznia do września 2006 w grupach odpowiadających poszczególnym godzinom wykonania pomiaru ekshalacji, tj. wyniki uzyskane o godzinach: 5⁰⁰, 11⁰⁰, 17⁰⁰ i 23⁰⁰. Zestawienie to ilustruje graficznie Rys. 6.18. Brak okresu jesiennego (jesień 2005) na rysunku wynika z tego, że w tym czasie stanowisko AutoExh zostało uruchomione i było testowane, co wiązało się ze zmianami godzin prowadzenia pomiarów. Od stycznia do września 2006 godziny pomiarów szybkości ekshalacji nie były już zmieniane, więc wyniki z tego okresu mogły posłużyć do poniższej analizy.

Na Rys. 6.18 widać, że najmniejsze wahania dobowe szybkości ekshalacji występują w okresie zimowym, zaś największe obserwuje się w okresie wiosny i lata.

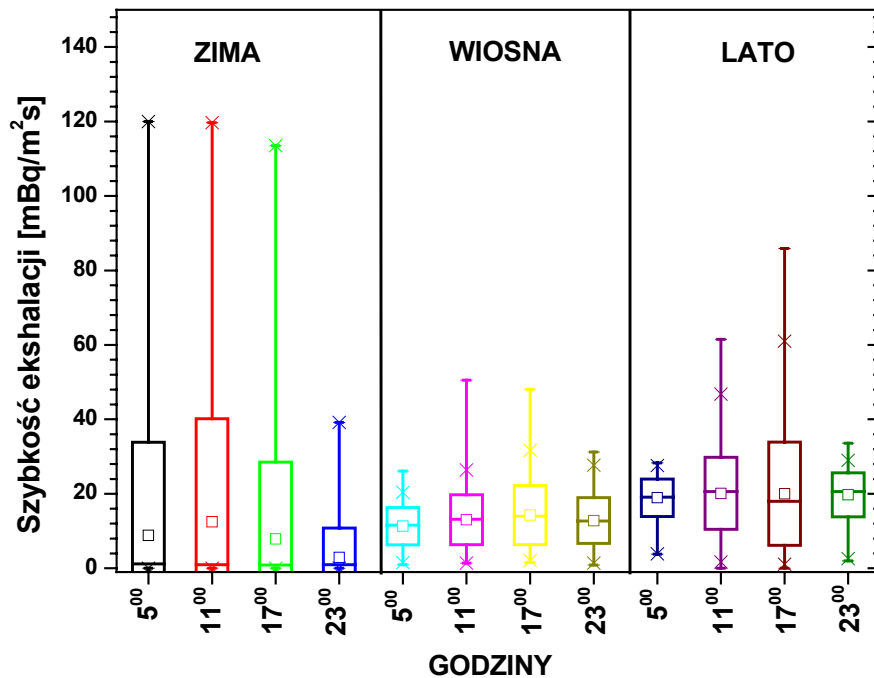
Szybkości ekshalacji o godzinie 5⁰⁰ i 23⁰⁰ wykazują najmniejszą rozbieżność sezonową, przeciwnie niż z godzin 11⁰⁰ i 17⁰⁰, gdy rejestrowana szybkość ekshalacji wykazuje większą dynamikę.



Rys. 6.18. Szybkość ekshalacji radonu z gleby zmierzona w określonych godzinach w okresie 1 styczeń – 26 wrzesień 2006

Maksymalne wartości szybkości ekshalacji radonu zarejestrowane zostały w trakcie pomiarów wykonywanych w godzinach 11⁰⁰ i 17⁰⁰ w okresie letnim. W okresie wiosennym również obserwowana jest większa zmienność ekshalacji w tych godzinach. W tych okresach (tzn. w okresie wiosny i lata) w godzinach przedpołudniowych i popołudniowych występuje prawdopodobnie największy wpływ warunków meteorologicznych na zmianę strumienia radonu z gleby, co może tłumaczyć rejestrowany rozrzut wyników otrzymywanych w czasie pomiaru ekshalacji w tych godzinach. Duże zmiany temperatury powietrza (w czasie dnia) i w efekcie zmiany temperatury oraz wilgotności gleby powodują zmienny strumień radonu. Wynika z tego, iż najlepszą porą dnia na wykonanie reprezentatywnych dla danej pory roku pomiarów ekshalacji w okresie wiosny i lata są godziny ranne lub godziny nocne.

Obliczone w poszczególnych sezonach wartości średnie E dla kolejnych godzin (5^{00} , 11^{00} , 17^{00} i 23^{00}) wraz z medianami oraz wartościami minimalnymi i maksymalnymi przedstawiono na Rys. 6.19 (symbole występujące na rysunku zostały wcześniej opisane na Rys. 6.6 w rozdziale 6.1).



Rys. 6.19. Zestawienie statystyczne wyników szybkości ekshalacji radonu z gleby zmierzonych w godzinach: 5^{00} , 11^{00} , 17^{00} i 23^{00}

Dalsza analiza zmienności dobowej szybkości ekshalacji radonu polegała na sprawdzeniu, w oparciu o wybrane testy nieparametryczne, czy średnie wartości E obliczone dla poszczególnych godzin w sezonach: zimowym, wiosennym i letnim różnią się w sposób istotny na wybranym poziomie istotności ($\alpha=0,05$). Założenie równości wariancji sprawdzono stosując statystykę F Fishera- Snedecora. W celu weryfikacji hipotezy o równości średnich generalnych zastosowano test t -Studenta [Gór93]. Wyniki testów przedstawiono w Tabeli 6.7. W przypadkach gdy obliczona wartość statystyki t -Studenta jest mniejsza od wartości krytycznej nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich. Oznacza to, że rozbieżność średnich jest nieistotna statystycznie z prawdopodobieństwem ufności 95%. Fakt ten zaznaczono w tabeli znakiem „-”. Jak widać, we wszystkich przypadkach (poza wiosną w godzinach 5^{00} i 17^{00}) nie obserwuje się przekroczenia wartości krytycznej statystyki t -Studenta.

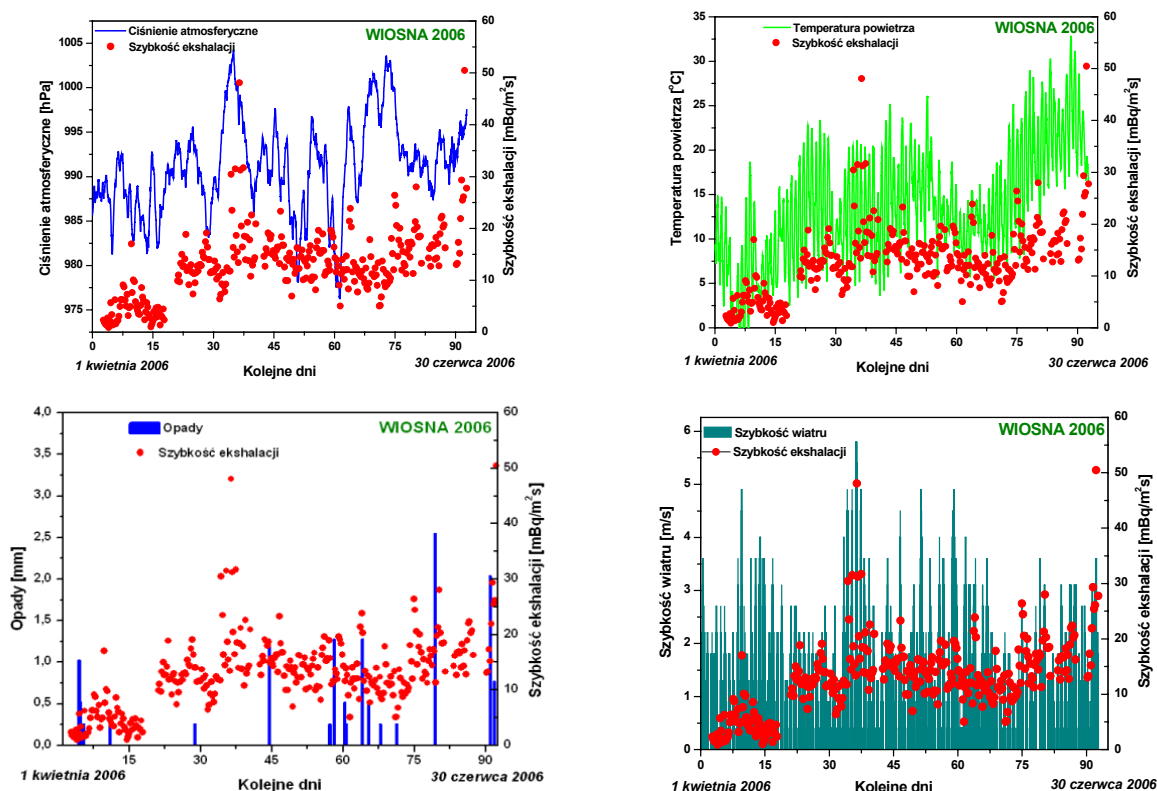
Tabela 6.7. Wyniki testów *t*-Studenta i *F*-Fishera-Snedecora dla średnich wartości *E* w poszczególnych godzinach i porach roku

	g. 5 ⁰⁰ g. 11 ⁰⁰	g. 5 ⁰⁰ g. 17 ⁰⁰	g. 5 ⁰⁰ g. 23 ⁰⁰	g. 11 ⁰⁰ g. 17 ⁰⁰	g. 11 ⁰⁰ g. 23 ⁰⁰	g. 17 ⁰⁰ g. 23 ⁰⁰
ZIMA 2006						
Wartość krytyczna statystyki <i>t</i> -Studenta	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Wartość empiryczna statystyki <i>t</i> -Studenta	0,54	0,16	1,18	0,76	1,73	1,19
H0:m1=m2 odrzucamy (+) lub brak podstaw (-)	-	-	-	-	-	-
<i>Hipoteza o równości wariancji</i>						
Wartość krytyczna testu <i>F</i> -Fishera-Snedecora	1,86	1,80	1,91	1,80	1,91	1,88
Wartość empiryczna statystyki <i>F</i>	1,22	1,47	10,09	1,80	12,34	6,86
Hipotezę odrzucamy (+) lub brak podstaw (-)	-	-	+	-	+	+
WIOSNA 2006						
Wartość krytyczna statystyki <i>t</i> -Studenta	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
Wartość empiryczna statystyki <i>t</i> -Studenta	1,82	2,81	1,65	1,08	0,23	1,33
H0:m1=m2 odrzucamy (+) lub brak podstaw (-)	-	+	-	-	-	-
<i>Hipoteza o równości wariancji</i>						
Wartość krytyczna testu <i>F</i> -Fishera-Snedecora	1,46	1,45	1,46	1,45	1,45	1,45
Wartość empiryczna statystyki <i>F</i>	1,80	2,52	1,51	1,40	1,19	1,67
Hipotezę odrzucamy (+) lub brak podstaw (-)	+	+	+	-	-	+
LATO 2006						
Wartość krytyczna statystyki <i>t</i> -Studenta	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
Wartość empiryczna statystyki <i>t</i> -Studenta	0,93	0,64	0,87	0,05	0,30	0,17
H0:m1=m2 odrzucamy (+) lub brak podstaw (-)	-	-	-	-	-	-
<i>Hipoteza o równości wariancji</i>						
Wartość krytyczna testu <i>F</i> -Fishera-Snedecora	1,47	1,46	1,47	1,47	1,47	1,47
Wartość empiryczna statystyki <i>F</i>	3,67	7,54	1,38	2,06	2,66	5,48
Hipotezę odrzucamy (+) lub brak podstaw (-)	+	+	-	+	+	+

Analiza wyników (Tabela 6.7) prowadzi do wniosku, że średnie wartości szybkości ekshalacji zmierzone w różnych godzinach doby (w danym sezonie) nie różnią się w sposób istotny statystycznie. Pomiar można zatem prowadzić w dowolnym momencie doby. Wyjątkiem jest okres wiosenny, kiedy istotne statystycznie różnice w wartościach średnich wystąpiły dla pomiarów wykonywanych w godzinach 5⁰⁰ i 17⁰⁰. Potwierdza to wcześniejszy wniosek o godzinach przedpołudniowych lub nocnych jako najwłaściwszych do prowadzenia pomiarów szybkości ekshalacji w okresie wiosennym w celu uzyskania reprezentatywnego wyniku.

6.5. Zależność szybkości ekshalacji radonu z gruntu od wybranych parametrów meteorologicznych

Skonstruowanie i uruchomienie urządzenia AutoExh umożliwiającego quasi ciągły pomiar szybkości ekshalacji pozwoliło uzyskać zestaw danych, które posłużyły do podjęcia próby zaobserwowania wpływu wybranych czynników meteorologicznych na dynamikę procesu ekshalacji. Analizę tę przeprowadzono tylko dla okresu działania stanowiska AutoExh, tj. od jesieni 2005 roku do lata 2006 roku. Okres ten obejmował wszystkie sezony. Szybkość ekshalacji radonu (jak już to wcześniej omówiono w rozdziale 2, opisującym uproszczony model teoretyczny zjawiska ekshalacji radonu z gruntu) zależy głównie od wilgotności i temperatury gleby czyli ośrodka, w którym radon powstaje i przez który jest transportowany. Warunki meteorologiczne (temperatura powietrza, szybkość wiatru, opady) mają bezpośredni wpływ na te własności gleby, a tym samym pośrednio wpływają na szybkość ekshalacji radonu. Przykłady przebiegów zmian temperatury powietrza, ciśnienia atmosferycznego, opadów, szybkości wiatru oraz na ich tle zmian wartości szybkości ekshalacji dla okresu wiosny 2006 pokazano na Rys. 6.20. Komplet rysunków dla całego okresu pomiarowego zamieszczono w formie elektronicznej na płycie CD dołączonej do pracy (katalog: *Rysunki*).



Rys. 6.20. Przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza, opadów i szybkości wiatru

W pierwszym etapie analizy wyników podjęto próbę znalezienia bezpośredniego powiązania szybkości ekshalacji z pojedynczymi parametrami meteorologicznymi. Z uwagi na dużą liczbę danych meteorologicznych (rejestracja tych danych odbywała się z krokiem 30 minut) zastosowano opisany poniżej sposób powiązania danych meteorologicznych z rejestrowanymi wartościami szybkości ekshalacji radonu z powierzchni gleby E . Pomiar ekshalacji za pomocą stanowiska AutoExh wykonywany był cztery razy w ciągu doby (Rozdział 5.3). Każdej wartości szybkości ekshalacji E przypisano następujące parametry meteorologiczne:

T_{zew} , V_{wiatr} , $Ciśn$, $Opad$: wartości parametrów (odpowiednio: temperatury powietrza, szybkości wiatru, ciśnienia atmosferycznego, opadów) zarejestrowanych w trakcie pomiaru ekshalacji, na pół godziny przed jego zakończeniem.

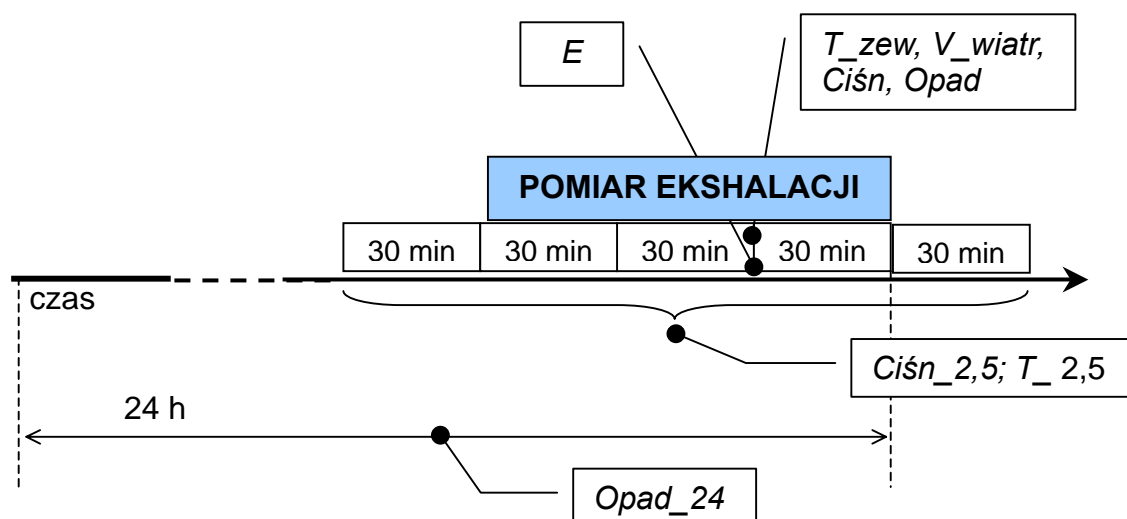
$Ciśn_{2,5}$; $T_{2,5}$: wartości średnie ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza obliczono z 5 wartości rejestrowanych przez stację meteorologiczną, czyli z okresu 2,5 godzin. W tym czasie przeprowadzony był pomiar ekshalacji radonu trwający 1,5 godziny.

T_{gl} : temperatura gleby mierzona na głębokości 1 m

d_T : różnica temperatur powietrza i gleby $T_{2,5} - T_{gl}$

$Opad_{24}$: suma opadów atmosferycznych z okresu 24 godzin przed zakończeniem pomiaru ekshalacji radonu

Sposób powiązania parametrów meteorologicznych i E przedstawiono schematycznie na poniższym diagramie z osią czasu:



Obliczone współczynniki korelacji WK szybkości ekshalacji E i wyżej zdefiniowanych parametrów meteorologicznych zestawiono w Tabeli 6.8.

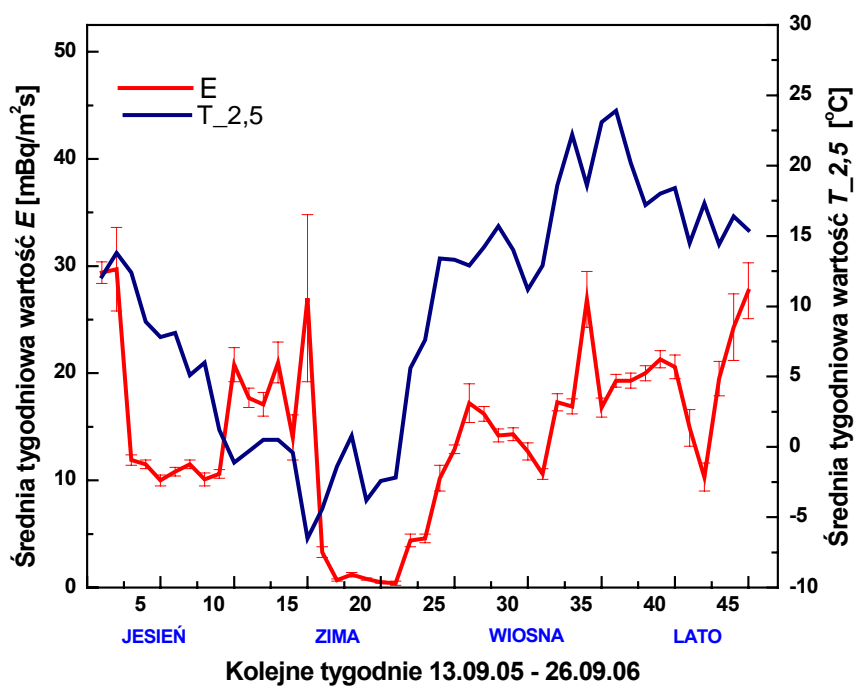
Tabela 6.8. Współczynniki korelacji WK (w różnych porach roku i dla całego okresu pomiarowego) dla wartości szybkości ekshalacji radonu (E) i wybranych parametrów meteorologicznych

	T_{zew}	V_{wiatr}	$Ciśn$	$Opad$	$Ciśn_{2,5}$	$T_{2,5}$	T_{gl}	d_T	$Opad_{24}$
E Jesień 2005	-0,33	0,00	-0,16	0,03	-0,16	-0,33	-0,40	-0,20	0,01
E Zima 2006	-0,14	0,17	0,26	-0,05	0,26	-0,14	0,31	-0,15	-0,03
E Wiosna 2006	0,52	0,25	0,32	0,05	0,32	0,52	0,69	0,28	-0,03
E Lato 2006	0,08	-0,02	0,06	-0,03	0,06	0,08	-0,01	0,08	-0,21
E Okres 1 roku jesień 2005 / lato 2006	0,23	0,02	0,00	0,02	0,00	0,23	0,30	0,11	0,00

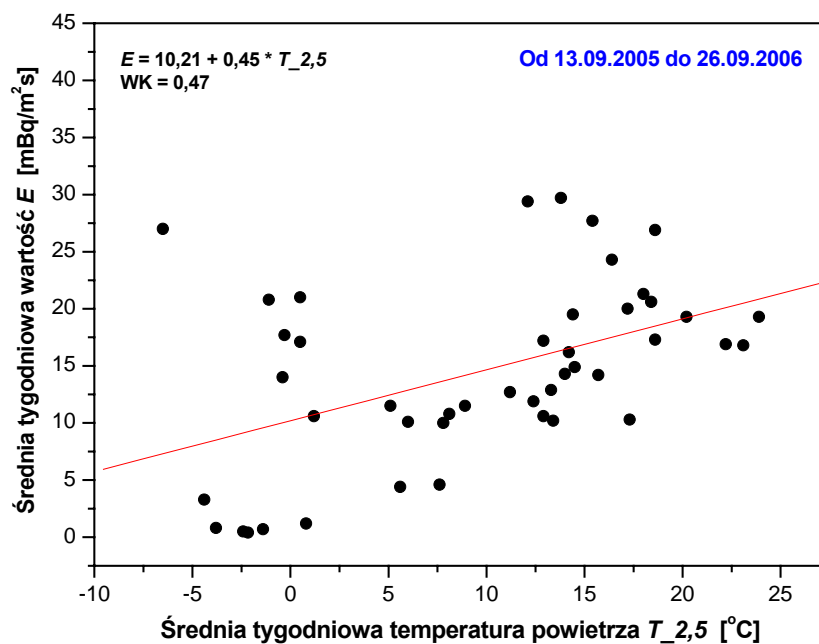
Najwyższe wartości współczynników korelacji (WK) zaobserwowano w okresie pomiarowym wiosna 2006 dla temperatury gleby oraz temperatury powietrza. Dla okresów jesieni i zimy współczynniki korelacji tych wielkości osiągają wartości ujemne, natomiast w okresie letnim nie obserwuje się istotnej zależności szybkości ekshalacji od temperatury zewnętrznej i temperatury gleby. Bardzo niskie współczynniki korelacji występują w przypadku opadu, jedynie w lecie 2006 daje się zauważyć pewną ujemną korelację ($WK = -0,21$).

Analiza obliczonych współczynników korelacji dla poszczególnych sezonów pozwoliła na obserwację, iż współczynniki korelacji (obliczone na poziomie ufności 95%) są takie same dla wielkości $Ciśn$ i $Ciśn_{2,5}$ oraz dla T_{zew} i $T_{2,5}$. Wynika z tego, że niecelowe jest prowadzenie pomiarów ciśnienia i temperatury w dłuższym okresie czasu lecz wystarczający jest jednokrotny pomiar tych wielkości w trakcie trwania pomiaru ekshalacji, przy warunku że pomiar ten nie trwa dłużej niż 1,5 do 2 godzin.

Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi oraz na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 6.8 wydaje się, że najbardziej uzasadnione jest zbadanie prostych zależności szybkości ekshalacji radonu od takich pojedynczych parametrów meteorologicznych jak temperatura powietrza i ciśnienie atmosferyczne. Temperatura powietrza ma znaczący wpływ na temperaturę gleby i jej wilgotność, które to wielkości w świetle teorii (rozdział 2) wpływają na szybkość ekshalacji radonu. Zbadanie wpływu ciśnienia atmosferycznego na wartość E uznano za celowe ze względu na doniesienia literaturowe, w których ten wpływ jest opisywany.



Rys. 6.21. Średnie tygodniowe wartości szybkości ekshalacji E na tle średnich tygodniowych wartości temperatury powietrza $T_{2,5}$



Rys. 6.22. Zależność średnich tygodniowych wartości E od średnich tygodniowych wartości temperatury powietrza $T_{2,5}$

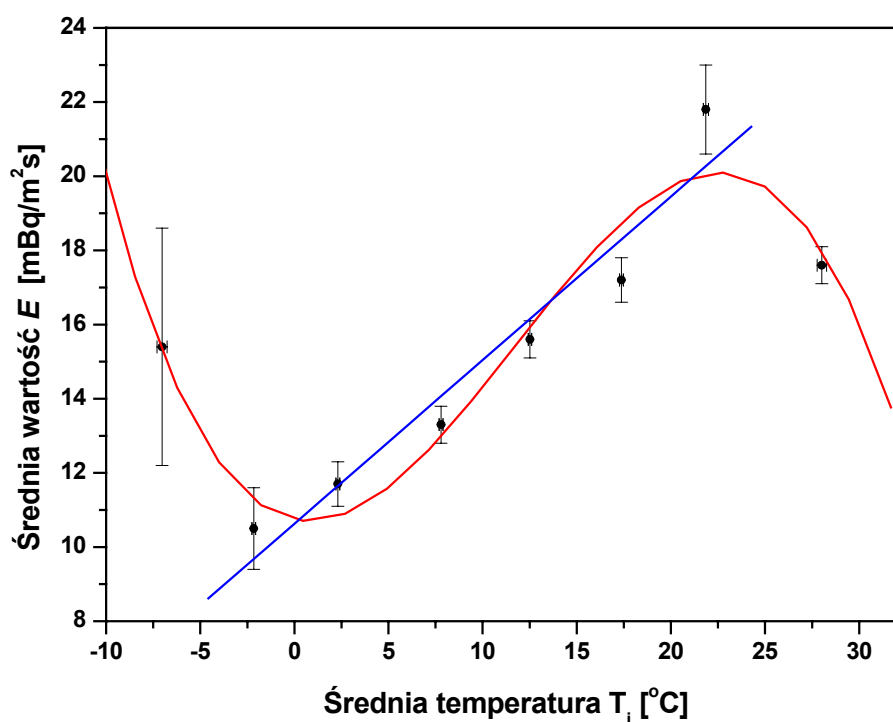
Rys. 6.21 przedstawia średnie tygodniowe wartości E (obliczone dla okresu pomiarowego 13.09.2005 ÷ 26.09.2006) na tle przebiegu odpowiednich średnich tygodniowych wartości temperatury powietrza $T_{2,5}$.

Na rysunku widać bardzo zbliżone przebiegi obu wielkości, zwłaszcza w okresie wiosenno-letnim. Na przełomie jesieni i zimy średnie tygodniowe szybkości ekshalacji wykazują odwrotną tendencję zmian niż średnie tygodniowe wartości temperatury. Dla powyższych danych sporządzono wykres zależności $E = f(T_{2,5})$ – Rys. 6.22. Współczynnik korelacji $WK = 0,47$ wskazuje na istnienie zależności pomiędzy tymi wielkościami, ale zależność ta nie jest silna.

W celu ilościowego ujęcia zależności szybkości ekshalacji radonu od temperatury powietrza podzielono zakres wartości temperatury powietrza $T_{2,5}$ (od -10°C do $31,8^{\circ}\text{C}$) obejmujący temperaturę typową dla wszystkich pór roku w Krakowie na osiem przedziałów ΔT o szerokości 5°C . Dla każdego z nich obliczono średnią temperaturę T_i ($i=1, 2, \dots, 8$) oraz średnią wartość E . Przy temperaturach $<-10^{\circ}\text{C}$ pomiar E był w większości przypadków niemożliwy. Przedziały temperatur ΔT , średnie temperatury T_i oraz wybrane parametry statystyczne zestawiono w Tabeli 6.9. Średnia temperatura T_i dobrze reprezentuje odpowiadający jej przedział ΔT (bardzo zbliżone wartości T_i i mediany). Zależność E od T_i graficznie przedstawiono na Rys. 6.23.

Tabela 6.9. Przedziały temperatury powietrza ΔT , odpowiadające im średnie wartości temperatury T_i i wybrane parametry statystyczne dla poszczególnych przedziałów

Przedziały temperatur ΔT	Średnia temperatura T_i	Błąd standardowy	Mediana	Ilość pomiarów
-10°C do -5°C	-7,03	0,27	-6,7	33
-5°C do 0°C	-2,16	0,10	-2,1	184
0°C do 5°C	2,31	0,10	2,24	213
5°C do 10°C	7,79	0,10	7,92	225
10°C do 15°C	12,51	0,09	12,47	270
15°C do 20°C	17,37	0,10	17,52	220
20°C do 25°C	21,86	0,13	21,65	106
25°C do 32°C	28,02	0,25	28,10	51



Rys. 6.23. Średnie wartości E w funkcji średniej temperatury T_i z przedziałów ΔT

W zakresie temperatur od -5°C do 25°C obserwuje się liniowy wzrost szybkości ekshalacji E . Liniowa regresja daje następujące równanie (ze współczynnikiem dopasowania $r = 0,97$):

$$E = 10,63 (\pm 0,72) + 0,44 (\pm 0,06) \cdot T_i$$

gdzie T_i – średnia temperatura $T_{2,5}$ z kolejnych przedziałów ΔT (Tabela 6.9).

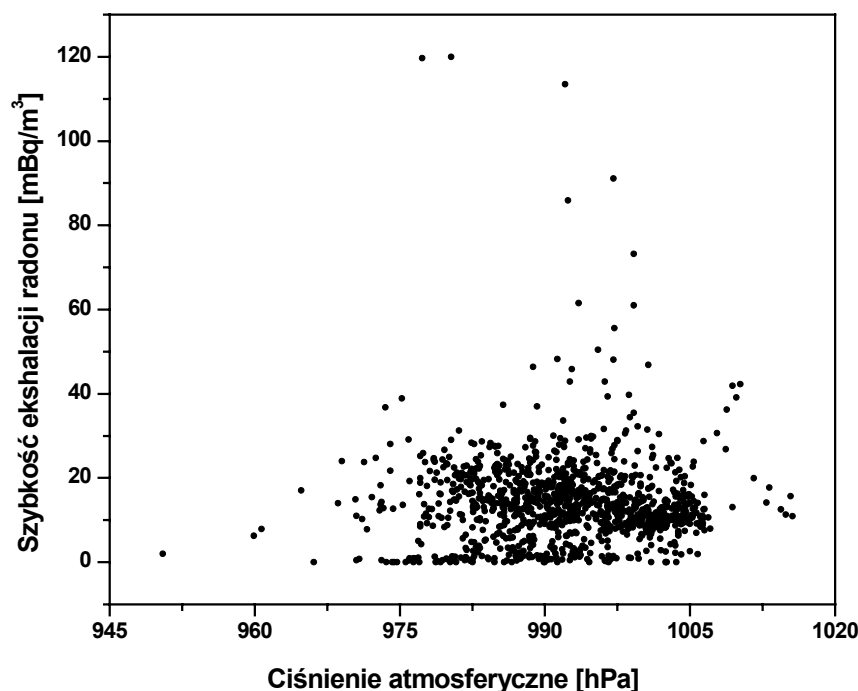
Uwzględniając cały przedstawiony zakres temperatur, tzn od -10°C do $31,8^{\circ}\text{C}$ w celu opisu funkcji $E = f(T_i)$ zastosowano regresję wielomianem 3-go stopnia (ze współczynnikiem dopasowania $r = 0,92$), która prowadzi do równania:

$$E = 10,74 (\pm 0,84) - 0,10 (\pm 0,10) \cdot T_i + 0,06 (\pm 0,01) \cdot T_i^2 - 0,002 (\pm 0,0004) \cdot T_i^3$$

gdzie T_i – średnia temperatura $T_{2,5}$ z kolejnych przedziałów ΔT (Tabela 6.9).

Wyniki przedstawione na Rys. 6.23 sugerują, że zależność pomiędzy szybkością ekshalacji radonu z gleby a temperaturą powietrza daje opisać się zależnością funkcyjną. Należy jednakże zwrócić uwagę, że wyniki te uzyskano w ciągu jednego roku, przy określonych warunkach meteorologicznych (a także określonych zależnościach pomiędzy nimi). Nie można zatem generalizować tego wniosku bez przeprowadzenia dalszych długotrwałych pomiarów.

Wyniki badania wpływu ciśnienia atmosferycznego $Ciśn_{2,5}$ na szybkość ekshalacji radonu E nie wykazują już wyraźnych relacji jak w przypadku temperatury powietrza (Rys. 6.24).



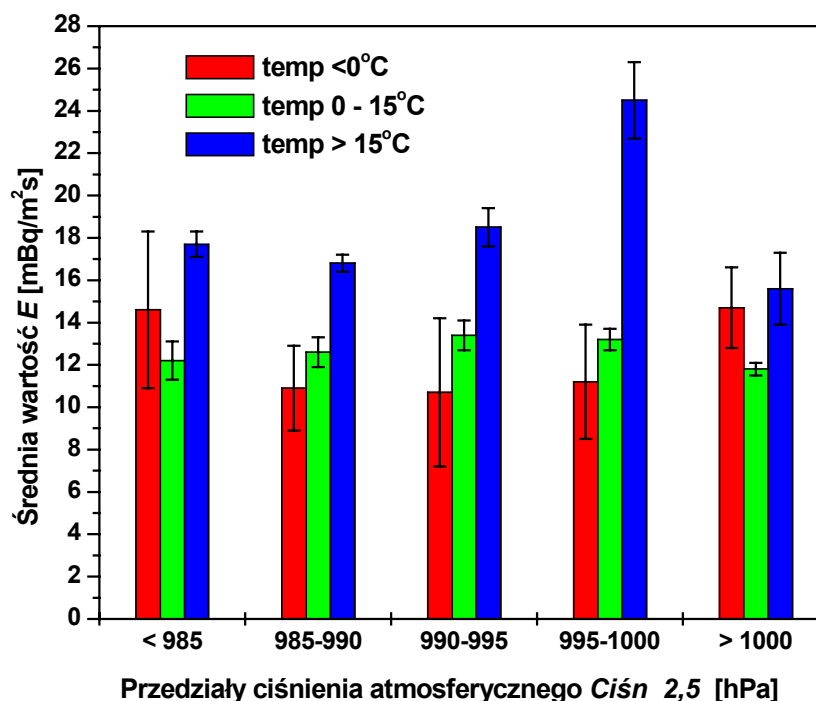
Rys. 6.24. Zależność szybkości ekshalacji radonu z gruntu od ciśnienia atmosferycznego

Wynik ten jest podobny do uzyskanego przez *Kojima i Nagano* [Koj] (Rys. 1.8), którzy badali tę zależność, jednak przez znacznie krótszy czas (jedynie przez okres około 3 miesięcy).

W dalszej analizie zastosowano podobną procedurę jak w przypadku badania związku E i $T_{2,5}$. Cały obserwowany zakres zmienności ciśnienia atmosferycznego podzielono na przedziały o szerokości 5 hPa i każdemu przedziałowi przyporządkowano trzy zakresy temperatury powietrza $T_{2,5}$: $< 0^{\circ}\text{C}$; $0^{\circ}\text{C} \div 15^{\circ}\text{C}$; $. 15^{\circ}\text{C}$. Dla każdego zakresu temperatur w danym przedziale ciśnienia obliczono średnią wartość szybkości ekshalacji E . Wyniki pokazano na Rys. 6.25.

Tak przedstawione dane pozwalają na obserwację, iż wpływ ciśnienia atmosferycznego na szybkość ekshalacji E jest zróżnicowany zależnie od zakresu temperatur. W zakresie $T_{2,5}$ od 0 do 15°C szybkość ekshalacji pozostaje praktycznie niezmienna w całym przedziale ciśnienia. Największy wpływ $Ciśn_{2,5}$ na wartość E występuje dla temperatur powyżej 15°C . Na podstawie otrzymanych wyników widać zatem, że wpływ ciśnienia atmosferycznego na szybkość ekshalacji radonu jest znacznie mniejszy niż wpływ temperatury powietrza.

Tym samym nie potwierdzono opisywanych w literaturze rezultatów dotyczących istnienia wyraźnej zależności E od ciśnienia [Sch84, Due97].



Rys. 6.25. Średnie wartości E dla trzech zakresów temperatury powietrza $T_{2,5}$ w kilku przedziałach ciśnienia atmosferycznego $Ciśn_{2,5}$

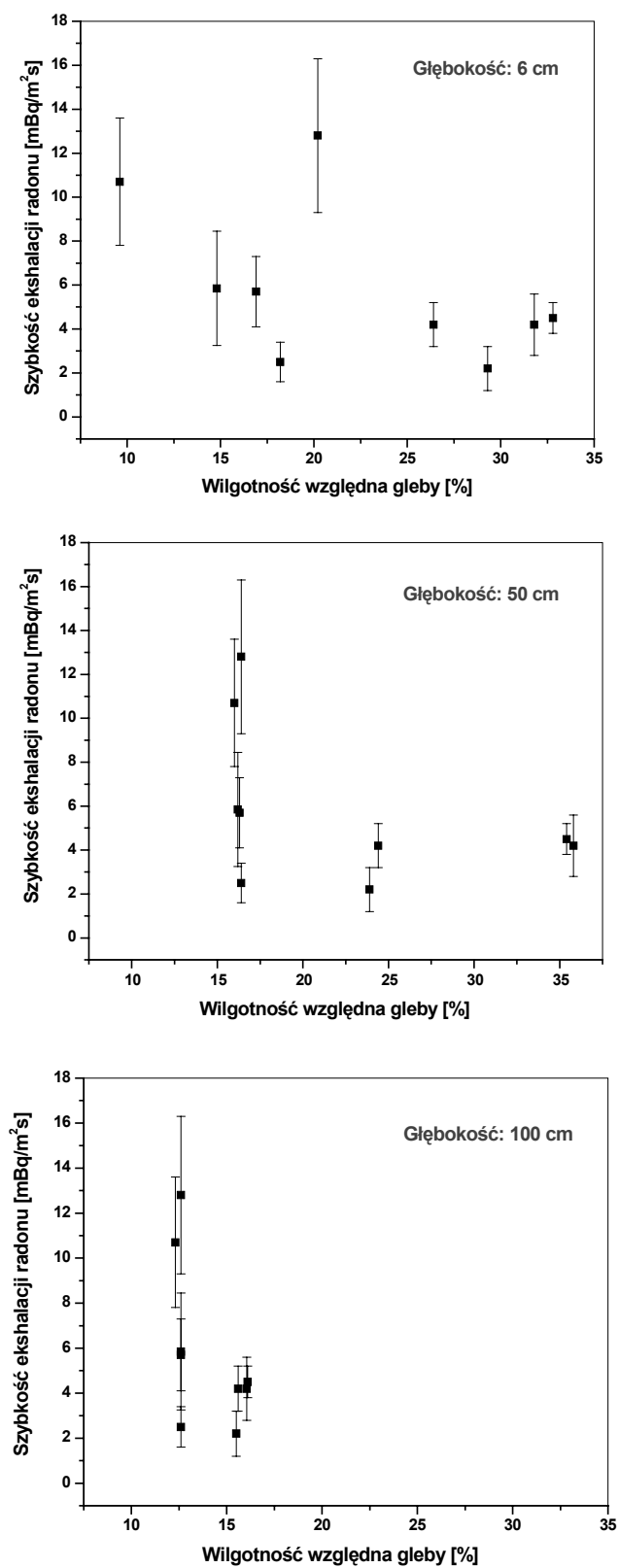
Niektórym autorom udało się zaobserwować wyraźne korelacje pomiędzy pojedynczymi czynnikami meteorologicznymi a szybkością ekshalacji radonu. *Dueñas i in.* [Due97] zmierzili szybkości ekshalacji radonu w czterech miejscach pomiarowych. Ilość pomiarów w każdym miejscu była niewielka (od 4 do 10 pomiarów ekshalacji – bez podania w jakich momentach doby ekshalacja była mierzona). We wszystkich miejscach rejestrowano wartości parametrów meteorologicznych, co umożliwiło autorom zbadanie zależności zmierzonych wartości szybkości ekshalacji radonu od ciśnienia atmosferycznego, szybkości wiatru, wilgotności gleby i różnicy temperatur gleby na głębokości 15 cm i 80 cm. Wszystkie prezentowane w tej pracy zależności są liniowe. Spadek szybkości ekshalacji obserwowano przy rosnącej wilgotności gleby i rosnącym ciśnieniu atmosferycznym. Natomiast zwiększająca się szybkość wiatru lub rosnąca różnica temperatur gleby powodowała wzrost szybkości ekshalacji radonu. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przytoczonej pracy autorzy oparli swoją analizę tylko na podstawie kilku pomiarów dla danego miejsca. *Ferry i in.* [Fer01] przedstawili wyniki pomiarów szybkości ekshalacji

(prowadzonych kilka razy w ciągu doby przez 1 miesiąc) i zaobserwowali, iż intensywne opady powodują gwałtowny spadek szybkości ekshalacji. Analogiczny wynik zaprezentowano w pracy *Megumi i Mamuro* [Meg73]. W powyższych artykułach nie stwierdzono zależności E od ciśnienia atmosferycznego, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi przez autorkę.

W ramach badania dynamiki procesu ekshalacji radonu z gruntu i zależności jego szybkości od własności gleby przeprowadzono pomiary szybkości ekshalacji radonu z jednoczesną rejestracją wilgotności gleby. Wilgotność gleby mierzono metodą opisaną w rozdziale 4.7 na trzech głębokościach: 6 cm, 50 cm i 100 cm. Zależność szybkości ekshalacji radonu od wilgotności gleby na różnych głębokościach przedstawia Rys. 6.26.

Na wszystkich wykresach można zauważyć ogólną tendencję zmniejszania szybkości ekshalacji z rosnącą wilgotnością gleby, co jest zgodne z przewidywaniami teoretycznymi (rozdział 2, Rys. 2.3). Wykresy dla wilgotności gleby na głębokości 50 cm i 100 cm mają podobny przebieg – wyższe wartości E dla niskich wilgotności gleby i spadek szybkości ekshalacji ze wzrostem wilgotności gleby.

Największą „dynamikę” wykazuje zależność E od wilgotności gleby na głębokości 6 cm (czyli wilgotność wierzchniej warstwy gleby). Na tej głębokości gleby zakres zmian wilgotności jest największy i tym można tłumaczyć występowanie większej zmienności E , w porównaniu ze obserwowanymi zmianami E w funkcji wilgotności rejestrowanych na głębokościach 50 cm i 100 cm (Rys. 6.26). Dla tej głębokości gleby wydaje się istnieć taka wartość wilgotności (ok. 20-22%), dla której E osiąga maksimum. Ten wynik może stanowić podstawę do wstępnego wniosku o potwierdzeniu przewidywań teoretycznych (rozdział 2, Rys. 2.3 i Rys.2.4). Pełniejsze potwierdzenie tej tezy wymagałoby jednakże przeprowadzenia znacznie większej ilości pomiarów.



Rys. 6.26. Zależność szybkości ekshalacji radonu od wilgotności gleby na różnych głębokościach

6.6. Badanie zależności szybkości ekshalacji radonu z gruntu od wybranych parametrów meteorologicznych metodą analizy wieloparametrycznej

Przedstawiona powyżej analiza wpływu poszczególnych parametrów meteorologicznych na obserwowane szybkości ekshalacji nie dały zadowalających wyników w zakresie określenia konkretnych zależności funkcyjnych. Zaobserwowano jedynie wpływ temperatury powietrza (i tym samym temperatury gleby) na szybkość ekshalacji radonu z powierzchni gleby opisany w rozdziale 6.5. Z uwagi na złożoność procesu ekshalacji radonu z gleby i jego zależność od wielu czynników, a nawet od kombinacji tych czynników, podjęto próbę zbadania dynamiki tego procesu za pomocą analizy wieloparametrycznej [Dob04]. Poniżej przedstawiono kilka przykładów zastosowania tej metody. Analizę tę przeprowadzono jedynie dla parametrów meteorologicznych pomijając wpływ własności gleby na szybkość ekshalacji, ponieważ pomiary były prowadzone w stałym miejscu, zatem własności gleby nie zmieniały się (poza wilgotnością).

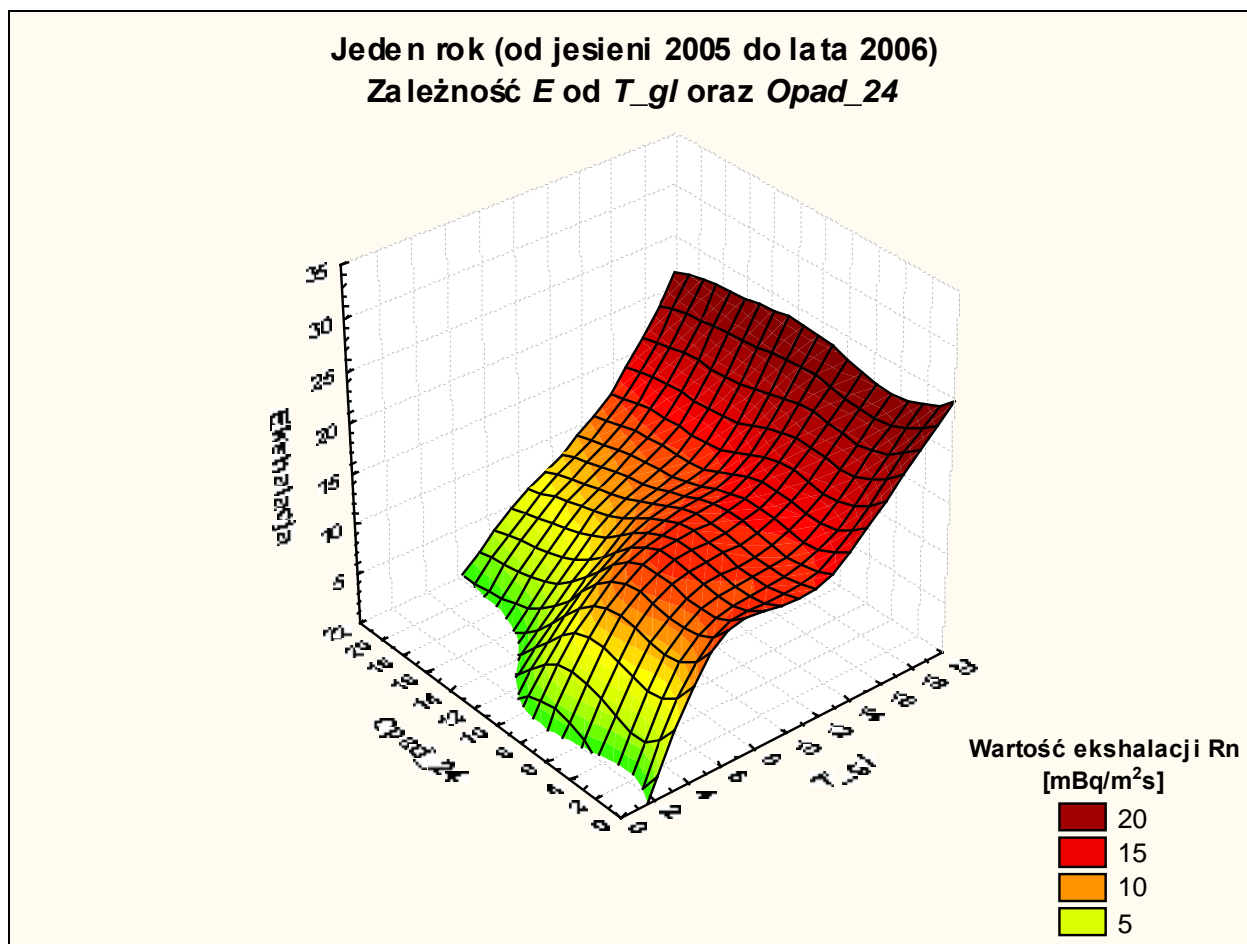
W analizie wieloparametrycznej określa się wartości dwóch zmiennych niezależnych do oceny ich wpływu na zmienną będącą przedmiotem zainteresowania – w tym przypadku zmienną tą jest szybkość ekshalacji. Pozwala to na ujawnienie złożonych nieliniowych powiązań między zmiennymi. W analizie zastosowano metodę najmniejszych kwadratów ważoną odległością (wpływ punktów maleje z odległością w poziomie od aktualnie obliczanego punktu powierzchni), która „wygładza” dane i aproksymuje powierzchnię na zadanym poziomie gładkości. Krzywa otrzymana przy pomocy procedury wygładzania składa się z fragmentów, które nie mogą być opisane przy pomocy jednej funkcji (takich jak np. wielomian lub funkcja logarytmiczna). Jednakże, segmentacja i typ krzywych złożonych (w obrębie kolejnych fragmentów) może zawierać interpretowalną informację na temat badanego zjawiska i funkcja regresji kawałkami liniowa lub nieliniowa może być przydatna do wyjaśnienia (i prognozy) procesu będącego przedmiotem badania. Zastosowana metoda jest pomocna przy odkrywaniu złożonych, nieliniowych i niemonotonicznych zależności pomiędzy zmiennymi co w przypadku badania wpływu warunków meteorologicznych na proces ekshalacji radonu z powierzchni gleby, jak wykazano to powyżej, wydaje się w pełni uzasadniony.

W rozdziale 6.5 omówiono szerzej zależności szybkości ekshalacji od temperatury powietrza i ciśnienia atmosferycznego, dlatego też obecnie wybrano następujące zestawy innych parametrów meteorologicznych do zbadania ich wpływu na szybkość ekshalacji:

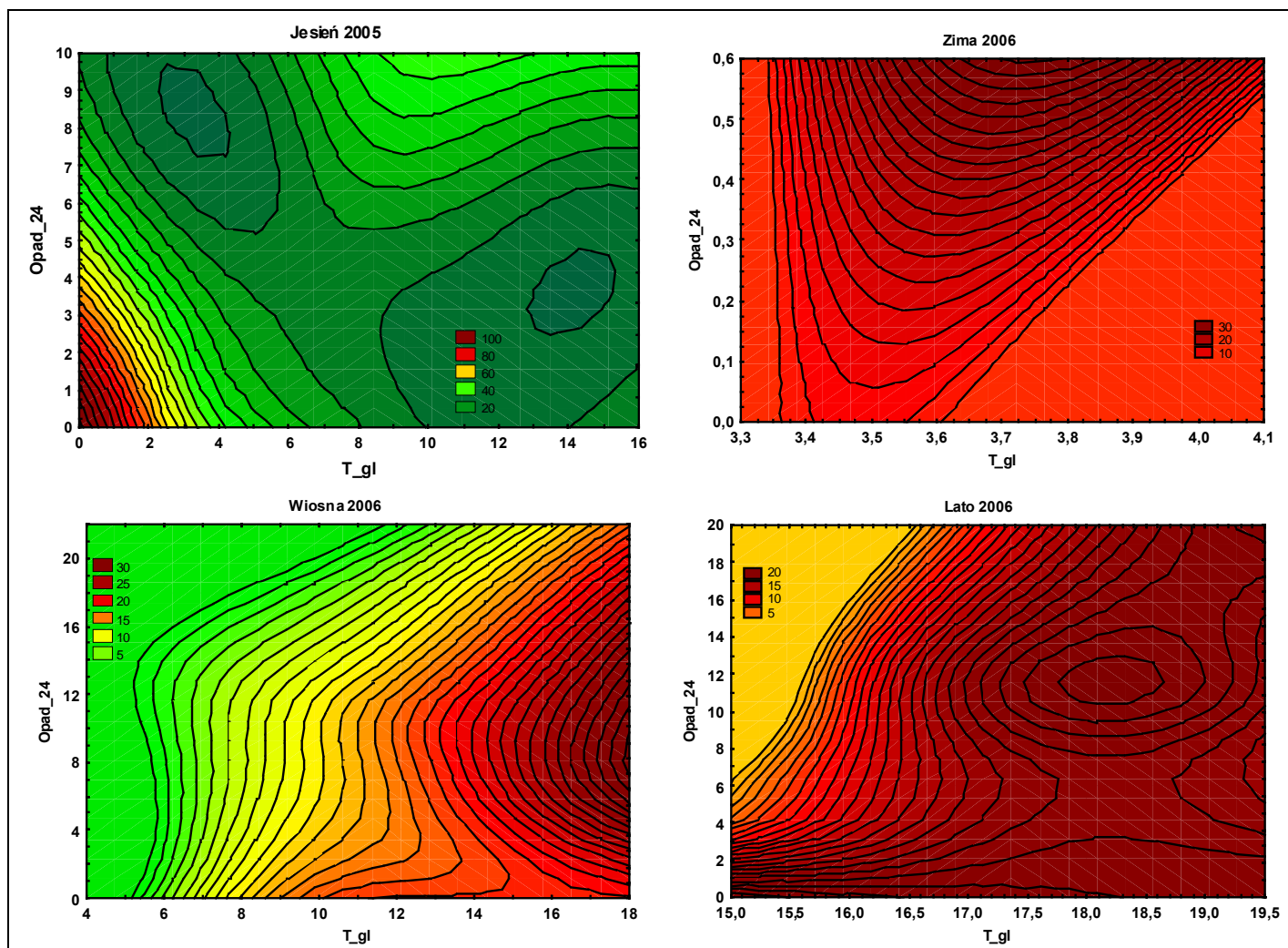
- temperatura gleby T_{gl} , suma opadów $Opad_{24}$
- temperatura gleby T_{gl} , szybkość wiatru V_{wiatr}
- temperatura gleby T_{gl} , średnia temperatura powietrza $T_{2,5}$

Wybór takich par czynników meteorologicznych wynika z analizy współczynników korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami oraz wartością szybkości ekshalacji przedstawionych w Tabeli 6.8. W każdym zestawie wybranych par występuje temperatura gleby T_{gl} z uwagi na wyższe wartości współczynnika korelacji (Tabela 6.8).

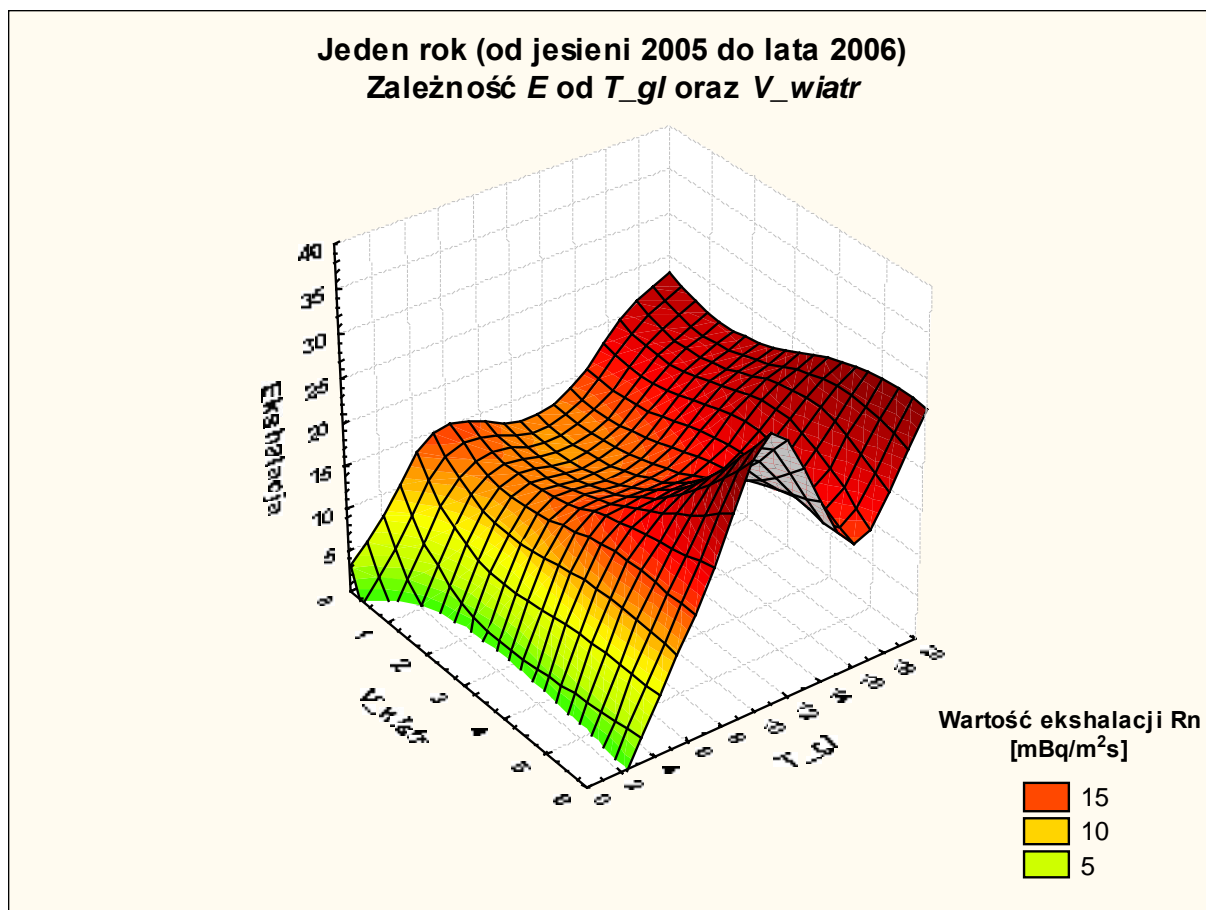
Na rysunkach (Rys. 6.27 – 6.32) przedstawiono wyniki zastosowania omówionej powyżej metody do przeanalizowania wpływu parametrów meteorologicznych na dynamikę szybkości ekshalacji. Wizualizacja zmienności szybkości ekshalacji (E) pozwala na uchwycenie wpływu zestawu parametrów meteorologicznych na wartość E .



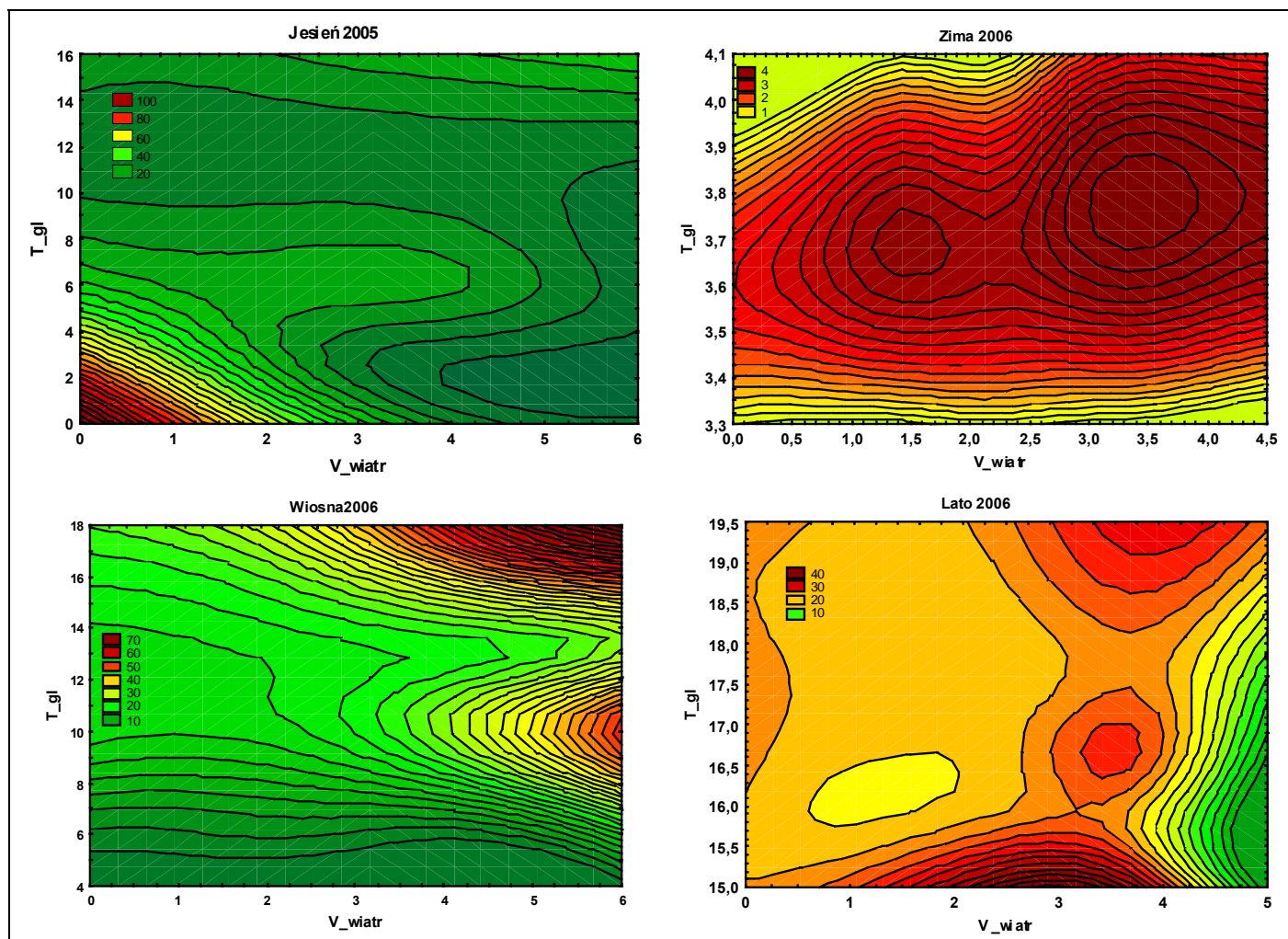
Rys. 6.27. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i opadów dla okresu całego roku (od jesieni 2005 do lata 2006)



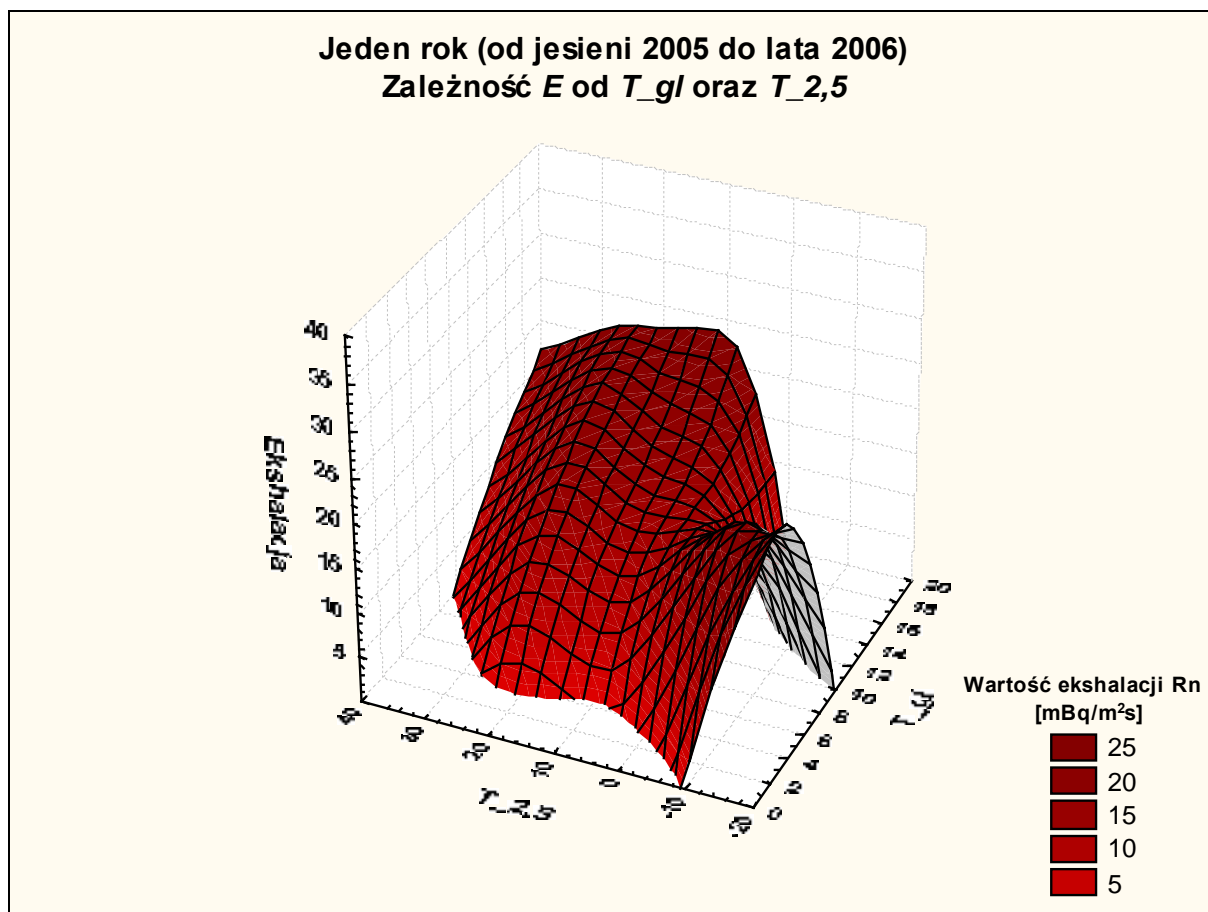
Rys. 6.28. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i opadów dla poszczególnych sezonów 2005 – 2006



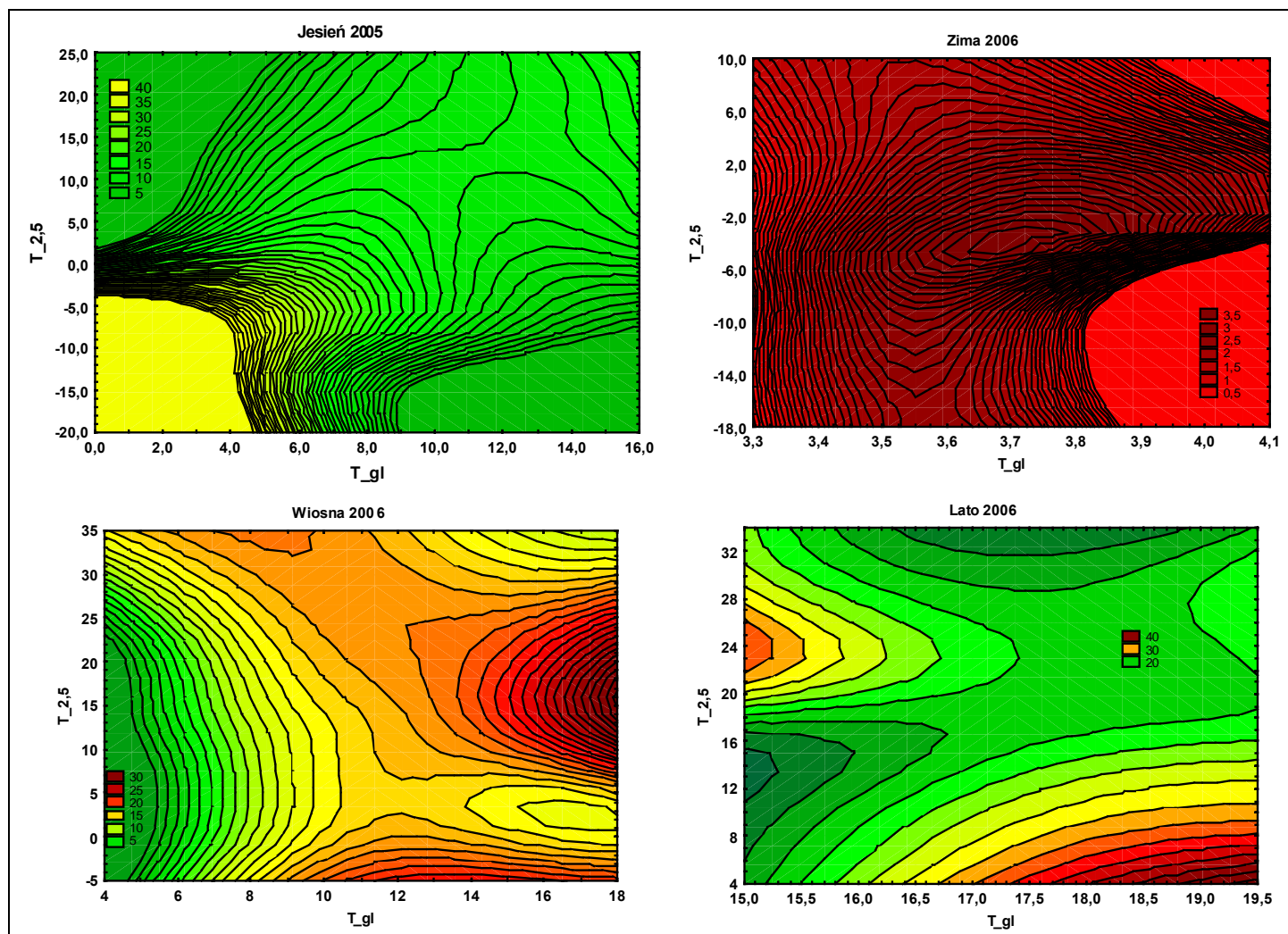
Rys. 6.29. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i prędkości wiatru dla okresu całego roku (od jesieni 2005 do lata 2006)



Rys. 6.30. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i prędkości wiatru dla poszczególnych sezonów 2005 – 2006



Rys. 6.31. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i średniej temperatury powietrza dla okresu roku (od jesieni 2005 do lata 2006)



Rys. 6.32. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby i średniej temperatury powietrza dla poszczególnych sezonów 2005 – 2006

Analizę wykonano dla okresu jednego roku obejmującego wszystkie cztery sezony (jesień 2005 – lato 2006) – Rys. 6.27, Rys. 6.29, Rys. 6.31, a także oddzielnie dla jesieni 2005, zimy 2006, wiosny 2006 i lata 2006 w celu zaobserwowania efektów „sezonowych” (Rys. 6.28, Rys. 6.30, Rys. 6.32). Wyniki analizy dla okresów rocznych przedstawiono na rysunkach „przestrzennych”. Osie poziome reprezentują parametry meteorologiczne, zaś na osi pionowej umieszczono wartości ekshalacji. Analizę dla poszczególnych sezonów pokazano w formie rysunków „płaskich”. Trzeci wymiar (wartości ekshalacji) pokazano za pomocą różnych kolorów o zmiennej intensywności. Takie podejście wydaje się optymalne do interpretacji zależności pomiędzy badanymi parametrami.

Z uwagi, iż analiza wieloparametryczna stosuje wygładzanie powierzchni wykresu metodą najmniejszych kwadratów ważoną odległością, generowane są także ujemne wartości szybkości ekshalacji (E) co nie ma sensu fizycznego. Ustalenie dolnej granicy E na poziomie zero pozwoliło na zaobserwowanie specyficznych układów parametrów meteorologicznych, które w znacznym stopniu spowalniają proces ekshalacji lub go całkowicie blokują.

Rys. 6.27 („roczny”) pokazuje **wynik analizy wieloparametrycznej, gdzie parametrami meteorologicznymi są temperatura gleby T_{gl} i suma opadów $Opad_{24}$** . Analogiczne wykresy sezonowe przedstawiono na Rys. 6.28. Najwyższe wartości ekshalacji radonu w skali roku obserwowane są dla wysokich temperatur gleby (gradient E jest zgodny z gradientem T_{gl}) przy jednoczesnym braku wyraźnej zależności od wielkości opadu (izolinie E układają się w przybliżeniu równoległe do osi opadów). Obserwacja wyników analizy dla poszczególnych sezonów wykazuje, że najbardziej podobna tendencja występuje w okresie wiosennym kiedy przebieg izolinii E ma ten sam charakter. Wyniki „jesienne” zdecydowanie różnią się od całorocznych. W tym okresie maksymalne wartości ekshalacji obserwowane są dla niskich temperatur gleby i niskich wartości opadów. Widoczne są również dwa minima E dla kombinacji: wysoka temperatura gleby – niskie opady oraz niska temperatura gleby – wysokie opady. Okresy zimowy i letni są najmniej zróżnicowane pod kątem dynamiki ekshalacji radonu z gleby.

Na Rys. 6.29 pokazano **wyniki analizy wieloparametrycznej** dla całego roku, **gdzie parametrami są temperatura gleby T_{gl} i prędkość wiatru V_{wiatr}** . Największa dynamika zmian szybkości ekshalacji jest obserwowana dla maksymalnych szybkości wiatru i najwyższych temperatur gleby, z występującym lokalnym maksimum E przy średnich temperaturach gleby. Szybkość ekshalacji, podobnie jak poprzednio, rośnie wraz ze wzrostem temperatury gleby, jednak w obszarze średnich temperatur gleby i małych szybkości wiatru

wykazuje tendencję spadkową. Wzrost ekshalacji od tego lokalnego minimum następuje zgodnie zarówno z gradientem szybkości wiatru (duży gradient) jak i z gradientem temperatury gleby (mniejszy gradient wzrostu). W obszarze rejestrowanych minimalnych temperatur gleby ekshalacja jest zablokowana, poza niewielkim obszarem kombinacji: minimalna T_{gl} , minimalna V_{wiatr} .

Analiza sezonowa zależności $E = f(T_{gl}, V_{wiatr})$ przedstawiona jest na Rys. 6.30. W okresie jesiennym obszar wysokich wartości E występuje jedynie dla kombinacji niskich szybkości wiatru i niskich temperatur gleby. Inny przebieg E można zauważyć w okresie zimowym. Zaznaczają się tutaj dwa wyraźne maksima wartości E – oba występują w obszarze średnich temperatur gleby. Jedno z maksimów (ostrzejsze) obserwowane jest dla średnio-niskich szybkości wiatru, zaś drugie (rozległe) dla średnio wysokich szybkości wiatrów. Poza tymi maksimami wartość E jednolicie obniża się do wartości minimalnych (najniższych wartości E ze wszystkich sezonów). Okres wiosenny charakteryzuje się niską wartością ekshalacji w obszarze szerokich zmian kombinacji T_{gl} i V_{wiatr} , jednakże daje się zaobserwować narastanie E dla średnich i wysokich T_{gl} przy wysokich wartościach V_{wiatr} . Obserwowany wzrost E dla wyższych T_{gl} następuje przy wyższych wartościach V_{wiatr} . Przebieg dynamiki analizowanego procesu E dla okresu lata 2006 wykazuje trzy maksima – wszystkie występujące dla wyższych wartości V_{wiatr} . Maksimum w obszarze niskich T_{gl} jest najbardziej rozległe, zaś w obszarze średnich wartości T_{gl} jest „wąskie”. W kierunku wzrostu szybkości wiatru następuje gwałtowny spadek ekshalacji radonu (obrazowane zagęszczeniem izolinii E). Przebieg zależności E dla okresu letniego jest najbardziej zbliżony do przebiegu całorocznego. Nie obserwuje się kombinacji parametrów blokujących proces ekshalacji.

Rysunki 6.31 i 6.32 przedstawiają **wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od temperatury gleby T_{gl} i średniej temperatury powietrza $T_{2,5}$.**

Dynamika E dla całego roku (od jesieni 2005 do lata 2006) przedstawiona jest na Rys. 6.31. Szybkość ekshalacji wykazuje prawie liniowy wzrost dla zakresu średnich i wysokich temperatur powietrza $T_{2,5}$ wraz ze wzrostem temperatury gleby T_{gl} . Potwierdza to zależność E od $T_{2,5}$ opisaną w rozdziale 6.5 (Rys.6.23).

W zakresie niskich wartości $T_{2,5}$ przebieg jest inny. Następuje wzrost E do wartości maksymalnej (dla zakresu średnio-niskich T_{gl}) i zanik zjawiska ekshalacji od średnich wartości T_{gl} . Obserwowana jest wyraźna granica występowania zjawiska ekshalacji radonu w obszarze niskich temperatur gleby. Granica ta przesuwana się w stronę wyższych T_{gl}

wraz ze wzrostem $T_{2,5}$ lecz wyraźnie zaznacza się minimum dla $T_{2,5} = 20^{\circ}\text{C}$. Podobna granica występuje dla kombinacji: wysokie wartości T_{gl} i niskie wartości $T_{2,5}$.

Analizę $E = f(T_{2,5}, T_{gl})$ z podziałem na sezony przedstawiono na Rys. 6.32. Przebieg E w okresie jesiennym charakteryzuje się najwyższymi wartościami E w zakresie niskich wartości zarówno $T_{2,5}$ jak i T_{gl} . Poza tym obszarem dynamika zmian jest niewielka z minimalnymi wartościami w obszarach niskich wartości $T_{2,5}$ i wysokich T_{gl} oraz wysokich $T_{2,5}$ i niskich T_{gl} . W okresie zimowym wyróżnia się jedno maksimum E w zakresie średnich temperatur gleby i średnich temperatur powietrza. Największy gradient E obserwowany jest przy niskich wartościach T_{gl} , w obszarze średnich temperatur powietrza (największe zagęszczenie izolinii E).

W okresie wiosennym wyróżniają się dwa rozległe obszary – niskich i wysokich wartości E . Obszar niskich wartości E występuje dla niskich wartości T_{gl} w praktycznie całym zakresie $T_{2,5}$. Łagodny wzrost E następuje wraz ze wzrostem wartości T_{gl} . Obszar wysokich wartości szybkości ekshalacji to zakres średnich temperatur $T_{2,5}$ i wysokich temperatur gleby. Zaznacza się także wąski obszar wysokich E w przedziale średnich – wysokich T_{gl} przy niskich wartościach $T_{2,5}$.

W lecie 2006 obserwuje się, przeciwnie niż w jesieni, występowanie najwyższych wartości E dla kombinacji: wysoka T_{gl} i niska $T_{2,5}$. Można zauważyć także dwa obszary niskich wartości E : jeden dla wysokich $T_{2,5}$ z minimum w zakresie średnich T_{gl} , drugi dla niskich T_{gl} . Wyraźnie zaznacza się wzrost szybkości ekshalacji dla kombinacji: najniższa T_{gl} i średnio-wysoka $T_{2,5}$.

Na podstawie przedstawionej analizy widać jak bardzo złożonym procesem jest ekshalacja radonu z gleby i jak trudno jednoznacznie pokazać zależności pomiędzy tym zjawiskiem a różnymi czynnikami mającymi wpływ na jego szybkość. Zależność E od tego samego zestawu parametrów meteorologicznych jest różna w różnych porach roku. Obserwuje się jednak ciekawą własność: dla wybranego zestawu parametrów meteorologicznych istnieje sezon, w którym dynamika E w sposób dominujący wpływa na całoroczną dynamikę szybkości ekshalacji – jest to najczęściej sezon wiosenny.

Kolejnym zatem krokiem w analizie zebranych danych może być **analiza wieloparametryczna z kategoryzacjami**. Jest to jedna z bardzo efektywnych metod analitycznych, wymagająca podzielenia zbioru danych na kategorie w celu porównania układów danych pomiędzy otrzymanymi podzbiorami. Istnieje możliwość zastosowania metod obliczeniowych, wykorzystujących technikę grupowania i przeznaczonych

do ilościowego ujmowania różnic wykazanych pomiędzy grupami, jednak wybrano technikę graficzną (tzn. wykresy skategoryzowane), która pozwala ujawniać układy, trudne do ilościowego ujęcia (np. złożone interakcje, wyjątki i anomalie) oraz jest wielowymiarowym, ogólnym podejściem analitycznym służącym do złożonej analizy danych [Dob04].

W celu zobrazowania przydatności tej metody i ewentualnego zastosowania jej w dalszych badaniach nad zebranymi dla celów tej pracy wynikami przedstawiono jedynie przykłady wykresów skategoryzowanych (Rys. 6.33 i Rys. 6.34).

Wybrano następujące zestawy parametrów meteorologicznych i wybranych czynników kategoryzacji:

Zestaw parametrów meteorologicznych	Czynnik kategoryzacji	Wartości przedziałów dla czynnika kategoryzacji
<i>Opad₂₄</i> <i>Ciśn_{2,5}</i>	<i>T_{gl}</i>	<10 °C, >10 °C
<i>V_{wiatr}</i> <i>T_{gl}</i>	<i>T_{2,5}</i>	< 0°C, 10°C ÷ 20°C, >20°C

Wartości przedziałów dla czynnika kategoryzacji wybrano na podstawie analiz wartości średniorocznych. Dla temperatury powietrza wybrano granice: <0°C tzn. gdy występuje zamarzanie powierzchni gleby co ma istotny wpływ na zjawisko ekshalacji, przedział od 10°C ÷ 20°C jako najbardziej typowe temperatury dla okresów jesienno-wiosennych oraz granicę 20°C jako temperatury typowo letnie. Wartości temperatur gleby podzielono na dwa przykładowe przedziały: poniżej i powyżej 10°C.

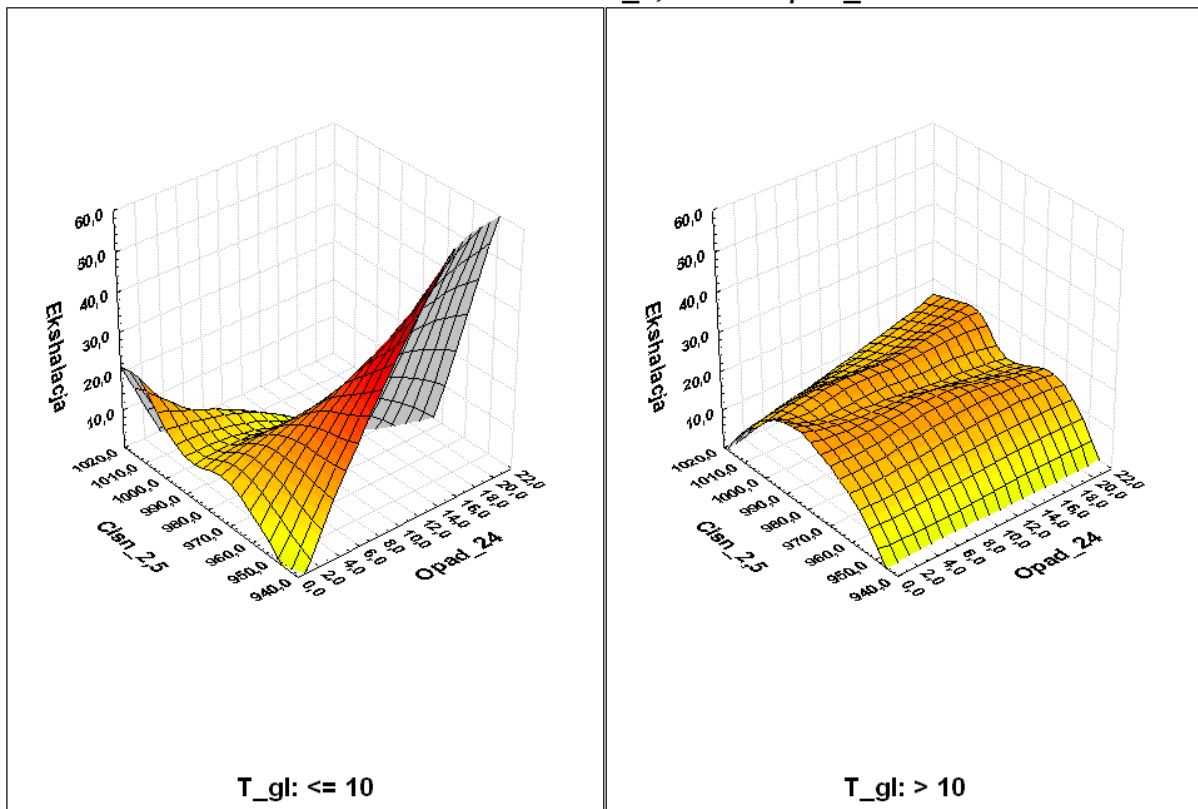
Przedstawione przykłady wykresów skategoryzowanych pokazują większe możliwości analizowania dynamiki procesu ekshalacji i badania jego zależności od różnych czynników.

Przykładowo, na Rys. 6.33 widać wyraźną tendencję wzrostową szybkości ekshalacji przy rosnących opadach i malejącym ciśnieniu, dla temperatury gleby < 10 °C. Takiej tendencji nie udało się zaobserwować, gdy badano prostą zależność szybkości ekshalacji od średniego ciśnienia atmosferycznego czy stanu opadów w czasie pomiaru. Gdy temperatura gleby wzrasta powyżej 10°C znów ta wyraźna tendencja zanika (Rys. 6.33).

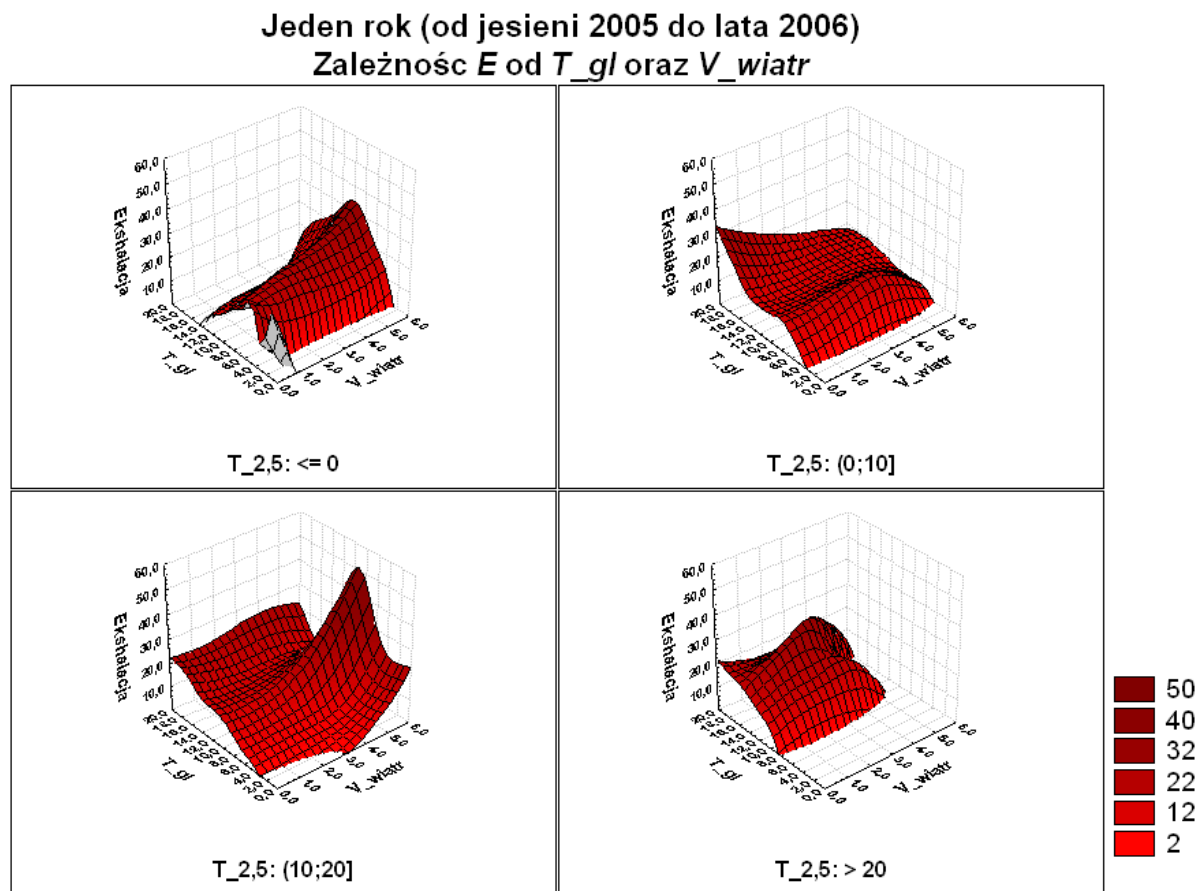
W podobny sposób uwidaczniają się wyraźniejsze zależności pomiędzy szybkością ekshalacji a prędkością wiatru, gdy skategoryzuje się wykresy średnią temperaturą powietrza w czasie pomiaru ekshalacji (Rys. 6.34). I tak, w zakresie średnich temperatur powietrza (10 – 20°C)

najczęściej występujących wiosną i jesienią i przy typowych dla tego okresu temperaturach gleby na szybkość ekshalacji radonu najbardziej wpływa rosnąca szybkość wiatru. Natomiast rosnąca temperatura gleby wyraźnie zwiększa szybkość ekshalacji przy niższych temperaturach powietrza (do 10 °C).

Jeden rok (od jesieni 2005 do lata 2006)
Zależność E od $Ci\acute{s}n_{2,5}$ oraz $Opad_{24}$



Rys. 6.33. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od średniego ciśnienia atmosferycznego i sumy opadów z czynnikiem kategoryzującym: temperatura gleby



Rys. 6.34. Wyniki analizy wieloparametrycznej dla zależności ekshalacji radonu od prędkości wiatru i temperatury gleby z czynnikiem kategoryzującym: średnia temperatura powietrza

Przedstawione przykłady obrazują możliwości wykorzystania analizy wieloparametrycznej z kategoryzacjami do dalszej bardziej dogłębnej interpretacji zebranych wyników pomiarów szybkości ekshalacji radonu z gruntu oraz dokładniejszego opisanie wpływu różnych czynników na ten proces.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedmiotem pracy było badanie dynamiki procesu ekshalacji radonu z gruntu, w szczególności próba określenia wpływu niektórych parametrów meteorologicznych na szybkość tego zjawiska. Przedstawione w pracy wyniki potwierdziły złożoność procesu ekshalacji radonu z gruntu oraz zależność tego zjawiska od zmieniających się własności gleby (wilgotność i temperatura), a tym samym pośrednią zależność od czynników meteorologicznych, które wpływają na te własności gleby.

Dla zbadania dynamiki ekshalacji radonu z gruntu niezbędne było zebranie zestawu danych z dłuższego okresu czasu. W ramach pracy zostało utworzone na terenie IFJ PAN stanowisko do długotrwałych, ciągłych pomiarów ekshalacji radonu. Dla celów tej pracy pomiary ekshalacji radonu prowadzono przez okres trzech lat (2003-2006) z równoległą rejestracją w sposób ciągły wybranych parametrów meteorologicznych. Bazowanie na danych z odległej stacji meteorologicznej nie jest wskazane gdyż może prowadzić do błędnych wniosków.

Pomiary ekshalacji w pierwszym etapie były prowadzone z częstotliwością kilka pomiarów w ciągu tygodnia za pomocą zaprojektowanej komory ekshalacyjnej ExhBox-1.

Komora ekshalacyjna ExhBox-1 (opisana w rozdziale 5.1), udoskonalona przez autorkę, umożliwia terenowe wykonywanie pomiarów ekshalacji z zachowaniem powtarzalności istotnych warunków wpływających na uzyskiwanie poprawnych wyników. Zaproponowana konstrukcja umożliwia uzyskanie powtarzalności objętości komory mocowanej na powierzchni gleby oraz zapewnia niezbędną szczelność, czyli czynników istotnych w pomiarach ekshalacji. Dwumodułowa konstrukcja ExhBox-1 (komora oraz pierścień mocujący na glebie) ułatwia też instalację komory na różnych typach podłoża, co sprawdzono w trakcie wielu pomiarów terenowych. Obecnie komora ExhBox-1 stosowana jest rutynowo przy pomiarach ekshalacji wykonywanych przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych i została włączona do procedury pomiarowej rozszerzającej obecny zakres akredytacji PCA metod pomiarowych.

W celu uchwycenia sezonowej i dobowej dynamiki (tendencji zmian) procesu ekshalacji konieczna była rejestracja wartości ekshalacji kilka razy w ciągu doby. Prowadziło to do konieczności zautomatyzowania procesu pomiarowego, co zostało zrealizowane poprzez zaprojektowanie i wykonanie automatycznego miernika ekshalacji (AutoExh). Urządzenie zostało przetestowane w warunkach polowych i po wykonaniu

niezbędnych ulepszeń (moduł sterowania czasowego, ustalenie optymalnej częstości pomiarów, ustalenie metody pomiaru ekshalacji) umożliwiło badanie dynamiki procesu ekshalacji radonu przez okres jednego roku ze zwiększoną częstotliwością do 4 razy w ciągu doby. Urządzenie AutoExh pozwoliło autorce uzyskać bazę wyników niespotykaną w dostępnej literaturze opisującej badania ekshalacji radonu.

Została zaproponowana metoda obliczania szybkości ekshalacji poprzez dopasowanie funkcji liniowej do punktów pomiarowych w płaszczyźnie: narastające stężenie radonu w komorze ekshalacyjnej, rejestrowane przez miernik radonu AlphaGUARD, w funkcji czasu. Z uwagi na dużą ilość uzyskiwanych wyników pomiarów (co za tym idzie konieczność obliczania szybkości ekshalacji radonu) oraz danych meteorologicznych opracowano odpowiednią bazę danych i arkusze obliczeniowe.

W części pracy dotyczącej **matematycznego opisu dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby** (rozdział 2) rozbudowano równania transportu dyfuzyjnego poprzez uzmiennienie współczynnika emanacji f oraz współczynnika dyfuzji D radonu (w funkcji wilgotności gleby) oraz współczynnika podziału radonu między fazę „powietrzną” i „wodną” przestrzeni porowej κ (w funkcji temperatury gleby). Pozwoliło to na uwzględnienie w tych równaniach parametrów gleby, takich jak wilgotność i temperatura oraz na przedstawienie teoretycznych przebiegów zmian dyfuzyjnego strumienia radonu z gleby w funkcji wilgotności i temperatury gleby. Zamieszczone w rozdziale 2 wykresy zależności strumienia radonu z gleby od wilgotności i temperatury nie są monotoniczne, co świadczy o skomplikowanym charakterze procesu ekshalacji radonu z gruntu. Przedstawiona teoria wykazuje stosunkowo mały wpływ temperatury gleby na wartość strumienia wypływającego radonu. Wpływ ten uwidacznia się wyraźniej przy wyższych wilgotnościach (Rys. 2.8). Największe różnice pomiędzy strumieniem wypływającym z gleby o temperaturze 4°C i o temperaturze 15°C występują dla wilgotności gleby wyższej od 0,4. i wynoszą około 4% wartości strumienia dla gleby o wilgotności $S=0,05$.

Wpływ wilgotności gleby na wartość strumienia wypływającego radonu jest większy, obserwuje się istnienie optymalnej wartości wilgotności (0,15 – 0,20), dla której wartość strumienia osiąga maksimum (Rys.2.3; Rys. 2.4).

Wyniki doświadczalne uzyskane przez autorkę wykazały **wpływ temperatury powietrza na szybkość ekshalacji** (Rys. 6.21 w rozdziale 6.5). Stwierdzono również, przewidywany teoretycznie, **wpływ temperatury gleby na wielkość strumienia radonu wypływającego z gleby** – w okresie wiosennym istnieje wyraźna korelacja między tymi

wielkościami (Tabela 6.8, rozdział 6.5). Wyniki są zgodne ze względu na oczywistą zależność temperatury gleby od temperatury powietrza.

Zaobserwowana, w trakcie prowadzonych pomiarów, zmienność temperatury gleby w profilu pionowym poddaje w wątpliwość założenie istniejących modeli teoretycznych opisujących zjawisko ekshalacji, w których ta temperatura jest wielkością stałą.

Przedstawione badania **wplywu wilgotności gleby** na szybkość ekshalacji pozwoliły zauważyć ogólną tendencję zmniejszania szybkości ekshalacji z rosnącą wilgotnością gleby, co jest zgodne z przewidywaniami teoretycznymi (rozdział 2).

Dla wilgotności gleby na głębokości 6 cm wydaje się istnieć taka wartość wilgotności (ok. 20-22%), dla której E osiąga maksimum. Ten wynik może dawać podstawę do wstępnego wniosku o potwierdzeniu przewidywań teoretycznych (rozdział 2, Rys. 2.3 i Rys.2.4). Pełniejsze potwierdzenie tej tezy wymagałoby jednakże przeprowadzenia znacznie większej ilości pomiarów.

Bezpośrednia **zależność szybkości ekshalacji radonu od stężenia radonu w powietrzu glebowym** jest oczywista. Jednakże, jak wykazano w tej pracy, zależność pomiędzy szybkością ekshalacji a stężeniem radonu w glebie nie jest jednoznaczna w warunkach rzeczywistych. Na podstawie pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym wykonywanym bezpośrednio po pomiarze szybkości ekshalacji radonu z gruntu (Rys. 6.11) zauważono, że istnieje grupa wyników wskazująca, iż nie ma praktycznie żadnej zależności szybkości ekshalacji radonu od jego stężenia w glebie. Sugeruje to, że dla tej populacji wpływ czynników meteorologicznych na szybkość ekshalacji radonu dominuje nad bezpośrednią zależnością od jego stężenia w glebie. Populacja ta obserwowana jest w okresach zimowych lub w czasie bardziej intensywnych opadów. Ważnym, wg autorki, wynikiem tych obserwacji jest wniosek, iż czynniki meteorologiczne mogą jedynie blokować transport radonu w ośrodku glebowym.

Analiza statystyczna zebranych wyników wykazała, że zarejestrowane w okresie prowadzenia pomiarów szybkości ekshalacji charakteryzują się dużą zmiennością. Maksymalne wartości ekshalacji są w kolejnych latach różne (w 2004: 386 mBq/m²s; w 2005: 128 mBq/m²s; w 2006: 120 mBq/m²s), jednak zaobserwowano podobną tendencję w dynamice tego zjawiska – niskie wartości w okresie zimowym, a następnie wyraźny wzrost wartości ekshalacji w okresie wiosennym. Zima jest tym sezonem, kiedy szybkość ekshalacji jest najniższa i najmniej zróżnicowana. Podobna sytuacja występuje w przypadku

sezonów letnich. Okresy wiosenne i jesienne należą do bardziej „dynamicznych” z punktu widzenia szybkości ekshalacji radonu.

Analiza dynamiki procesu ekshalacji przeprowadzona oddzielnie dla poszczególnych sezonów pozwoliła na określenie (na podstawie histogramów szybkości ekshalacji i wykresów dystrybuanty szeregu kumulowanego) najbardziej prawdopodobnych przedziałów wartości ekshalacji. W okresach zimowych ponad 90% uzyskanych wyników pomiarów ekshalacji mieści się w przedziale do 20 mBq/m²·s. Dla okresów wiosennych te przedziały wartości ekshalacji są bardziej zróżnicowane: do 150 mBq/m²·s (wiosna 2004), do 50 mBq/m²·s (wiosna 2005) i do 20 mBq/m²·s (wiosna 2006). Podobne zróżnicowanie występuje w przypadku jesieni: do 50 mBq/m²·s (jesień 2003), do 100 mBq/m²·s (jesień 2004) oraz do 20 mBq/m²·s (jesień 2005). W okresach letnich ponad 90% uzyskanych wyników pomiarów ekshalacji mieści się w przedziałach do 50 mBq/m²·s (lato 2005, lato 2006) i do 100 mBq/m²·s (lato 2004).

Opierając się na najbardziej reprezentatywnym okresie pomiarowym, z uwagi na dużą liczbę uzyskanych wyników (N) dzięki automatycznemu miernikowi AutoExh, określono sezonowe przedziały wartości szybkości ekshalacji radonu:

Zima:	0 mBq/m ² s ÷ 1 mBq/m ² s	(N=124 pomiary)
Wiosna:	10 mBq/m ² s ÷ 20 mBq/m ² s	(N=318 pomiarów)
Lato:	20 mBq/m ² s ÷ 50 mBq/m ² s	(N=304 pomiary)
Jesień:	10 mBq/m ² s ÷ 20 mBq/m ² s	(N=436 pomiary)

Podane wyżej wartości są określone jedynie dla gleby o gęstości: 2,63 g/cm³, średniej przepuszczalności: 10⁻¹¹ ÷ 10⁻¹² m² oraz dla stężenia radu ²²⁶Ra: 20 Bq/kg.

W świetle wyników przedstawionych w pracy **dobowa zmienność szybkości ekshalacji radonu z gruntu** jest niewielka. Weryfikacja hipotezy o równości średnich generalnych (test *t*-Studenta) wykazała że średnie wartości *E* zmierzone w różnych godzinach (5⁰⁰, 11⁰⁰, 17⁰⁰, 23⁰⁰) i różnych porach roku nie różnią się statystycznie. Wyjątkiem jest wiosna, kiedy występuje rozbieżność istotna statystycznie pomiędzy średnimi wartościami *E* rejestrowanymi w godzinach 5⁰⁰ i 17⁰⁰. Wartości *E* zmierzone w godzinach 5⁰⁰ i 23⁰⁰ wykazują najmniejszą rozbieżność sezonową (minimalna wartość rozstępu rejestrowanych wartości). Pozwala to zaproponować optymalne pory (godziny ranne do godz. 9⁰⁰ lub godziny nocne od godziny 23⁰⁰) na wykonanie reprezentatywnych pomiarów ekshalacji.

Wpływ rejestrowanych parametrów meteorologicznych na szybkość ekshalacji radonu badano w oparciu o wyniki pomiarów z okresu jednego roku wykonywanych z użyciem automatycznego stanowiska pomiarowego, które pozwoliło na pomiary kilkakrotnie w ciągu doby. Próby skorelowania szybkości ekshalacji z pojedynczymi parametrami meteorologicznymi nie dały zadowalających wyników. Najwyższe wartości współczynników korelacji zaobserwowano w okresie pomiarowym wiosna 2006 dla temperatury gleby oraz temperatury powietrza. Dla okresów jesieni i zimy współczynniki korelacji tych wielkości osiągają wartości ujemne, natomiast w okresie letnim nie obserwuje się istotnej zależności szybkości ekshalacji od temperatury zewnętrznej i temperatury gleby. Bardzo niskie współczynniki korelacji występują w przypadku opadu, jedynie w lecie 2006 daje się zauważyć pewną ujemną korelację ($WK = -0,21$). Sugeruje to, iż wilgotność gleby (która, zgodnie z teoretycznymi modelami, bezpośrednio oddziałuje na E) jest „regulowana” większą ilością czynników niż jedynie opady.

Opisywane przez niektórych autorów [Due97, Sch84] zjawisko zwiększania się szybkości ekshalacji radonu przy malejącym ciśnieniu atmosferycznym nie zostało potwierdzone w tej pracy, jeśli analizowana była zależność tylko pomiędzy tymi dwiema wielkościami.

Zaproponowana w pracy metoda analizy wieloparametrycznej do badania wpływu warunków meteorologicznych na szybkość ekshalacji radonu pozwoliła na zaobserwowanie bardziej złożonych zależności. Sporządzono wykresy zależności szybkości ekshalacji od dwóch wybranych parametrów meteorologicznych dla okresu całego roku oraz poszczególnych sezonów. Analiza tych wykresów pokazała różnice pomiędzy tendencjami zmian szybkości ekshalacji w skali całego roku oraz w skali poszczególnych sezonów. Największy wpływ na całoroczną dynamikę ekshalacji radonu mają wartości występujące w okresie wiosennym lub jesiennym zaś najmniejszy wartości z okresu zimowego.

Metoda analizy wieloparametrycznej (zamieszczone w rozdziale 6.6 wykresy dla poszczególnych sezonów) pozwoliła na określenie splotu warunków, przy których występują minimalne lub maksymalne wartości ekshalacji, a tym samym pozwoliła na określenie warunków meteorologicznych, przy których pomiar ekshalacji nie da reprezentatywnych wyników. Przykładowo, wynik pomiaru szybkości ekshalacji nie będzie reprezentatywny gdy pomiar będzie wykonywany:

- w okresie jesiennym: przy temperaturze gleby 0-2°C i opadzie 0-4mm (zawyżenie wartości E), lub przy temperaturze gleby 0-3°C i szybkości wiatru $< 1\text{m/s}$ (zaniżenie wartości E);

- w okresie letnim: przy temperaturze gleby 18-20°C i opadzie 12 mm (zawyżenie wartości E), lub przy temperaturze gleby 15-16°C i wysokim opadzie (zaniżenie wartości E);
- w okresie wiosennym: przy temperaturze gleby 18°C i temperaturze powietrza 20°C (zawyżenie wartości E).

Analiza wieloparametryczna dla poszczególnych sezonów pozwoliła też na określenie warunków blokujących ekshalację np. niskie temperatury gleby z równoczesnym opadem lub niskie temperatury gleby i jednocześnie średnie (15°C-18°C) temperatury powietrza.

Kolejnym krokiem w badaniu wpływu parametrów meteorologicznych na szybkość ekshalacji było rozszerzenie analizy wieloparametrycznej o kategoryzację. Ze względu na złożoną zależność szybkości ekshalacji nie od jednego, ale jednocześnie od wielu parametrów meteorologicznych (które też są ze sobą powiązane) zastosowanie kategoryzacji za pomocą wybranego parametru spowodowało lepsze zobrazowanie dynamiki tego procesu w funkcji kilku parametrów meteorologicznych, co opisane zostało w rozdziale 6.6.

Na podstawie wyników doświadczalnych można stwierdzić, że teoretyczny opis zjawiska ekshalacji radonu (przedstawiony w rozdziale 2) jest znacznym uproszczeniem i nie uwzględnia wszystkich zależności jakim to zjawisko podlega. W szczególności, teoria nie uwzględnia wpływu parametrów powietrza atmosferycznego (czyli medium, do którego radon przechodzi), a jedynie bazuje na parametrach jednofazowego układu, przez który następuje transport radonu (czyli gleby).

Naturalną kontynuacją przedstawionych w pracy badań mogą być dalsze analizy zebranych danych za pomocą analizy wieloparametrycznej z kategoryzacjami. W kolejnym etapie warto zbadać zależności pomiędzy szybkością ekshalacji radonu a występującymi sezonowymi zmianami stężenia radonu w glebie (wyniki tych pomiarów także zbierano w trakcie wykonywania tej pracy) w powiązaniu z czynnikami meteorologicznymi.

Na podstawie przeprowadzonych i opisanych w pracy badań wpływu warunków meteorologicznych na szybkość ekshalacji radonu z gruntu, można podjąć próby ustalenia procedury określania średnich sezonowych szybkości ekshalacji na podstawie jednostkowych pomiarów. Jednakże w tym celu konieczne byłoby przeprowadzenie długoterminowych pomiarów ekshalacji na glebach o różnych własnościach (stężenie radu, gęstość, przepuszczalność) z równoczesną rejestracją istotnych parametrów meteorologicznych wskazanych w tej pracy.

LITERATURA:

- [Alj01] M.I. Al-Jarallah, F. Abu-Jarad, Fazal-ur-Rehman, Determination of Radon Exhalation Rates from Tiles Using Active and Passive Techniques, *Radiation Measurements* **34** (2001) 491;
- [Amr99] D. Amrani, D.E. Cherouati, *Radon Exhalation Rate in Building Materials Using Plastic Track Detectors*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **242** (1999) 269;
- [Bai01] C. Baixeras, B. Erlandsson, L. Font, G. Jönsson, *Radon Emanation from Soil Samples*, *Radiation Measurements* **34** (2001) 441;
- [Bog02] J. Bogacz, J. Mazur, J. Swakoń, M. Budzanowski, P. Olko, *MCP-N (LiF:Mg,Cu,P) TLDs for Radon Measurements with Charcoal Canisters*, *Proceedings of the 13th International Conference on Solid State Dosimetry*, Athens, Greece, 9-13 July 2001; *Radiation Protection Dosimetry* **101** (2002), 267;
- [Bos03] P. Bossew, *The Radon Emanation Power of Building Materials, Soil and Rocks*, *Applied Radiation and Isotopes* **59** (2003), 389;
- [Cle85] H.L. Clever, *Solubility Data Series, Vol.2, Krypton-, Xenon, Radon Gas Solubilities*, p. 463-468, Pergamon Press, Oxford (1985);
- [Dec02] J. Dec, A. Bugajski, J. Karczewski, J. Ziętek, A. Ossowski, *Badania doświadczalne metodą sejsmiczną i georadarową w rejonie Lasu Wolskiego w Krakowie w celu opracowania metodyki określania nieciągłości utworów jurajskich oraz nakładu - raport z badań terenowych*, Kraków 2001/2002 - opracowanie wewnętrzne.
- [DeM98] S. De Martino, C. Sabbarese, G. Monetti, *Radon Emanation and Exhalation Rates from Soils Measured with an Electrostatic Collector*, *Applied Radiation and Isotopes* **49** (1998) 407;
- [Dob04] M. Dobosz, „*Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*”, Akademyka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2004;
- [Due97] C. Dueñas, M.C. Fernández, J. Carretero, E. Liger, M. Pérez, *Release of ^{222}Rn from Some Soils*, *Annales Geophysicae* **15** (1997) 124;
- [Due07] C. Dueñas, E. Liger, S. Canete, M. Perez, J.P. Bolivar, *Exhalation of ^{222}Rn from Phosphogypsum Piles Located at the Southwest of Spain*, *Journal of Environmental Radioactivity* **95** (2007) 63;
- [Dur97] *Radon Measurements by Etched Track Detectors. Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, eds. Saeed A. Durrani, Radomir Ilić (World Scientific Publishing Co., 1997);
- [Eis87] M. Eisenbud, *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources*. 3rd Edition, Academic Press, Orlando, 1987.
- [Esc99] V. G. Escobar, F.V. Tome, J.C. Lozano, *Procedures for the Determination of ^{222}Rn Exhalation and Effective ^{226}Ra Activity in Soil Samples*, *Applied Radiation and Isotopes* **50** (1999) 1039;
- [Fer01] C. Ferry, A. Beneito, P. Richon, M.-C. Robe, *An Automatic Device for Measuring the Effect of Meteorological Factors on Radon-222 Flux from Soils in the Long Term*, *Rad. Prot. Dosim.* **93** (2001) 271;

- [Fer02] C. Ferry, P. Richon, A. Beneito, J. Cabrera, J. C. Sabroux, *An Experimental Method for Measuring the Radon-222 Emanation Factor in Rocks*, Radiation Measurements **35** (2002) 579;
- [Gór93] Janusz Górczyński, *Podstawy statystyki z przykładami w arkuszach kalkulacyjnych*, wyd. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa 1993;
- [Jan07] M. Janik, K. Kozak, J. Mazur, R. Haber, *Radon in Buildings - Sources and Ways of Protection (in Polish)*, Builder (2007) 76;
- [Jag92] J. Jagielak, M. Biernacka, J. Henschke, A. Sosińska, *Radiologiczny Atlas Polski*, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej; Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 1992;
- [Kel88] G. Keller, M. Schütz, *Radon Exhalation from the Soil*, Radiation Protection Dosimetry **24** (1988) 43;
- [Koj] H. Kojima, K. Nagano, *Simulation of Radon Exhalation from the Ground*, preprint;
- [Koz04] K. Kozak, J. Mazur, M. Biernacka, A. Żak, K. Połuszny, *Interkalibracyjne pomiary naturalnych izotopów promieniotwórczych*, Postępy Techniki Jądrowej **47** (2004) 2-8;
- [Koz05] K. Kozak, J. Swakoń, M. Paszkowski, J. Łoskiewicz, M. Janik, J. Mazur, J. Bogacz, T. Horwacik, P. Olko, *Correlation Between Radon Concentration and Geological Structure of Krakow Area*, The Natural Radiation Environment - Seventh International Symposium (NRE-VII), edited by J.P. McLaughlin, E.S. Simopoulos, F. Steinhäusler, Radioactivity in the Environment Book Series, Vol. 7 (2005);
- [Koz06a] K. Kozak, J. Mazur, *Techniques for decreasing of indoor radon concentration (in Polish)*, Radon in the Environment of Living, Work and Study of Lower Silesia Inhabitants, Polski Klub Ekologiczny, Okręg Dolnośląski, Wrocław, Poland, ISBN: 978-83-89983-10-7 (2006) 63;
- [Mam92] K. Mamont-Cieśla, S.W. Rosiński, J. Henschke, J. Jagielak, *Study of Radon Concentrations Indoors and Estimation of Hazard to Inhabitants in Poland*, Operational and Research Activities of Central Laboratory for Radiological Protection in the Years 1990-1991., Warsaw 1992;
- [Mar92] M. Markkanen, H. Arvela, *Radon Emanation from Soils*, Radiation Protection Dosimetry **45** (1992) 269;
- [Mas82] G.C. Mason, G. Elliott, T.H. Gan, *A Study of Radon Emanation from Waste Rock at Northern Territory Uranium Mines*, Raport Australian Radiation Laboratory ARL/TR044, 1982;
- [Maz04] J. Mazur, K. Kozak, T. Horwacik, R. Haber, T. Zdziarski, *Influence of meteorological conditions on radon measurements in soil – preliminary results*, Prace Naukowe GIG Mining & Environment, Research Report, Quarterly Katowice 2004, NORM IV Conference Szczyrk, May 2004, Poland (2004) 59;
- [Maz05] J. Mazur, K. Kozak, T. Zdziarski, A. Igielski, R. Haber, *Automatyczny przyrząd do ciągłego pomiaru ekshalacji radonu z gleby*, Materiały konferencyjne: II Ogólnopolska Konferencja „Radon w środowisku”, 20-21 września 2005, Kraków, Raport IFJ nr 1967/AP (2005) 34;
- [Meg73] K. Megumi, T. Mamuro, *Radon and Thoron Exhalation from the Ground*, J. Geophys. Res. **78** (1973) 1804;

- [Mni04] Z.Mnich , M.Karpińska , J.Kapała , K.Kozak, J.Mazur, A.Birula and K.Antonowicz *Radon concentration in hospital buildings erected during the last 40 years in Białystok, Poland*, Journal of Environmental Radioactivity **75** (2004) 225-232;
- [Naz92] W.W. Nazaroff, *Radon Transport from Soil to Air*, Reviews of Geophysics, **30** (1992) 137;
- [Obe96] S. Oberstedt, H. Vanmarcke, *A Radon Exhalation Monitor*, Radiation Protection Dosimetry **63** (1996) 69;
- [PHARE94] Projekt PHARE PH 4.02/94, *Wytyczne dotyczące pomiaru radioaktywności i jej rozkładu w zakładach wydobywania i wzbogacania uranu*;
- [Poj90] P.M. Pojer, J.R. Peggie, R.S. O'Brien, S.B. Solomon, K.N. Wise, *Performance of a Diffusion Barrier Charcoal Adsorption ^{222}Rn Monitor under Conditions of Varying Humidity and Temperature*, Health Physics **58** (1990) 13;
- [Por93] J. Porstendörfer, *Properties and Behaviour of Radon and Thoron and Their Decay Products in the Air*, Final Report of the Fifth Int. Symp. on the Natural Radiation Environment, Tutorial Session 2 (1993) 69;
- [Prz2000] T.A. Przylibski, *Estimating the Radon Emanation Coefficient from Crystalline Rocks into Groundwater*, Applied Radiation and Isotopes **53** (2000) 473;
- [Prz05] T.A. Przylibski, *Radon – składnik swoisty wód leczniczych Sudetów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005;
- [Rad87] Radon Reference Manual, EPA 520/1-87-20, wyd. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, 1987;
- [Rog91] V.C. Rogers, K.K. Nielson, *Correlations for Predicting Air Permeabilities and ^{222}Rn Diffusion Coefficients of Soils*, Health Physics **61** (1991) 225;
- [Qua91] Quantachrome Corporation Multipycnometer, manual 10/91;
- [Sha01] N. Sharma, H.S. Virk, *Exhalation Rate Study of Radon/Thoron in Some Building Materials*, Radiation Measurements **34** (2001) 467;
- [Sch84] S.D. Schery, D.H. Gaeddert, M.H. Wilkening, *Factors Affecting Exhalation of Radon from a Gravelly Sandy Loam*, J. Geophys. Res. **89** (1984) 7299;
- [Sha06] Shafi-ur-Rehman, Matiullah, Shakeel-ur-Rehman, Said Rahman, *Studying ^{222}Rn Exhalation Rate from Soil and Sand Samples Using CR-39 Detector*, Radiation Measurements **41** (2006) 708;
- [Str84] E. Stranden, A.K. Kolstad, B. Lind, *The Influence of Moisture and Temperature on Radon Exhalation*, Radiation Protection Dosimetry **7** (1984) 55;
- [Str85] E. Stranden, K. Ulbak, H. Ehdwall, N. Jonassen, *Measurements of Radon Exhalation from the Ground: A Usable Tool for Classification of the Radon Risk of Building Ground ?*, Radiation Protection Dosimetry **12** (1985) 33;
- [Swa05] J. Swakoń, K. Kozak, M. Paszkowski, R. Gradziński, J. Łoskiewicz, J. Mazur, M. Janik, J. Bogacz, T. Horwacik, P. Olko, *Radon Concentration in Soil Gas around Local Disjunctive Tectonic Zones in the Kraków Area*, Journal of Environmental Radioactivity **78** (2005) 137-149;
- [Th99] *ThetaProbe Soil Moisture Sensor type ML2x*, User Manual, ML2x-IU-1.21, Delta-T Devices Ltd., 1999;

- [UNS88] *Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly, with Annexes. United Nations Sales publication E.88.IX.7. United Nations, New York, 1988;
- [Zun06] Z.S. Žunić, I. Kobal, J. Vaupotič, K. Kozak, J. Mazur, A. Birovljev, M. Janik, I. Čeliković, P. Ujić, A. Demajo, G. Krstić, B. Jakupi, M. Quarto, F. Bochicchio, *High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niska Banja (Balkan region)*, *Journal of Environmental Radioactivity* **89** (2006) 249;
- [Wea97] *Weather Monitor II, Owner's Manual*, DAVIS Instruments Corp. 1997;
- [Yu96] K.N.Yu, E.C.M. Young, T.F. Chan, T.Lo, R.V. Balendran, *The Variation of Radon Exhalation Rates from Concrete Surfaces of Different Ages*, *Building and Environment* **31** (1996) 255;

ANEKS

W formie elektronicznej zapisano na nośniku CD: „ZESTAW DANYCH ŹRÓDŁOWYCH” – „Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu a parametry meteorologiczne i własności gleby”; praca doktorska – Jadwiga Mazur, IFJ PAN, 2008.

Katalog <WYNIKI> zawiera pełny zestaw wyników pomiarów ekshalacji radonu z gruntu wraz z kompletem danych meteorologicznych rejestrowanych w okresie pomiarowym 2003-2006.

Zbiór *DANE_METEO.xls* zawiera dane meteorologiczne rejestrowane za pomocą stacji DAVIS z krokiem 30 minutowym.

Zbiór *WYNIKI_POMIAROW_EKSHALACJI.xls* zawiera zestaw wyników pomiarów szybkości ekshalacji radonu z gruntu oraz odpowiadające dane meteorologiczne.

Na płycie zamieszczono także program AdobeAcrobat do odczytu ww. plików.

OPIS ARKUSZA „TABELA A1”

W arkuszu *Tabela A1* umieszczono wyniki pomiarów z lat 2003 – 2005.

Kolumna 1 zawiera datę pomiaru szybkości ekshalacji radonu.

W kolumnie 2 przedstawiono wartość szybkości ekshalacji radonu E .

Błąd wartości ekshalacji dE zawiera kolumna 3.

Kolejne kolumny zawierają:

- średnie ciśnienie $Ciśn_{2,5}$ (kolumna 4),
- średnia temperatura $T_{2,5}$ (kolumna 5),
- temperatura gleby na głębokości 100 cm T_{gl} (kolumna 6),
- różnica temperatur powietrza i gleby d_T (kolumna 7),
- suma opadów atmosferycznych z 24 h przed zakończeniem pomiaru ekshalacji $Opad_{24}$ (kolumna 8)

OPIS ARKUSZA „TABELA A2”

W arkuszu *Tabela A2* umieszczono wyniki pomiarów z lat 2005 – 2006 wykonane za pomocą urządzenia AutoExh.

Kolumna 1 i 2 zawiera datę i godzinę, dla której wyznaczono wartość szybkości ekshalacji radonu. W kolumnie 3 przedstawiono wartość szybkości ekshalacji radonu (E). Błąd wartości ekshalacji zawiera kolumna 4 (dE). Kolejne kolumny zawierają: średnia temperatura powietrza T_{zew} (kolumna 5), opad atmosferyczny $Opad$ (kolumna 6), ciśnienie zewnętrzne $Ciśn$ (kolumna 7), wilgotność powietrza w (kolumna 8), szybkość wiatru V_{wiatr} (kolumna 9), średnia temperatura $T_{2,5}$ (kolumna 10), średnie ciśnienie $Ciśn_{2,5}$ (kolumna 11), temperatura gleby na głębokości 100 cm T_{gl} (kolumna 12), różnica temperatur powietrza i gleby d_T (kolumna 13), suma opadów atmosferycznych z 24 h przed zakończeniem pomiaru ekshalacji $Opad_{24}$ (kolumna 14).

Wyjaśnienie używanych w Tabeli A2 symboli:

T_{zew} , V_{wiatr} , $Ciśn$, $Opad$, w : wartości parametrów (odpowiednio: temperatury powietrza, szybkości wiatru, ciśnienia atmosferycznego, opadów i wilgotności powietrza) zarejestrowanych w trakcie pomiaru ekshalacji, na pół godziny przed jego zakończeniem.

$Ciśn_{2,5}$; $T_{2,5}$: wartości średnie ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza obliczono z 5 wartości rejestrowanych przez stację meteorologiczną, czyli z okresu 2,5 godzin. W tym czasie przeprowadzony był pomiar ekshalacji radonu trwający 1,5 godziny.

T_{gl} : temperatura gleby mierzona na głębokości 1 m

d_T : różnica temperatur powietrza i gleby $T_{2,5} - T_{gl}$

$Opad_{24}$: suma opadów atmosferycznych z okresu 24 godzin przed zakończeniem pomiaru ekshalacji radonu

Katalog <RYSUNKI> zawiera przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza, opadów i szybkości wiatru dla jesieni 2005, zimy 2006, wiosny 2006 i lata 2006. (plik Rys_A1_A5.pdf)

Rys. A1. Przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian ciśnienia atmosferycznego (2005-2006)

Rys.A2. Przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian temperatury powietrza (2005-2006)

Rys.A3. Przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian wilgotności względnej powietrza (2005-2006)

Rys.A4. Przebiegi szybkości ekshalacji na tle opadów (2005-2006)

Rys. A5. Przebiegi szybkości ekshalacji na tle zmian szybkości wiatru (2005-2006)