

**WYNIKI ROCZNEGO MONITORINGU STĘŻENIA RADONU
W POWIETRZU BUDYNKU MIESZKALNEGO
W ŁODZI NA TLE WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH**

**Results of 1-year monitoring of air radon concentration in a detached house
in Łódź with reference to meteorological conditions**

AGNIESZKA PODSTAWCZYŃSKA*

Zarys treści. W pracy dokonano analizy zmienności stężenia aktywności radonu (Rn-222) w powietrzu, rejestrowanego w trybie ciągłym, w domu jednorodzinnym w Łodzi, w okresie 356 dni, w latach 2014–2015. Tło meteorologiczne pomiarów Rn-222 stanowiły wartości temperatury powietrza w budynku i w warunkach zewnętrznych, sum godzinnych opadu atmosferycznego, ciśnienia atmosferycznego oraz typy cyrkulacji. Stwierdzono zmienność sezonową oraz dobową poziomu stężenia badanego radionuklidu w powietrzu uwarunkowaną sposobem użytkowania domu oraz czynnikami meteorologicznymi. Zamknięcie (nieużytkowanie) domu w lipcu 2014 roku spowodowało 5-krotny wzrost stężenia aktywności Rn-222 w stosunku do wartości średniej. Spadek temperatury powietrza w otoczeniu budynku wykazał słabą korelację dodatnią, ze wzrostem stężenia aktywności Rn-222 w domu. Zmniejszenie poziomu stężenia aktywności Rn-222 w budynku obserwowano po intensywnych opadach. Ciśnienie atmosferyczne i typ cyrkulacji nie wykazywały wpływu na poziom rejestrowanego stężenia aktywności Rn-222.

Słowa kluczowe: bioklimat domu, jakość powietrza, radon, temperatura powietrza, opady, ciśnienie atmosferyczne, Łódź

Abstract. The aim of the study was to investigate the variability of air Rn-222 concentration in a single-family detached house in Łódź with reference to indoor-outdoor air temperature differences, precipitation, air pressure and type of atmospheric circulation. Experiments comprising continuous, simultaneously measurements of meteorological elements and air Rn-222 concentration using AlphaGUARD® PQ2000 PRO (ionization chamber, diffusion mode) in the period from 20 May 2014 to 10 May 2015. A slightly positive correlation between Rn-222 levels and indoor-outdoor air temperature has been shown but the relationship with air pressure was not confirmed. The analysis indicated that rainfall can be an important meteorological controlling factor of air Rn-222 levels in houses located in an area with shallow groundwater.

Key words: bioclimate of house, air quality, radon, air temperature, precipitation, air pressure, Łódź

Wprowadzenie

Radon (Rn-222), radioaktywny gaz należący do szeregu promieniotwórczego uranu (U-238), powszechnie występuje w środowisku i jest jedną z naturalnych domieszek powietrza atmosferycznego. Źródłem Rn-222 jest litosfera, gdzie gaz ten powstaje w wyniku rozpadu radu (Ra-226), a długi czas połowicznego rozpadu (3,8 dnia) determinuje jego swobodną migrację między lito-, hydro- i atmosferą. Średnie stężenie tego gazu w atmosferze nad obszarami lądowymi jest niewielkie i wynosi przeciętnie $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($1 \text{ B}\cdot\text{qm}^{-3}$ oznacza 1 przemianę jądrową w ciągu 1 sekundy w 1 m^3 powietrza) (UNSCEAR 2000; Eisenbud 1987).

W powietrzu glebowym stężenie promieniotwórcze tego gazu jest o trzy-cztery rzędy wielkości wyższe. W Polsce przeciętnie jego wartość zmienia się w zakresie $40\ 000\text{--}80\ 000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (bez Dolnego Śląska), a rekordowe wartości stężenia radonu w glebie na obszarze Polski zostały zarejestrowane w okolicy Świeradowa Zdroju i Kowar, wynosząc odpowiednio $680\ 000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i powyżej $2\ 000\ 000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ – górny limit detekcji miernika AlphaGUARD® PQ2000 PRO (Biernacka i in. 2006; Przylibski 2015).

W wyniku zjawiska tzw. efektu kominowego, wywołanego różnicą temperatury powietrza pomiędzy wnętrzem budynków a otoczeniem, które generuje różnicę ciśnienia, Rn-222 migruje z powietrza glebowego do budynków. Do intensyfi-

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

cji dyfuzji i konwekcji Rn-222 z gleby do pomieszczeń („zasysania” radonu przez budynki) wystarcza niewielka różnica ciśnienia, tj. rzędu kilku Pa, co jest obserwowane szczególnie w chłodnej porze roku (Nazaroff, Nero 1988). Gaz ten, niewyczuwalny zmysłami ludzkimi (bezbarwny, bezwonny, bez smaku), jest radionuklidem alfa-promieniotwórczym, o silnych właściwościach jonizujących. Jego pochodne to ciała stałe (polon Po-218, bizmut Bi-210 i ołów Pb-214), które przyłączając się do aerozoli tworzą aerozole promieniotwórcze – źródło naturalnego promieniowania jonizującego dla mieszkańców Ziemi. W świetle badań epidemiologicznych względnie małe stężenie radonu w powietrzu w budynkach, rzędu $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, jest istotnym statystycznie czynnikiem wzrostu ryzyka zachorowania na nowotwór płuc u osób długoterminowo przebywających w takim środowisku zamieszkania, pracy itp. Efekt kancerogenny radonu i jego pochodnych wzrasta w przypadku działania synergicznego z innymi substancjami kancerogennymi, tj. z dymem tytoniowym, azbestem, tlenkiem azotu itd. (Zeeb, Shannoun 2009).

Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM (Art. 103) z 5 grudnia 2013 roku definiuje przenikanie radonu z gruntu do pomieszczeń jako sytuację narażenia istniejącego podlegającego ograniczeniom i nakłada ona obowiązek na kraje członkowskie UE opracowania do 2018 roku krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach mieszkalnych, dostępnych publicznie i w miejscach pracy oraz zakłada podanie m.in. krajowych poziomów referencyjnych stężenia Rn-222 w pomieszczeniach. Przygotowywany aktualnie w Polsce krajowy plan radonowy, dostosowany do Dyrektywy EURATOM, znisie marginalizowanie zagadnienia monitorowania Rn-222 w pomieszczeniach, zwłaszcza, że w naszej strefie klimatycznej proporcja czasu ekspozycji na Rn-222 i jego radioaktywne pochodne to 80% w budynkach i 20% na wolnym powietrzu. W rocznej dawce efektywnej promieniowania jonizującego, jaką statystyczny mieszkaniec Polski otrzymuje ze źródeł naturalnych, Rn-222 stanowi ok. 40% (zblizona wartość do średniej światowej) (UNSCEAR 2000; Raport PAA 2015; Przylibski 2005).

W nakreślonym powyżej kontekście Rn-222 należy uznać za bardzo istotny czynnik determinujący jakość powietrza oraz ważny element bioklimatu pomieszczeń. Była to główna przesłanka do rozpoczęcia ciągłego monitoringu stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinnym w Łodzi.

Pomiary stężenia aktywności Rn-222 w budynkach w Polsce były podejmowane przez wielu autorów, w różnym kontekście, a dorobek publikacyjny w zakresie tej problematyki jest znaczący (m.in. Nowina-Konopka 1995; Karpińska i in. 2004a, b, 2005; Kozak i in. 2011; Olszewski, Skubalski 2011; Polednik i in. 2016; Przylibski i in. 2011; Przylibski 2015; Wysocka i in. 2004, 2010). Obszerniejsze, syntetyczne omówienie wyników badań stężenia aktywności Rn-222 w budynkach z obszaru Polski zostało przedstawione w monografii pt.: „Meteorologiczne uwarunkowania stężenia radonu w przygruntowej warstwie powietrza w środowisku miejskim i zamiejskim” (Podstawczyńska 2013).

Pomimo długoletnich badań nad radonem w budynkach ciągle unikatowy charakter mają długoterminowe, synchroniczne serie danych o dużej rozdzielczości czasowej, tj. średnie 1-godzinne stężenia aktywności Rn-222 i parametrów meteorologicznych.

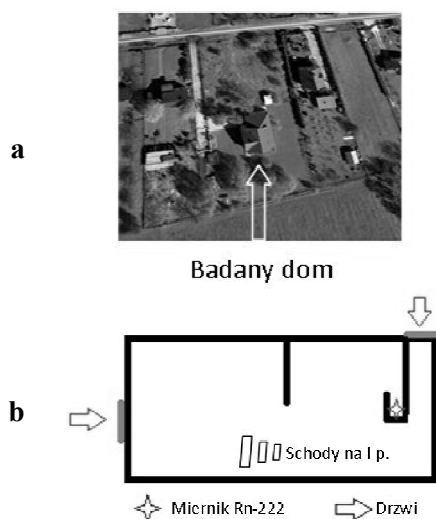
Celem niniejszego opracowania jest próba oceny wpływu czynników meteorologicznych – zmian temperatury powietrza, ciśnienia atmosferycznego, sum opadów – na wartość stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w dwukondygnacyjnym, niepodpiwniczonym, wolnostojącym domu w okresie od maja 2014 roku do maja 2015 roku.

Material źródłowy i metoda opracowania

Bazę danych wykorzystaną w niniejszym opracowaniu stanowiły jednogodzinne średnie wartości stężenia aktywności Rn-222 rejestrowane na parterze dwukondygnacyjnego domu jednorodzinnego w Łodzi w okresie 356 dni (od 20 maja 2014 roku do 10 maja 2015 roku). Badany dom położony jest w północno-zachodniej części miasta, gdzie dominuje luźna, niska zabudowa, z dużym udziałem terenów zielonych (ul. Kąkolowa 66, $\varphi = 51^{\circ}49'11''\text{N}$, $\lambda = 19^{\circ}20'57''\text{E}$) (rys. 1a).

Do pomiarów stężenia aktywności Rn-222 wykorzystano precyzyjną aparaturę zapewniającą ciągły monitoring poziomu stężenia w trybie dyfuzyjnym (automatyczna komora jonizacyjna AlphaGUARD® PQ2000 PRO). Do metalowego wnętrza komory jonizacyjnej gaz Rn-222 przechodzi w trybie dyfuzyjnym przez filtr z włókna szklanego, który zatrzymuje m.in. zanieczyszczenia pyłowe, a także produkty rozpadu Rn-222. Elektroda centralna rejestruje impulsy elektryczne generowane przez promieniowanie jonizujące

pochodzące od Rn-222 (rejestracja prądu jonizacji), co pozwala na zmierzenie stężenia aktywności Rn-222 w komorze pomiarowej (Genitron Instruments GmbH 1998). Średnie 60-minutowe wartości stężenia aktywności Rn-222 były zapisywane w pamięci rejestratora i stanowią podstawę niniejszej analizy. Miernik AlphaGUARD® PQ2000 PRO synchronicznie rejestrował także wartości temperatury, wilgotności oraz ciśnienia powietrza. Urządzenie do pomiaru stężenia aktywności Rn-222 ustawione było niezmiennie przez okres badań w tym samym położeniu (na podłożu), na pierwszej kondygnacji (parter), z dala od okien i drzwi, w miejscu, gdzie wentylacja powietrza nie jest ograniczona (rys. 1b). Pomiary próbne przed rozpoczęciem eksperymentu we wskazanym na planie domu miejscu wykazały szybką reakcję miernika na otwarcie lub zamknięcie domu, zatem wartości rejestrowane w wybranym punkcie pomieszczenia odzwierciedlały warunki panujące na parterze budynku. Powierzchnia parteru domu to 100 m², a jego wysokość wynosi 3 m. Dwukondygnacyjny dom (parter i użytkowe poddasze), niepodpiwniczony, został zbudowany w 2004 roku z uszczelnieniem podłoża zwykłą folią, niezatrzymującą dyfuzji radonu. Jest on użytkowany przez 4-osobową rodzinę.



Rys. 1. Otoczenie badanego domu (a) i schemat pomieszczenia na parterze domu z zaznaczonym miejscem ustawienia miernika radonu AlphaGUARD® PQ2000 PRO (b)

opracowanie na podstawie: Google Maps (a),
opracowanie własne (b)

Surroundings of the analyzed house (a) and floorplan for the ground floor (b) (floor area 100 m², 3 m height) with localization of radon monitor AlphaGUARD® PQ2000 PRO

based on: Google Maps (a), own elaboration (b)

Podłoże domu stanowią osady czwartorzędowe, w skład których wchodzi piaski (warstwa 10–40 cm) na głębokości ok. 0,4–0,7 m oraz glina piaszczysta na głębokości ok. 0,7 m. Cechą środowiskową, szczególnie istotną dla migracji radonu do budynków, jest położenie zwierciadła wód gruntowych, które w przypadku badanego domu jest płytkie. Występuje bowiem już na głębokości 0,4 m w piaskach oraz na głębokości ok. 1,2 m w glinie. Duża wilgotność gruntu jest czynnikiem hamującym ekshalację Rn-222 do atmosfery (Janik 2005; Mazur 2008; Przylibski 2005).

Tło meteorologiczne dla serii wyników pomiarów stężenia aktywności Rn-222 stanowiły wartości temperatury powietrza wewnątrz budynku i w warunkach zewnętrznych, ciśnienia atmosferycznego oraz wysokość opadów atmosferycznych monitorowanych w odległej o ok. 3 km stacji meteorologicznej. W analizie wykorzystano także dzienne typy cyrkulacji atmosferycznej (cyklonalne i antycyklonalne) wyznaczone wg obiektywnej metody Piotrowskiego na podstawie kierunku wiatru geostroficznego i wirowości ścieżca (Piotrowski 2009).

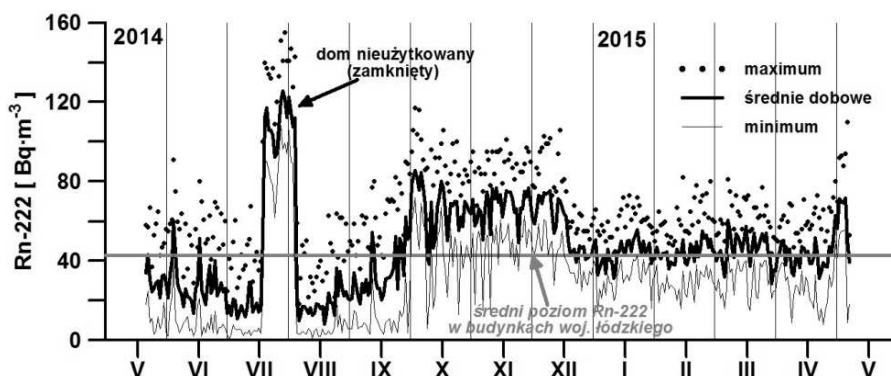
Wyniki

Średnie roczne stężenie aktywności Rn-222 w powietrzu badanego budynku, 47 Bq·m⁻³, było zbliżone do średniego poziomu krajowego i wojewódzkiego podawanego w „Radiologicznym Atlasie Polski” z 2005 roku (49 Bq·m⁻³ i 43 Bq·m⁻³ – średnia dla Polski i dla woj. łódzkiego). Według najnowszych badań stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu budynków położonych w różnych jednostkach geologicznych Polski ww. średni krajowy poziom jest wyraźnie zaniżony. Nowe dane wskazują na zakres wahań stężenia (średnia geometryczna) w budynkach mieszkalnych Polski od 112 Bq·m⁻³ (latem) do 137 Bq·m⁻³ (wiosną) (Kozak i in. 2011). Na terenie synklinorium łódzkiego średnia roczna miesięczna wartość stężenia aktywności Rn-222 w budynkach wynosi 73 Bq·m⁻³ – wg badań prowadzonych w latach 2008–2009 (Przylibski i in. 2011). W świetle powyższych, nowych danych dla obszaru Polski średnie roczne stężenie Rn-222 w powietrzu domu w Łodzi w latach 2014–2015 jest istotnie niższe.

Prawidłowością w przebiegu rocznym stężenia aktywności Rn-222 w analizowanym domu w Łodzi jest duża zmienność wartości średnich i ekstremalnych z dnia na dzień oraz zróżnicowanie sezonowe (rys. 2). W okresie użyt-

kowania domu przez 4 osoby średnie dobowe stężenie Rn-222 zmieniało się od $8 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (w dniu 08.08.2014) do $85 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (w dniu 03.10.2014). W prezentowanej rocznej serii danych można zauważyć zróżnicowanie sezonowe stężenia aktywności Rn-222 – najniższe zanotowano latem, przeciętnie $22 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, a najwyższe jesienią, przeciętnie $56 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. W zimie i wiosną przeciętne wartości Rn-222 były zbli-

żone do średniej dla województwa, wynosiły odpowiednio $49 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $46 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (rys. 2). Podobną roczną zmienność stężenia aktywności Rn-222 z minimum w porze ciepłej i maksimum w porze chłodnej w budynkach mieszkalnych północno-wschodniej Polski przedstawiła Karpińska i in. (2004a, b, 2005) oraz opisywał Hubbard i in. (1996) dla krajów północnej Europy.



Rys. 2. Przebieg średnich, maksymalnych i minimalnych dobowych wartości stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinym w Łodzi w okresie 20.05.2014–10.05.2015

Variability of average, maximum and minimum daily values of air Rn-222 concentration in the single-family detached house in Łódź in the period 20.05.2014–10.05.2015

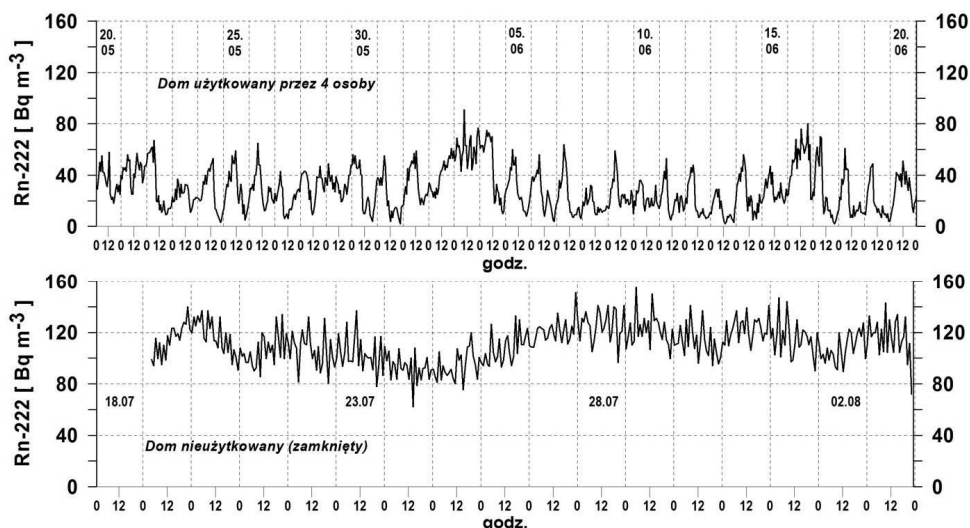
Istotny wzrost wartości ($\sim 2,5$ krotny) powyżej średniej rocznej zaobserwowano w okresie letnim, w czasie zamknięcia (nieużytkowania domu). Wówczas rejestrowane średnie dobowe stężenia aktywności Rn-222 zmieniały się od $52 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ do $125 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (w dniach 19.07–03.08.2014) (rys. 2). Zmienność roczna 1-godzinnych średnich wartości stężenia aktywności Rn-222 podczas użytkowania domu zawierała się w zakresie $2\text{--}117 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $20\text{--}155 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ w domu zamkniętym (rys. 2, 3).

Dzienna zmienność stężenia aktywności Rn-222 w okresie bytowania mieszkańców była bardzo wyraźna z maksimum w nocy i minimum w dzień, a zaniknęła w okresie całkowitego zamknięcia domu na okres wakacyjny. To świadczy o istotnym wpływie wentylowania pomieszczeń (otwieranie drzwi, okien) na cykl dobowy stężenia tego radionuklidu (rys. 3). Największym zakresem wahań dobowych, rzędu $30 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, cechują się miesiące letnie oraz wrzesień. Październik, listopad i grudzień to miesiące z najwyższym poziomem stężenia aktywności Rn-222 rzędu $60\text{--}70 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ i brakiem istotnego rytmu dobowego (rys. 4).

Porównanie zmian stężenia aktywności Rn-222 z wartościami różnicy temperatury powietrza pomiędzy budynkiem a otoczeniem wykazało słabą dodatnią korelacją (współczynnik determi-

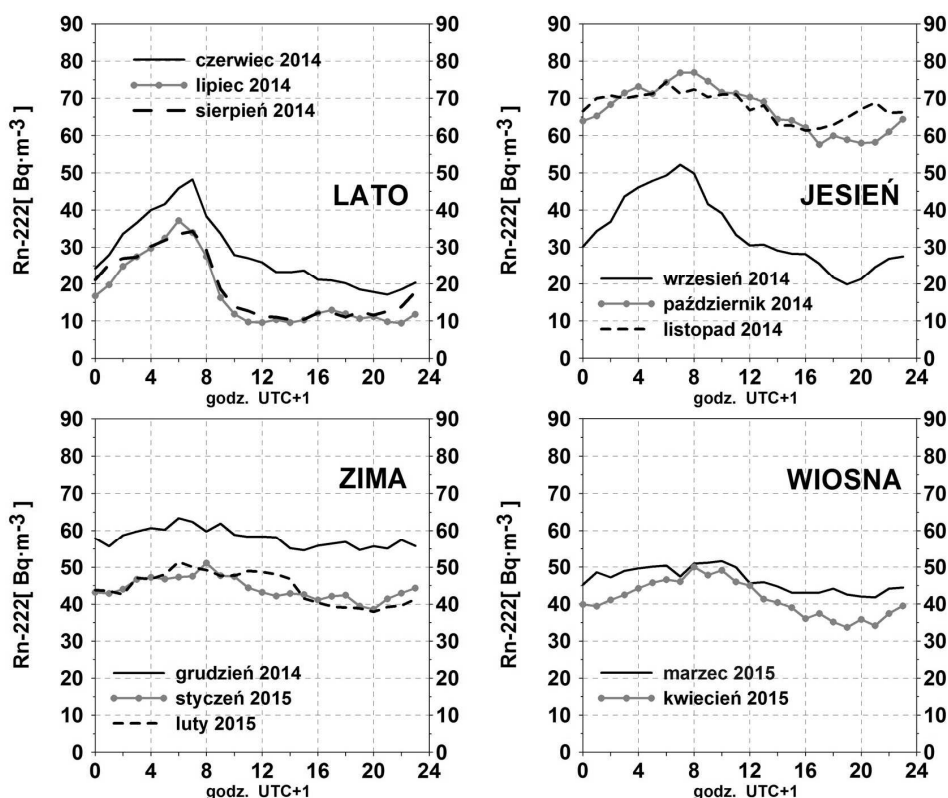
nacji $R^2 = 0,2$) (rys. 5). Najsilniejszy związek z omawianą różnicą temperatury powietrza ujawnił się jesienią i wiosną (rys. 6). Wielu autorów np. Nazaroff i Nero (1988), Marley (2001), Rowe i in. (2002), Karpińska i in. (2004a, b, 2005) wskazuje tzw. efekt kominowy (wywołany zmniejszaniem temperatury powietrza na zewnątrz budynku w stosunku do warunków termicznych panujących wewnątrz domu) za kluczowy czynnik intensyfikujący przepływ radonu z gruntu do budynku. Różnica temperatury powietrza generuje ujemną różnicę ciśnienia powietrza pomiędzy wnętrzem budynku a otoczeniem (rzędu kilku Pa), która wywołuje „zasysanie” Rn-222 z podłoża do budynkach. W opracowaniach dotyczących stężenia radonu w obiektach podziemnych przedstawiono podobne wnioski, uznając tzw. efekt kominowy i różnicę temperatury powietrza pomiędzy warunkami zewnętrznymi i panującymi w obiekcie za istotny czynnik migracji radonu (Przylibski, Piasecki 1998; Fijałkowska-Lichwa, Przylibski 2011; Fijałkowska-Lichwa 2014).

Opisywanej wyżej prawidłowości nie zaobserwowano jednak w grudniu 2014 roku w badanym domu w Łodzi. W tym okresie nastąpił wyraźny spadek stężenia aktywności Rn-222, wykazujący ujemną korelację z różnicą temperatury



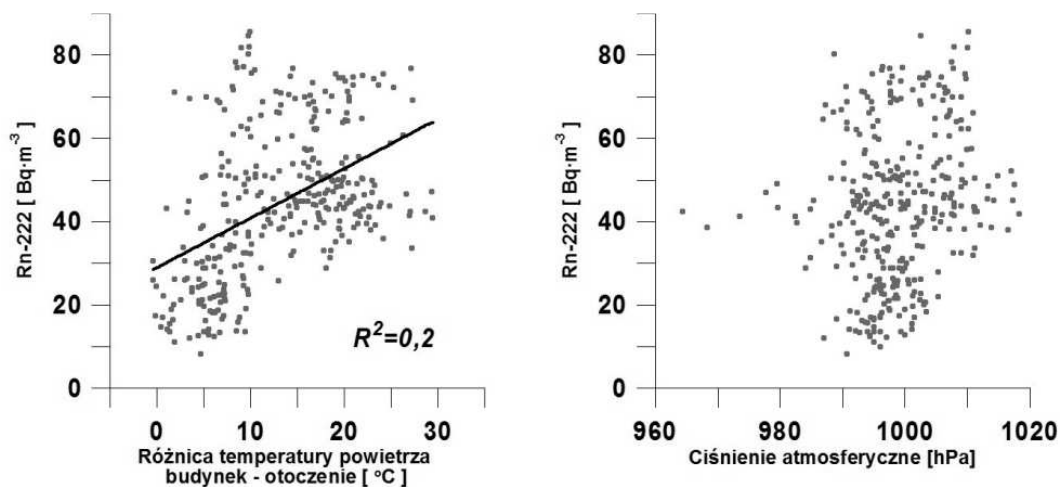
Rys. 3. Przebieg średnich godzinnych wartości stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinnym w Łodzi w okresie użytkowania domu jednorodzinnego w Łodzi przez 4 osoby (20.05.2014 –20.06.2014) oraz w okresie nieużytkowania (zamknięcia) domu (19.07.2014–03.08.2014)

Variability of average hourly values of air Rn-222 concentration in the single-family detached house in Łódź in the occupied period by 4 people (20.05. 2014–20.06.2014) and during unoccupied (closed) house (19.07.2014–03.08.2014)



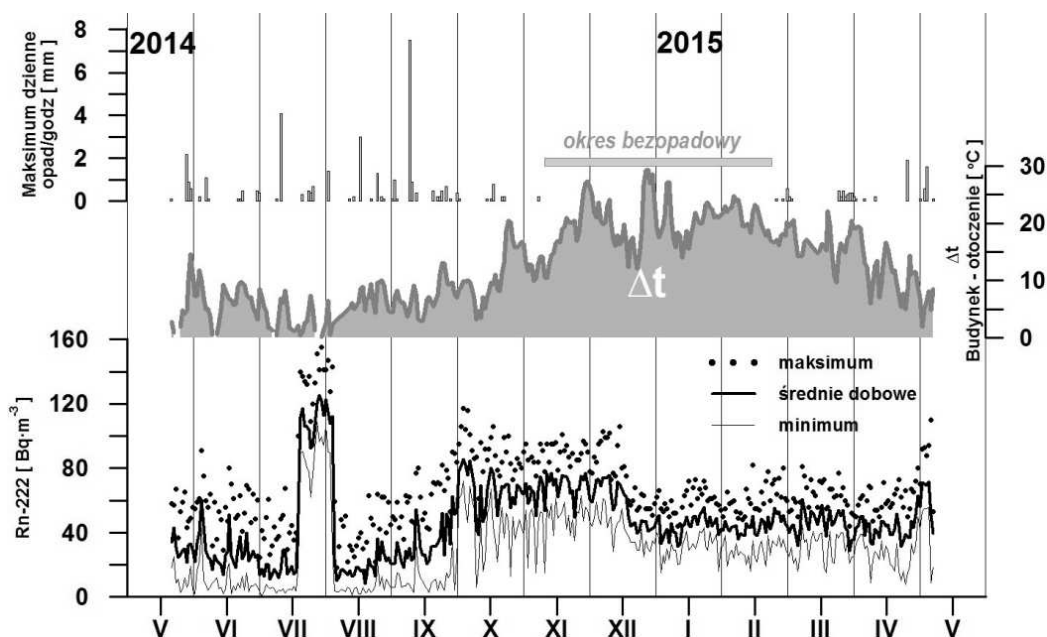
Rys. 4. Średni dobowy przebieg wartości stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinnym w Łodzi w poszczególnych miesiącach badanego okresu (od 01.06.2014 do 01.04. 2015, z serii danych wykluczono okres zamknięcia domu)

Average daily course of air Rn-222 concentration in the single-family detached house in particular months in the analyzed period (01.06.2014–01.04. 2015, Rn-222 data registered during the closed-house period was excluded)



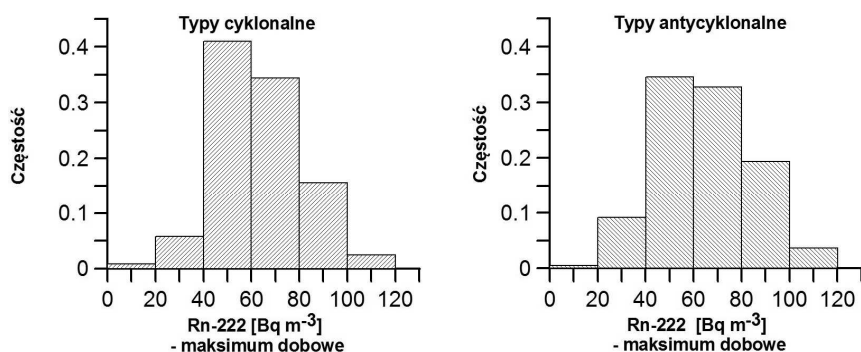
Rys. 5. Stężenie Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinym (średnie dobowe) w funkcji różnic temperatury powietrza między budynkiem a otoczeniem oraz w funkcji ciśnienia atmosferycznego w Łodzi w okresie 20.05.2014–10.05.2015

Indoor air Rn-222 concentration (daily averages) in the single-family detached house as a function of indoor-outdoor air temperature differences and air pressure in Łódź in the period 20.05.2014–10.05.2015



Rys. 6. Przebieg średnich, maksymalnych i minimalnych dobowych wartości stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinym w Łodzi na tle różnic temperatury między budynkiem a otoczeniem (Δt) oraz maksymalnych dobowych sum godzinnych opadów atmosferycznych w okresie 20.05.2014–10.05.2015

Variability of average, maximum and minimum daily values of air Rn-222 concentration in the single-family detached house in Łódź with reference to indoor-outdoor air temperature differences (Δt) and daily maximum of hourly sum of precipitation in the period 20.05.2014–10.05.2015



Rys. 7. Rozkład częstości maksymalnego dobowego stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w domu jednorodzinny w Łodzi w dniach z cyklonalnym i antycyklonalnym typem cyrkulacji atmosferycznej w okresie 20.05.2014–10.05.2015

Frequency distribution of indoor air Rn-222 concentration daily maximum concentration in cyclonic and anticyclonic atmospheric circulation in the single-family detached house in Łódź in the period 20.05.2014–10.05.2015

powietrza (rys. 6). Powodem zaistniałej sytuacji mogło być intensywne wykorzystywanie przez mieszkańców domu ogrzewania kominkowego, co zwiększyło wentylację pomieszczenia i mogło wpłynąć na zmniejszenie koncentracji radionuklidu w powietrzu. Ten efekt był opisywany dla domów w Szwecji przez Hubbard i in. (1996).

Kolejnym elementem pogody analizowanym w korelacji ze stężeniem Rn-222 były opady atmosferyczne. Wyniki badań wykazały wyraźny spadek stężenia aktywności Rn-222 po okresach opadowych, natomiast najwyższe stężenia aktywności Rn-222 obserwowano w okresie bezopadowym, przypadającym na miesiące jesienne i zimowe badanego okresu (rys. 6). Monitorowany dom położony jest na terenie o płytkim zwierciadle wód gruntowych (0,4–0,7 m poniżej poziomu gruntu). Jak wynika z rozważań teoretycznych woda w gruncie blokuje transport Rn-222 do atmosfery i do budynków (Tanner 1964; Przylibski 2005). Podobne wnioski zaprezentował De Francesco i in. (2010) badając stężenie aktywności Rn-222 we Włoszech w budynkach położonych na terenie o płytko występujących wodach gruntowych.

Przesłanką do analizy wpływu wartości ciśnienia atmosferycznego oraz typu cyrkulacji na poziom stężenia aktywności Rn-222 w budynku były wyniki analizy pilotażowej serii pomiarów dokonanej w Łodzi w korelacji ze zmianami ciśnienia atmosferycznego i typem cyrkulacji. Wyniki uzyskane przez Autorkę w 2007 roku (Podstawczyńska, Kozak 2008) wskazywały na wyraźny wpływ tego elementu pogody na przebieg zmian stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu w budynku. Hipoteza ta nie uzyskała potwierdzenia w świetle badań w oparciu o dane

z okresu maj 2014 – maj 2015 prowadzonych dla potrzeb niniejszego opracowania. Wykres korelacyjny nie wskazuje na istnienie zależności pomiędzy stężeniem Rn-222 a wartością ciśnienia atmosferycznego (rys. 5). Do podobnego wniosku skłaniają wyniki analizy rozkładów częstości maksymalnych dobowych wartości stężenia aktywności Rn-222 podczas typów cyrkulacji cyklonalnej i antycyklonalnej – nie odnotowano istotnych różnic między badanymi rozkładami (rys. 7).

Wnioski

Analiza rocznej, ciągłej serii 1-godzinnych wartości stężenia aktywności Rn-222 w powietrzu na parterze wolnostojącego domu jednorodzinnego (bez podpiwniczenia) w Łodzi w okresie 2014–2015 pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Istnieje zmienność sezonowa z minimum latem oraz maksimum jesienią.
2. Istnieje wyraźny rytm dobowy zmian stężenia aktywności Rn-222 latem oraz we wrześniu z maksimum w nocy i minimum w dzień w okresie użytkowania (wentylacji) domu oraz zanik rytmu dobowego w okresie nieużytkowania domu.
3. Brak wentylacji domu (zamknięcie okien, drzwi) podczas nieobecności mieszkańców skutkuje ~2,5-krotnym wzrostem stężenia aktywności Rn-222 w pomieszczeniach, co wskazuje na istotną rolę sposobu użytkowania pomieszczeń w kształtowaniu ich bioklimatu m.in. determinowanego przez promieniowanie jonizujące od radonu i jego pochodnych.

4. Poziom stężenia aktywności Rn-222 w budynku wykazuje słabą korelację dodatnią z różnicą temperatury powietrza pomiędzy budynkiem a otoczeniem, z wyjątkiem okresów intensyfikacji wentylacji podczas ogrzewania pomieszczenia.

5. Ujemna korelacja cechuje związek sum opadów atmosferycznych i stężenia aktywności Rn-222 w badanym domu, co wskazuje na istotną rolę uwilgotnienia gruntu dla osłabienia migracji tego gazu do budynków, szczególnie na terenie o płytkim zwierciadle wód gruntowych.

6. Analiza wartości ciśnienia atmosferycznego i typów cyrkulacji nie ujawnia związku tego elementu meteorologicznego ze stężeniem Rn-222 w badanym domu.

Wnioski płynące z przedstawionych badań wymagają potwierdzenia w oparciu o dłuższą serię obserwacyjną i większą liczbę budynków.

Prezentowana baza danych o poziomie stężenia aktywności Rn-222 w budynku na tle wybranych elementów meteorologicznych stanowi unikatowy w Polsce materiał, który może być wykorzystany do weryfikacji modelu transportu radonu do budynków, co będzie dalszym etapem prac badawczych w zakresie prezentowanej problematyki.

Autorka składa serdeczne podziękowanie mieszkańcom budynku przy ul. Kąkolowej 66 w Łodzi za udostępnienie domu do monitoringu radonu oraz okazaną pomoc. Autorka dziękuje również Mirkowi Janikowi z National Institute of Radiological Science (Chiba, Japonia) za inspirujące dyskusje.

Miernik radonu AlphaGUARD® PQ2000 PRO wykorzystany do pomiarów był finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu N306 015 32/1011 w latach 2007–2010.

Zewnętrzne dane meteorologiczne wykorzystywane w analizie pochodzą z bazy danych projektu 2012/05/B/ST10/00945 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Polsce.

Literatura

Biernacka Małgorzata, Krzysztof Isajenko, Paweł Lipiński, Zofia Pietrzak-Flis. 2006. Radiologiczny Atlas Polski 2005. Warszawa: Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Biblioteka Monitoringu Środowiska.

De Francesco Stefano, F. Pascale Tommasone, Emilio Cuoco, Dario Tedesco. 2010. „Indoor radon seasonal variability at different floors of build-

ings”. *Radiation Measurements* 45 (8): 928-934.

Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 13/1 z dnia 17.1.2014.

Eisenbud Merril. 1987. Environmental radioactivity: from natural, industrial and military sources. Third edition. San Diego: Academic Press.

Fijałkowska-Lichwa Lidia. 2014. „Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland)”. *Journal of Environmental Radioactivity* 135: 25-35.

Fijałkowska-Lichwa Lidia, Tadeusz A. Przylibski. 2011. „Short-term 222Rn activity concentration changes in underground spaces with limited air exchange with the atmosphere”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 1179-1188.

Genitron Instruments GmbH. 1998. User Manual Portable Radon Monitor „AlphaGUARD”, vol. 12/98. Frankfurt: Publishers Genitron Instruments GmbH.

Hubbard Lynn M., Hans Mellander, Gun A. Swedjemark. 1996. „Studies on temporal variations of radon in Swedish single-family houses”. *Environment International* 22 (Suppl. 1): S715-S722.

Janik Mirosław. 2005. Przenikanie radonu z gruntu do budynku: modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych. Raport Nr 1966/AP (rozprawa doktorska). Kraków: Instytut Fizyki Jądrowej PAN.

Karpińska Maria, Zenon Mnich, Jacek Kapała. 2004a. „Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland”. *Journal of Environmental Radioactivity* 77 (2): 101-109.

Karpińska Maria, Zenon Mnich, Jacek Kapała, Krzysztof Antonowicz. 2004b. „Seasonal changeability of indoor radon concentrations in one-family house”. *Nukleonika* 49 (1): 33-36.

Karpińska Maria, Zenon Mnich, Jacek Kapała, Krzysztof Antonowicz, Maciej Przystalski. 2005. „Time changeability in radon concentration in one-family dwelling houses in the northeastern region of Poland”. *Radiation Protection Dosimetry* 113 (3): 300-307.

Kozak Krzysztof, Jadwiga Mazur, Beata Kozłowska, Maria Karpińska, Tadeusz A. Przylibski, Kalina Mamont-Cieśla, Dominik Grządziel, Olga Stawarz, Małgorzata Wysocka, Jerzy Dorda, Adam Żebrowski, Jerzy Olszewski, Hayk Hovhannisyan, Marek Dohojda, Jacek Kapała, Izabela Chmielewska, Barbara Kłos, Jerzy Jankowski, Stanisław Mnich, Robert Kołodziej. 2011. „Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from

- seasonal variability of indoor radon". *Applied Radiation and Isotopes* 69 (10): 1459-1465.
- Marley Frederick. 2001. „Investigation of the influences of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings". *Atmospheric Environment* 35 (31): 5347-5360.
- Mazur Jadwiga. 2008. Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu a parametry meteorologiczne i własności gleby. Raport Nr 2014/AP (rozprawa doktorska). Kraków: Instytut Fizyki Jądrowej PAN.
- Nazaroff William W., Anthony V. Nero jr. 1988. Radon and its decay products in indoor air. New York: Wiley.
- Nowina-Konopka Małgorzata. 1995. „Indoor radon levels in north-western Poland". *Radiation Protection Dosimetry* 62 (4): 239-244.
- Olszewski Jerzy, Janusz Skubalski. 2011. „Stężenie radonu w wybranych budynkach mieszkalnych na terenie miasta Łodzi". *Medycyna Pracy* 62 (1): 31-36.
- Piotrowski Piotr. 2009. „Obiektywna metoda klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej dla Polski. *Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica* 10: 1-216.
- Podstawczyńska Agnieszka. 2013. Meteorologiczne uwarunkowania stężenia radonu w przygrunтовой warstwie powietrza w środowisku miejskim i zamiejskim. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Podstawczyńska Agnieszka, Krzysztof Kozak. 2008. Preliminary results of measurements of radon (^{222}Rn) concentration in the air in Łódź. W: Kazimierz Kłysik, Joanna Wibig, Krzysztof Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*, 467-476. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Polednik Bernard, Krzysztof Kozak, Jadwiga Mazur, Marzenna Dudzińska, Dominik Grządziel. 2016. „Radon and its decay products in an air-conditioned auditorium in correlation with indoor air parameters". *Indoor and Built Environment* doi: 10.1177/1420326X15626235.
- Przylibski Tadeusz A. 2005. Radon składnik swoisty wód leczniczych Sudetów. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Przylibski Tadeusz A. 2015. „Radon research in Poland: A review". *Solid State Phenomena* 238: 90-115.
- Przylibski Tadeusz A., Jacek Piasecki. 1998. „Radon as a natural radioactive tracer of permanent air movements in the Niedźwiedzia Cave (Śnieżnik Kłodzki, Sudety Mts.)". *Kras i Speleologia* 9: 179-193.
- Przylibski Tadeusz A., Adam Żebrowski, Maria Karpińska, Jacek Kapała, Krzysztof Kozak, Jadwiga Mazur, Dominik Grządziel, Kalina Mamont-Cieśla, Olga Stawarz, Beata Kozłowska, Barbara Kłos, Jerzy Dorda, Małgorzata Wysocka, Jerzy Olszewski, Marek Dohojda. 2011. „Mean annual ^{222}Rn concentration in homes located in different geological regions of Poland – first approach to whole country area". *Journal of Environmental Radioactivity* 102 (8): 735-741.
- Raport PAA. 2015. Raport Roczny Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2014 roku. Warszawa: Państwowa Agencja Atomistyki (<http://paa.gov.pl/sites/default/files/RaportPrezesaPAA2014.pdf>).
- Rowe Jane E., Mike Kelly, Laura E. Price. 2002. „Weather system scale variation in radon-222 concentration of indoor air". *Science of the Total Environment* 284 (1-3): 157-166.
- UNSCEAR. 2000. Annex B - Exposures from natural radiation sources. W: *Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Anexes. Volume I: Sources*, 84-156. New York: United Nations (http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf).
- Tanner Allan B. 1964. Radon migration in the ground: A review. W: John A. S. Adams, Wayne M. Lowder (red.) *The natural radiation environment*, 161-190. Chicago: University of Chicago Press.
- Wysocka Małgorzata, Stanisław Chalupnik, Jan Skowronek, Antoni Mielnikow. 2004. „Comparison between short- and long-term measurements of radon concentration in dwellings of Upper Silesia (Poland)". *Journal of Mining Science* 40 (4): 417-422.
- Wysocka Małgorzata, Beata Kozłowska, Jerzy Dorda, Barbara Kłos, Izabela Chmielewska, Jan Rubin, Maria Karpińska, Marek Dohojda. 2010. „Annual observations of radon activity concentrations in dwellings of Silesian Voivodeship". *Nukleonika* 55 (3): 369-375.
- Zeeb Hajo, Ferid Shannoun (red.). 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. Geneva: World Health Organization Press.

Summary

1-hour average of indoor air Rn-222 concentrations were monitored for 356 days (from 20 May 2014 to 10 May 2015) in a single-family detached house. The house was built in 2004 and has two floors without a basement – ground floor and attic. The examined building is located in the north-western part of Łódź, in a residential area with a suburban type of land use (a high contribution of green areas, address: Kąkolowa

Street 66, $\varphi = 51^{\circ}49'11''\text{N}$, $\lambda = 19^{\circ}20'57''\text{E}$). The subsoil beneath the house dates back to the Quaternary and consists of a thin layer of sand (10–40 cm) at a depth of ca 0.4–0.7 m and sandy clays at a depth of ca. 0.7 m. The level of groundwater occurs shallowly in the investigated area – in the sand at a depth of 0.4–0.7 m and in the clay at a depth of 1.2 m.

The measurements of indoor air Rn-222 concentration were performed on the ground floor (floor area 100 m², 3 m height) using an automatic ionization chamber AlphaGUARD[®] PQ2000 PRO (active method of measurement, diffusion mode). The house was occupied by 4 people in the measurement period with the exception of 17 days (from 18 July 2014 to 3 August 2014).

Long-term hourly time series of indoor air Rn-222 concentration used in the study are unique in Poland. The data-base was also correlated with the values of indoor meteorological parameters such as air temperature and atmospheric pressure recorded by AlphaGUARD[®] PQ2000 PRO. Outdoor meteorological parameters (air temperature and rainfall) were obtained from a weather station located 3.3 km to the East of the house. The circulation types were distinguished objectively by a classification based on the circulation indices developed by Jenkinson and Collison (Piotrowski 2009).

The annual average daily value of indoor air Rn-222 concentration was 47 Bq·m⁻³ and it was similar to the general mean value for Poland – 49 Bq·m⁻³ and for Central Poland specifically – 43 Bq·m⁻³ (Biernacka *et al.* 2006). In the occupied house, the daily averages of air Rn-222 levels ranged from 8 Bq·m⁻³ (8 August 2014) to 85 Bq·m⁻³ (3 October 2014). During the period when the house was unoccupied (closed), the averages were higher and varied from 52 Bq·m⁻³ to 125 Bq·m⁻³, (July 2014). The fluctuations of hourly indoor air Rn-222 concentrations were in the range of 2–117 Bq·m⁻³ (occupied house) and 20–155 Bq·m⁻³ (closed house).

The average indoor Rn-222 levels in the summer were approximately twice as low as in the other seasons and amounted to 22 Bq·m⁻³. The maximum of the seasonal average of indoor Rn-222 levels occurred in autumn – 56 Bq·m⁻³. Autumn is also distinguished by the widest range of daily fluctuations in indoor air Rn-222 concentration. The described annual variability of indoor Rn-222 levels with a maximum in the cold season and a minimum in summer refers to the results

presented in the literature concerning houses in Northern Europe (e.g. Hubbard *et al.* 1996).

A number of authors emphasized that air temperature differences between the interior and exterior of buildings is a key environmental factor determining seasonal variability of indoor Rn-222 levels. The occupants' activity and construction of buildings should be analysis of the factors determining Rn-222 concentration in houses (e.g. Hubbard *et al.* 1996; Karpińska *et al.* 2004a, b, 2005; Rowe *et al.* 2002). This study generally confirms that an increase in indoor air Rn-222 concentration during a decrease in the outdoor air temperature (especially in autumn) excluding winter months (e.g. December 2014) were observed. A significant decrease of the external air temperature and intensification of the house heating caused extensive air movement and ventilation with influx of outdoor air with low radon concentration (outdoor air Rn-222 in Łódź: ca. 5 Bq·m⁻³). In the examined house the occupants used the fireplace as the heating system. This influenced the reduction of indoor air Rn-222 levels on very cold winter days. This effect was described for certain Swedish houses by Hubbard *et al.* (1996).

The present analysis indicated no clear relation between the variability of indoor air Rn-222 levels and air pressure. Investigation of the type air circulation (cyclonic and anticyclonic) and its effects on the daily maximum of indoor air Rn-222 in the house indicated a lack of significant difference in the distribution of the Rn-222 levels in the two analyzed groups of days.

The annual variability of rainfall corresponded to the annual fluctuation of indoor Rn-222 levels in the house. A decrease in the indoor Rn-222 levels was observed after rainy periods. The connection to the rainfall can be explained by the shallow groundwater levels (ca. 0.4–0.7 m below ground level) under the examined house. The groundwater is a factor restrictive for the exhalation of Rn-222 from the ground due to the so-called “capping effect”. The influence of rainfall on indoor Rn-222 levels in buildings in Southern Italy was documented by De Francesco *et al.* (2010).

The monitoring of temporal variations of radon gas indoors is fundamental for proper estimation of the annual dose of ionizing radiation. Further investigations based on the monitoring of continuous long-term Rn-222 air concentration in the house with reference to meteorological factors are needed to improve the predictive model of indoor air Rn-222 concentration.