

CZU: 551.583:[614.876:546.296]

[https://doi.org/10.59295/sum6\(176\)2024_21](https://doi.org/10.59295/sum6(176)2024_21)

IMPACTUL FACTORILOR FIZICI INTERNI ȘI EXTERNI ASUPRA CONCENTRAȚIILOR DE RADON INTERIOR CA PROBLEMĂ ACTUALĂ A SISTEMULUI DE SĂNĂTATE ÎN CONDIȚIILE SCHIMBĂRILOR CLIMATICE REGIONALE

*Ala OVERCENCO, Liuba COREȚCHI,
Agenția Națională pentru Sănătate Publică*

Schimbările climatice pot intensifica migrația radonului în locuințe, ridicând riscul pentru sănătatea umană. Strategiile de eficiență energetică pot contribui la acumularea radonului în interior, în special în perioadele de iarnă și vară, când casele sunt închise pentru a menține echilibrul confortului termic. Studiile din diverse regiuni ale lumii arată, că factorii meteorologici influențează concentrația de radon în interior direct sau indirect. Colectarea datelor meteorologice simultan cu măsurătorile radonului interior, cu studiul relațiilor acestora, este esențială pentru înțelegerea acestor interacțiuni și dezvoltarea de strategii de sănătate publică privind prevenirea și adaptarea la clima viitoare. Pe baza experienței internaționale a fost elaborată metodologia de evaluare a influenței factorilor meteorologici asupra riscului de expunere la radon în aspect regional.

Cuvinte-cheie: radon interior, factori meteorologici, eficiență energetică, schimbarea climei.

THE IMPACT OF INTERNAL AND EXTERNAL PHYSICAL FACTORS ON INDOOR RADON CONCENTRATIONS AS A CURRENT PROBLEM OF THE HEALTH SYSTEM IN THE CONDITIONS OF REGIONAL CLIMATE CHANGE

Climate change may intensify radon migration into homes, increasing health risks. Energy efficiency strategies may contribute to indoor radon accumulation, especially during winter and summer when homes are sealed to maintain thermal comfort balance. Studies from various regions of the world show that meteorological factors influence indoor radon concentration directly or indirectly. Collecting meteorological data simultaneously with indoor radon measurements and studying their relations is essential for understanding these interactions and developing strategies for prevention and adaptation of public health system to future climate. Based on international experience, the methodology for evaluating the influence of meteorological factors on the risk of exposure to radon in a regional aspect was developed.

Keywords: indoor radon, meteorological factors, energy efficiency, climate change.

Introducere

Oamenii sunt expuși în principal la radon în casele lor și la locul de muncă. Radonul, fiind a doua cauză de cancer bronhopulmonar după fumat, reprezintă o amenințare serioasă pentru sănătatea populației [1]. Radonul (^{222}Rn) este un produs de descompunere a radiului (^{226}Ra), care este un membru al lanțului de descompunere a uraniului (^{238}U). Proprietățile fizice și chimice ale radonului, cum ar fi natura radioactivă a lui: incoloră, inodoră și fără gust, fac dificilă detectarea acestui gaz fără echipamente speciale [2]. International Atomic Energy Agency started technical projects in order to assist countries to establish and implement national radon action. As a consequence, in recent years, in numerous countries national radon surveys were conducted and action plans established, which were not performed before. In this paper, a qualitative overview of radon surveys performed in Europe is given with a special attention to the qualitative and conceptual description of surveys, representativeness and QA/QC (quality assurance/quality control). Radonul se numără printre principalii contribuitori la radiațiile ionizante și a fost identificat ca un pericol pentru sănătatea omului. Este cea mai importantă sursă a dozei de radiație de fond (55%) primită de mediu [3]. WHO (100 Bq/m³ și se găsește în concentrații variabile de la locație la locație, și chiar de la sezon la sezon. În mediile interioare, radonul se poate acumula și atinge concentrații foarte dăunătoare din cauza produselor

de descompunere continuă a radonului. Gazul radon este a doua cauză de cancer bronhopulmonar (CBP) după fumat [1] și riscul apariției acestei maladii crește odată cu creșterea nivelului de radon în încăpere, când particulele radioactive ale gazului radon și descendenții săi ajung în plămâni, atașându-se de ei, provoacă leziuni ale ADN-ului tisular, ceea ce duce la dezvoltarea cancerului bronhopulmonar [4, 5].

În anul 2022, cancerul bronhopulmonar a fost cel mai frecvent cancer determinat la nivel mondial, cu 2,5 milioane de cazuri noi, reprezentând 12,4% din totalul cazurilor noi, și au existat aproximativ 1,8 milioane de decese prin cancer bronhopulmonar, reprezentând 18,7% din toate decesele cauzate de cancer la nivel global [6]. În anul 2022, CBP s-a clasat pe locul al doilea ca cel mai frecvent cancer din Republica Moldova, cu peste 852 de persoane bolnave în acest an, reprezentând astfel 8,4% din toate cancerelor nou diagnosticate atât la bărbați, cât și la femei [7]. Studiile epidemiologice anterioare au confirmat asocierea dintre radonul rezidențial și riscul de cancer bronhopulmonar, subliniind, că o creștere a concentrației de radon în interior cu 100 Bq/m^3 determină o creștere a riscului de cancer bronhopulmonar cu 16% [8, 9]. Pe de altă parte, unii autori au raportat, că cancerul bronhopulmonar legat de radon ar putea fi prevenit în 35-40% din cazuri dacă nivelul de radon din clădirile rezidențiale ar fi redus sub 100 Bq/m^3 [10]. Relația dintre expunerea la radon și boala pulmonară obstructivă cronică este confirmată prin creșterea ratei mortalității; hazard ratio la 100 Bq/m^3 (95% CI) 1,13 (1,05–1,21) [11].

Cele mai recente estimări ale impactului radonului asupra morbidității au adăugat la cancerul bronhopulmonar și bolile cardiovasculare. Astfel, savanții din SUA au descoperit, că la concentrații de radon mai mari de $0,15 \text{ Bq/m}^3$ există un risc mare de apariție a bolilor cardiovasculare (accident vascular cerebral, accident vascular cerebral ischemic (în special accident vascular cerebral cardioembolic, ocluzie a vaselor mici și leziuni aterosclerotice ale arterelor mari) – hazard ratio (95% CI) 1,06 (0,99–1,13) și 1,14 (1,05–1,22) [12].

În Europa, conform Directivei 2013/59/EURATOM, statele membre UE ar trebui să identifice clădirile (spații rezidențiale și de muncă), în care concentrația medie anuală de radon depășește nivelul de referință și să încurajeze o reducere a concentrațiilor de radon în aceste clădiri, precum și furnizarea de informații la nivel local și național cu privire la expunerea la radon și riscurile asociate pentru sănătate [13].

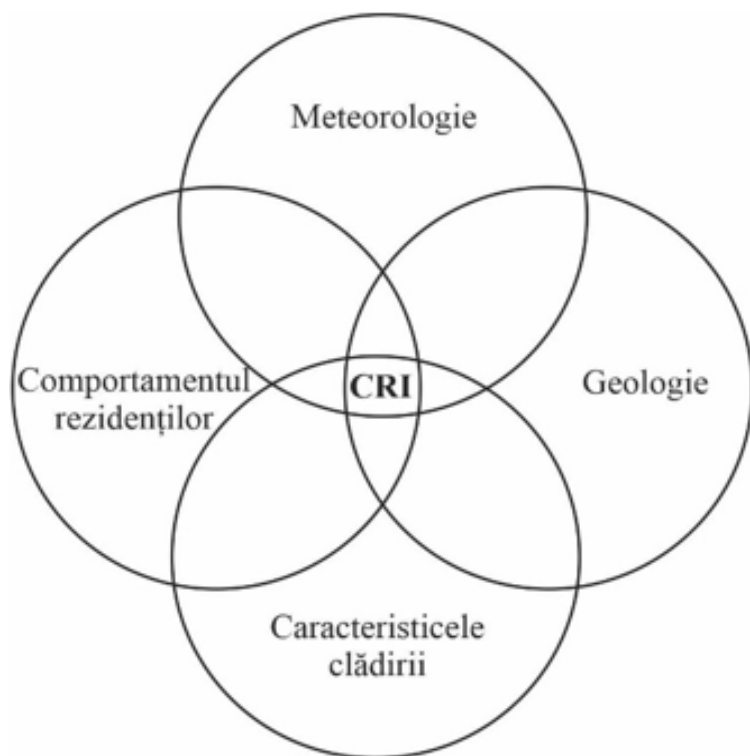
Boxa 1 (după Silva et al., 2022). Factori corelați cu concentrația de radon în interior.

Factori externi	Factori interni
Geologie și litologie	Tipul fundației
Regiune	Existența subsolului
Altitudine deasupra nivelului mării	Materiale de construcții și izolație termică
Amplasare pe un deal sau pantă	Nivel/etaj (distanța de la sol)
Diferența de presiune a aerului	Sisteme de ventilație
Temperatura exterioară	Sisteme de încălzire
Umiditatea atmosferică	Modernizare termică
Direcția vântului	Umiditatea relativă interioară

În condiții normale de mediu, precum cele care există la suprafața pământului, exhalarea radonului din sol are loc sub formă de gaz, prezentând în mediile exterioare concentrații scăzute de aproximativ 10 Bq/m^3 cu impact redus cunoscut asupra sănătății umane [14] outdoor concentrations exceed the national average indoor radon concentration. The general spatial patterns of outdoor radon and indoor radon are similar to the spatial distribution of radon progeny in the soil. Outdoor radon exposure in this region can be a substantial fraction of an individual's total radon exposure and is highly variable across the population. Estimated lifetime effective dose equivalents for the women participants in a radon-related lung cancer study varied by a factor of two at the median dose, 8 mSv, and ranged up to 60 mSv (6 rem). Cu toate acestea, acumularea de gaz radon în mediile interioare ale clădirilor de înaltă performanță energetică, adesea prost ventilate, reprezintă o problemă de sănătate publică cunoscută, raportată pe larg de Organizația Mondială a Sănătății (OMS) [1]. Cercetători din Portugalia au sintetizat rezultatele a numeroase studii privind influența diferitor

factori asupra concentrațiilor de radon rezidențial și au construit un model de diagnostic pentru evaluarea potențialului radonului în clădiri [15]. Pre-evaluation selection of the variables that play a leading role in influencing expected results must be insightfully assessed, by stimulating compatibility between Indoor Air Quality (IAQ). Cercetările efectuate au găsit o corelație între concentrația de radon în interior și mai mulți factori, care pot fi externi sau interni (Boxa 1) și ar avea influență liniară [16]. Factorii externi sunt legați de localizarea clădirii și de condițiile climatice: geologie și litologie, regiune, altitudine deasupra nivelului mării, amplasarea pe un deal sau în pantă, diferența de presiune a aerului, temperatura exterioară și umiditatea atmosferică totală. Factorii interni sunt alcătuiți din tipul fundației, existența unui subsol, materialele de construcție și eficiența energetică a clădirii, etajul (distanța de la sol), sistemul de ventilație, dispozitivele de încălzire și sistemele energetice, reabilitarea energetică anterioară și interior, umiditatea relativă (Figura 1).

Figura 1. Concentrația radonului interior (CRI) este influențată direct de geologia locală, comportamentul rezidenților, caracteristicile clădirii și meteorologie (după Rey et al., 2022).



Pe baza influenței stabilite a factorilor meteorologici asupra concentrațiilor de radon, schimbările climatice pot afecta și modificările radonului din interiorul clădirilor și, prin urmare, pot prezenta riscuri pentru sănătatea publică, extinzând astfel lista pericolelor asociate schimbărilor climatice [17].

Unul dintre aceste riscuri potențiale este eliberarea de cantități uriașe de gaz radon (^{222}Rn) din cauza topirii permafrostului în țările cu climă polară, cu creșterea temperaturilor aerului din exterior. Cantități enorme de uraniu sunt stocate în concentrații mari în subteran în toată Arctica. Gazul radon, ca unul din sursele radiațiilor ionizante naturale, este produs prin degradarea uraniului și a radiului și se găsește în majoritatea solurilor și rocilor. În mod normal, radonul se găsește în sol sub straturile de pământ și zăpadă deasupra lui. Cu toate acestea, pe măsură ce permafrostul se topește într-un climat în schimbare, acest gaz se scurge din pământ și pătrunde în clădiri, provocând expunere pe termen lung în absența remedierii de radon [18].

Dar există și un risc neevident (actual pentru toată lumea, inclusiv Republica Moldova) – creșterea potențială a concentrației radonului interior, cauzată de etanșarea caselor pentru eficacitatea energiei în sezoane cu temperaturi foarte înalte și foarte joase, și cu ventilație scăzută [19, 20]. În țările cu venituri mari clădirile prezintă o mare parte a consumului de energie și a emisiilor de gaze cu efect de seră. Oamenii din țările dezvoltate petrec de obicei peste 90% din timp în interior. În plus, persoanele vulnerabile din Europa (bătrâni, copii mici și persoane cu sănătate compromisă) pot petrece în proporție și mai mare (până la 100% din timp) acasă [21]. Prin urmare, politicile de atenuare și adaptare la schimbările climatice în sectorul intern pot juca un rol cheie în atingerea obiectivului de eficacitate energetică [22]. La rândul său, ținând cont de proiecțiile climatice, temperatura și umiditatea aerului din exterior se vor schimba [17, 23], ceea ce ar putea duce cel mai probabil și la schimbarea influenței radonului asupra sănătății populației prin influența indirectă.

Radonul pătrunde în clădiri prin sol permeabil la gaze, iar de acolo în subsoluri, tavane și pivnițe prin fisuri, găuri, instalații sanitare și rezervoare de decantare din clădiri [24]. Această migrare a radonului este facilitată de diferența de presiune a aerului dintre subsol și solul din jur, având ca rezultat intrarea radonului

în clădire. Prezența radonului poate fi detectată doar prin testarea acestuia, deoarece ^{222}Rn este invizibil, inodor și fără gust. Concentrațiile de radon variază de la sezon la sezon, de la o zi la alta și chiar de la oră la oră, ceea ce face necesară efectuarea de măsurători regulate pe o perioadă mai mult de trei luni pentru a estima concentrațiile medii anuale. OMS propune o limită de 100 Bq/m^3 pentru a minimiza pericolele pentru sănătate cauzate de expunerea la radon în interior, dar pentru acele țări cărora le este greu să mențină nivelurile sub acest nivel, se propune o limită de compromis de 300 Bq/m^3 (nivel național de referință pentru radon în Republica Moldova) [25, 26].

În baza celor menționate mai sus și, luând în considerare că estimările globale și regionale confirmă schimbările climatice iminente în regiunea de Est a Europei [27], în Republica Moldova mortalitatea prin cancer bronhopulmonar este a doua cauză de deces prin tumori maligne [28], iar radonul rezidențial prezintă un factor de risc sporit pentru sănătatea populației [29], scopul acestui articol este de a studia și sintetiza experiența internațională în elaborarea și utilizarea metodelor de estimare a impactului parametrilor meteorologici asupra concentrației radonului interior în condiții schimbărilor climatice regionale, ca potențial risc în declanșarea cancerului bronhopulmonar, în vederea elaborării unor abordări adecvate pentru studierea acestui fenomen în Republica Moldova, servind ca bază pentru luarea deciziilor în dezvoltarea măsurilor preventive de sănătate publică și reducerea incidenței cancerului bronhopulmonar în rândul populației în condiții climatice noi.

Material și metode

Studiul experienței internaționale privind impactul factorilor fizici interni și externi asupra concentrațiilor de radon rezidențial în condițiile schimbărilor climatice a fost efectuat utilizând rezultatele științifice a circa 60 de publicații din ultimii 10 ani, pe platforme cunoscute de specialitate – Web of Science (WoS), China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Google Scholar (GS), ResearchGate, Pubmed, Bio-MedCentral, RSCI, OMS, AIEA etc. Selectarea literaturii de specialitate, folosind cuvintele-cheie în limba engleză „radon”, „meteorological factors”, „climate change”, „human health” a relevat un număr limitat de publicații științifice, care descriu metodologia și rezultatele evaluării impactului schimbărilor climatice asupra concentrațiilor de radon și indirect asupra sănătății umane. În baza materialului studiat au fost sintetizate abordările actuale ale dezvoltării și implementării metodelor de cercetare pentru elucidarea impactului acestui fenomen în Elveția, Marea Britanie, alte țări europene și asiatice. Toate publicațiile relevante temei de cercetare au fost păstrate în baza specifică de surse bibliografice *Mendeley Elsevier Ltd.* pentru analiza ulterioară. Au fost utilizate metode descriptive, analitice și de sinteză pentru a dezvolta o metodologie regională de cercetare în cadrul capacităților existente.

Rezultate și discuții

Baza de dovezi acumulată de comunitatea științifică până în prezent cu privire la impactul schimbărilor globale și regionale asupra diverselor sisteme și utilizarea unor modele mai cuprinzătoare de proiecții climatice, permite de a identifica riscurile mediate noi pentru sănătatea publică ca provocări noi pentru societate. Analiza publicațiilor științifice selectate a făcut posibilă sistematizarea principalelor direcții ale cercetării contemporane în acest domeniu – (1) emisii masive de radon din cauza topirii (dezghețării) permafrostului în condițiile climatului de încălzire, (2) etanșeitatea caselor/clădirilor pentru creșterea eficienței energetice pentru atenuarea schimbărilor climatice, precum și (3) dependența fluctuațiilor concentrației de radon în spațiile rezidențiale de factorii fizici interni și externi (factori meteorologici).

Topirea permafrostului și radonul

Riscul potențial de expunere la radon în regiunile polare din emisfera nordică crește din cauza impactului degradării permafrostului asupra concentrației/migrației radonului în aceste regiuni indusă de încălzirea climei [30] radon has been considered as the second leading cause of lung cancer after smoking. The potential risk of radon exposure in cold regions of Northern Hemisphere is increasing due to climate-induced permafrost degradation. In this paper, we took permafrost regions in the Northern Hemisphere as our study area. We performed an extensive literature review on the Web of Science (WoS). Dacă temperaturile arctice

continuă să crească în ritmul actual, se estimează că zona de permafrost s-ar reduce în cele din urmă cu peste 40% la sfârșitul secolului [31]. Profesorul Paul Glover de la Universitatea din Leeds și coaut. [18] sugerează că permafrostul acționat istoric ca o barieră de protecție, împiedicând radonul să ajungă la suprafață și să intre în clădiri. Ei arată, că în clădirile cu subsoluri, prezența gazului radon poate crește până la peste 100 de ori valoarea sa inițială timp de până la șapte ani, în funcție de adâncimea permafrostului și de cât de repede se dezgheață el. Acest lucru demonstrează importanța nu numai de a menține intact stratul de permafrost prin limitarea încălzirii globale la o anumită valoare, dar are și implicații semnificative pentru asigurarea sănătății, ajustarea codurilor de construcție și sfaturile privind ventilația. În cazul unui dezgheț de permafrost de 40% emisiile de radon pot crește nivelurile de radioactivitate la peste 200 Bq/m³ pentru mai mult de patru ani în casele cu subsoluri la sau sub nivelul solului (Boxa 2). Topirea permafrostului cauzată de schimbările climatice va crește nivelul de radon din atmosferă, cu consecințe grave pentru sănătatea oamenilor și a animalelor din regiune. Aproximativ 3,3 milioane de oameni trăiesc pe permafrost, care s-ar putea topi complet până în a. 2050. O mare parte de populație din această regiune trăiește în zone predispuse la radon (Canada, Alaska, Groenlanda și Rusia), așa că atunci, când cantități mari de radon vor fi eliberate la dezghețarea permafrostului, acești oameni vor fi expuși unui risc crescut pentru efectele radonului asupra sănătății [32].

Boxa 2. (după Glover et al., 2022). Topirea permafrostului și radonul.

•	Permafrostul acționează ca o barieră de radon, reducând radiația la o zecime din nivelul de fundal și crescând-o în spatele barierei.
•	Dezghețarea instantaneeă dă penaje >200 Bq/m ³ timp de peste 5 ani în clădirile cu subsol, dar fără creștere în clădirile susținute pe piloni.
•	Penaje de radiații de peste 200 Bq/m ³ timp de până la 4 ani apar și atunci, când se modelează o dezghețare mai lentă, care are ca rezultat dezghețare de 40% în mai puțin de 15 ani.

Case „sigilate” pentru eficiența energetică și radon în condițiile schimbărilor climatice.

Eficiența energetică este o condiție importantă pentru tranziția societății către o dezvoltare durabilă din punct de vedere al mediului. Eficiența energetică este una dintre direcțiile politicilor globale și regionale de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră, ca principală cauză a schimbărilor climatice, iar asigurarea, că casele sunt bine izolate și etanșate la aer, este o parte esențială a acestui lucru [33]. Eficiența energetică se face pentru a se asigura, că cantitatea minimă de energie este utilizată pentru încălzirea sau răcirea caselor, menținând în același timp confortul rezidenților. Introducerea tehnologiilor moderne, care reduc pierderile de căldură, este însoțită de o scădere a ratei de schimb a aerului, ceea ce duce la o deteriorare a calității aerului din interior, în special la acumularea radonului [34, 35]. Radonul, care este omniprezent în aer și adesea concentrat în interiorul clădirilor, poate deveni mai concentrat în clădiri mai bine etanșate [20]. Majoritatea clădirilor moderne din latitudinile moderate și nordice ale țărilor dezvoltate sunt relativ etanșate, și, odată cu schimbările de îmbunătățire a eficienței energetice, este probabil să devină din ce în ce mai multe. Cu toate acestea, dacă nu sunt proiectate cu atenție, aceste intenții spre clădiri mai eficiente energetic ar putea fi în detrimentul calității aerului din interior, inclusiv concentrații mărite de radon [22]. Rezultatele unui studiu de modelare a efectelor ale intervențiilor de eficiență energetică la domiciliu în Anglia au arătat, că au fost confirmate modificările ale anilor de viață ajustați la calitate (QALY) pe parcursul a 50 de ani la bolile cardio-respiratorii, cancer bronhopulmonar, astm și tulburări mentale din cauza modificărilor poluanților din aerul din interior, inclusiv fumatul pasiv de tutun, PM_{2,5} din surse interioare și exterioare, radon, mucegaiul și temperaturile interioare de iarnă [36]. Literatura internațională oferă exemple de creștere a activității volumetrică a radonului de mai multe ori după reconstrucția unei clădiri; activitatea volumetrică medie a radonului în clădirile modernizate a crescut cu 22–120%. În Republica Cehă a fost efectuată o comparație a rezultatelor măsurătorilor activității volumetrică (AV) a radonului în anumite clădiri înainte și după reconstrucție cu eficiență energetică crescută [37]. Ținând cont de potențialul mare de radon genic al majorității teritoriului acestei țări, se acordă o atenție considerabilă problemei protejării

populației de radon și se efectuează un număr mare de măsurători. În clădirile reconstruite din punct de vedere al eficienței energetice s-au efectuat măsurători repetate la intervale de aproximativ 20 de ani și s-a depistat o creștere semnificativă a activității volumetrică a radonului (creștere de 2-5 ori). De asemenea, s-a observat o creștere a activității volumetrică a radonului în casele reconstruite din Franța, Elveția și Germania [34]. La rândul său, creșterea cerințelor față de economisirea energiei în clădirile noi construite este una dintre principalele prevederi ale strategiilor de eficiență energetică din diferite țări. Uniunea Europeană a adoptat Directiva privind performanța energetică a clădirilor UE/2010/31, care se obligă până în a. 2050 trecerea la construcția clădirilor cu energie zero (*near zero energy buildings*) în țările europene [38]. În literatura științifică și tehnică internațională există mai puține publicații ale rezultatelor studierii acumulării de radon în casele noi proiectate și construite ținând cont de cerințele de economisire a energiei, decât în clădirile reconstruite. Activitatea volumetrică medie a radonului în toate clădirile noi eficiente din punct de vedere energetic, care nu sunt echipate cu ventilație mecanică, este mai mare decât în clădirile cu o clasă de eficiență energetică redusă din diferite țări [34]. În România, într-o regiune cu potențial geogenic ridicat de radon, măsurătorile au fost efectuate în casele cu un singur etaj, construite conform cerințelor de eficiență energetică în vigoare din anul 2000. S-a constatat, că în clădirile noi concentrația de radon este cu 27% mai mare decât în casele tradiționale [39].

Astfel, în casele noi construite cu respectarea cerințelor de economisire a energiei, în absența alimentării mecanice și a ventilației prin evacuare, se constată o creștere semnificativă a activității volumetrică a radonului față de casele cu o clasă de eficiență energetică scăzută și cu permeabilitate ridicată a anvelopei clădirii (Boxa 3). Fără îndoială, sunt necesare clădiri mai bine sigilate, eficiente din punct de vedere energetic, ca strategie de atenuare a schimbărilor climatice, dar trebuie să existe o mai mare conștientizare a problemei potențiale a creșterii concentrațiilor de radon, astfel încât clădirile să fie, de asemenea, proiectate și construite pentru a aborda această problemă.

Boxa 3. (după Yarmoshenko et al., 2021). Radon în case „sigilate”.

•	În case reconstruite activitatea volumetrică (AV) a radonului a crescut cu 22-120%.
•	În case noi construite concentrația radonului depinde de respectarea cerințelor de construcție privind sistemele de ventilație:
	<ul style="list-style-type: none"> - fără ventilația mecanică AV a radonului crește semnificativ în comparație cu casele de clasa de eficiență energetică scăzută și cu permeabilitatea mare a anvelopei clădirii; - utilizarea tehnologiilor de construcție eficiente din punct de vedere energetic a dus la o creștere de 3 ori a AV a radonului în aerul spațiilor rezidențiale din clădirile noi cu mai multe etaje (scăderea calității schimbului de aer într-un mod de funcționare pasiv necontrolat); - utilizarea ventilației mecanice de alimentare și evacuare în casele unifamiliale noi reduce AV a radonului

Dependența radonului rezidențial de factorii meteorologici

Un anumit număr de studii privind efectele factorilor externi și interni asupra variabilității concentrațiilor de radon au fost efectuate fie experimental, fie studii de caz la nivel local, pe o perioadă limitată de timp. Conexiunile stabilite prin diverse metode (atât de măsurare, cât și de analiză) confirmă această influență, determinând specialiști din diferite domenii ale științei (geologie, meteorologie, radiologie, sănătate publică, construcții) să evalueze în complex acești factori pentru a reduce riscurile pentru sănătatea umană.

Studiul din Elveția asupra influenței diferitor parametri meteorologici asupra nivelurilor de radon din interior a fost efectuat pe termen scurt, folosind metodologia statistică, cum ar fi corelații, autocorelații, cross-corelații și regresii liniare multiple între parametrii meteorologici și nivelurile de radon din interior [40]. S-a demonstrat influența puternică a condițiilor meteo asupra nivelului interior de radon în spațiile ocupate, dar mai ales neocupate. Temperatura aerului exterior, urmată de presiunea atmosferică, au fost identificați ca fiind cei mai semnificativi parametri care influențează nivelurile de radon din interior. În plus, condițiile meteorologice, monitorizate cu cinci zile înainte de începerea măsurătorilor radonului, ar putea

afecta nivelurile de radon. Concluzia reiese, că este de o importanță mare să se țină cont de aceste condiții meteorologice atunci, când se analizează rezultatele măsurătorilor pe termen scurt și, mai concret, să se ia în considerare evoluția condițiilor meteorologice cu cinci zile înainte de măsurarea radonului. La rândul său, pe baza măsurătorilor radonului pe termen lung, continuu și conform orarelor, distribuțiile radonului clasificate în funcție de diferite definiții ale evenimentelor meteorologice au fost investigate și apoi comparate de la trei locuri diferite de studiu din Elveția de Vest [41]. Temperatura exterioară influențează cel mai mult radonul din interior și este anti-corelată la nivel general. Vântul influențează radonul din interior, dar depinde foarte mult de intensitatea, direcția lui și de caracteristicile clădirii. Precipitațiile influențează periodic nivelurile de radon din interior în dependență de intensitatea acestora. Presiunea atmosferică și umiditatea relativă nu par a fi factori determinanți majori asupra concentrației de radon în interior.

Parametrii meteorologici sunt factori importanți, care pot afecta schimbările sezoniere ale concentrațiilor de radon în mediile interioare [42]. În climatele nordice și temperate, concentrațiile de radon au fost raportate a fi cele mai mari în timpul iernii și cele mai scăzute în timpul verii, determinând astfel o sezonalitate a concentrației de radon, pentru care se calculează un factor de ajustare sezonieră a radonului rezidențial pentru o anumită regiune [16, 43–50] humidity, pressure, precipitation, indoor dew point, wind direction, wind speed and heat index. Cauzele pentru concentrația ridicată de radon în timpul sezonului rece sunt, că ferestrele sunt adesea închise și sigilate pentru a minimiza pierderile de căldură în timpul încălzirii, și nivelurile ridicate de gaz radon sunt generate în mediul interior, deoarece presiunea este mai mică decât cea din exterior. De asemenea, concentrația de radon în interior este mărită iarna, când se folosesc, în principal, dispozitivele de încălzire. Se crede, că cu cât radonul este etanșat mai mult în mediul interior, cu atât este mai dificil să se dilueze cu aerul curat (aer în atmosferă), afectând astfel concentrația de radon.

Rezultatele măsurătorilor în funcție de sezon ale concentrației de radon și ale ratelor de ventilație în blocurile înalte de apartamente din România relevă influența ventilației asupra nivelului interior de radon în diferite anotimpuri [51]. S-a stabilit, că concentrațiile de radon în interior au variat între 70 și 168 Bq/m³ iarna și 17-30 Bq/m³ vara, fiind mai mari decât concentrațiile respective în exterior de 2-5 ori iarna și de 1-4 ori vara. Ratele de ventilație au variat în funcție de sezon și au fost influențate de condițiile meteorologice la momentul măsurătorilor. Constatările indică faptul că nivelurile de concentrație de radon în interior depind de ratele de ventilație ale unității, dar și de materialele de construcție, viteza vântului în jurul clădirii, ora din zi (mai mare în jurul amiezii) și sezonul anului (mai mare în sezonul rece, când rata de ventilație este mai mare). În Grecia, estimarea concentrațiilor de radon în interior și variația sezonieră a acestuia a fost efectuată în 25 de locuințe din Atena, timp de trei sezoane (primăvară, vară, iarnă), a câte trei luni fiecare [45]. Folosind detectoarele CR-39, rezultatele au evidențiat o variație sezonieră a radonului după modelul: o concentrație mai mare iarna (137,5 Bq/m³) decât vara (96,10 Bq/m³).

În București, România, au fost studiate influențele aerosolilor urbane și ale radonului ²²²Rn împreună cu variabilitatea parametrilor climatici la scară locală și regională în relație cu incidența și mortalitatea pandemiei de COVID-19 [52]. O analiză spațio-temporală a PM10 și PM2,5 zilnice în relație cu concentrațiile zilnice de radon și parametrii meteorologici a evidențiat rolul condițiilor de stagnare anticiclonică sinoptică în timpul fiecărui val COVID-19 pentru răspândirea virusului SARS-CoV-2. Aceste rezultate contribuie la o mai bună înțelegere a factorilor de decizie locali și a epidemiologilor privind luarea în considerare a caracteristicilor specifice ale diferitelor sectoare urbane pentru îmbunătățirea calității aerului.

Efectul temperaturii aerului asupra fluxului de radon subteran a fost confirmat experimental, folosind un sistem special de laborator climatic controlat, care a putut izola efectul modificărilor temperaturii ambientale asupra transportului subteran de radon [53]. În general, modificările concentrației de radon în condițiile experimentale s-au ridicat până la 30%. Modificările coeficientului de difuzie moleculară în intervalul experimental de temperatură au fost de ~7%, difuzia termică fiind un posibil mecanism suplimentar, care facilitează transportul radonului determinat de temperatură. S-a stabilit, că schimbările ciclice ale temperaturii mediului în experimente în condiții forțate se corelează direct cu fluctuațiile radonului subteran. Repetabilitate similară a temperaturii ambientale și a concentrațiilor de radon a fost găsită în ciclurile de încălzire-răcire cu frecvență joasă (4-8 zile). Această corelație bună a fost pierdută la frecvențe mai mari (2 zile sau mai mult) din cauza răspunsului asimetric al radonului la încălzirea și răcirea atmosferei.

Astfel, din cauza influenței diferitor factori meteorologici asupra concentrațiilor radonului interior, este foarte important ca profesioniștii să efectueze sau să obțină măsurători ale temperaturii, vântului și precipitațiilor simultan, la fel ca pentru radonul de interior (Boxa 4). Mai mult, o bună cunoaștere a caracteristicilor clădirii va îmbunătăți acuratețea diagnosticului.

Boxa 4. Radonul și factorii meteorologici.

•	Parametrii meteorologici sunt factori importanți, care pot afecta schimbările sezoniere ale concentrațiilor de radon în mediile interioare.
•	Temperaturile extrem de înalte și joase: temperaturile guvernează ritmul vieții noastre (perioada de încălzire, ventilație), care induc variații mari ale concentrației radonului interior atât în spațiile ocupate, cât și în cele neocupate.
•	Furtuni și ploi abundente: aceste evenimente induc o etanșeitate la apa subterană, inhibând exhalarea radonului.
•	Vântul: atât viteza, cât și direcția vântului pot afecta concentrația radonului interior din cauza câmpului de presiune indus din jurul clădirii.

Elaborarea metodologiei pentru studierea riscului expunerii la radon în contextul schimbărilor climatice regionale

Potrivit proiecțiilor climatice, temperatura și umiditatea aerului se vor schimba, ceea ce ar putea duce cel mai probabil și la schimbarea impactului radonului asupra sănătății, pentru că parametrii meteo afectează concentrația de radon atât în interior, cât și în exterior. Dintre varietatea de factori fizici externi și interni, care influențează direct, indirect sau în combinație asupra concentrației de radon în interior, factorii meteorologici sunt cei mai sensibili la efectele schimbărilor climatice proiectate. Una din dovezi ale schimbărilor climatice, legate cu temperatura aerului exterior, este creșterea evenimentelor meteorologice extreme, cum ar fi înghețurile și valurile de căldură, cu severitatea lor în creștere [54]. În perioadele de iarnă și vară, casele sunt „sigilate” pentru eficiență energetică și pentru a preveni pătrunderea aerului foarte rece sau foarte cald din exterior, reducând semnificativ ventilația aerului din cauza riscului de a perturba echilibrul temperaturii din interiorul încăperii. Acest lucru contribuie la acumularea radonului în interior și, cu expunerea prelungită la plămâni în procesul respirației, crește riscul de a provoca cancer bronhopulmonar.

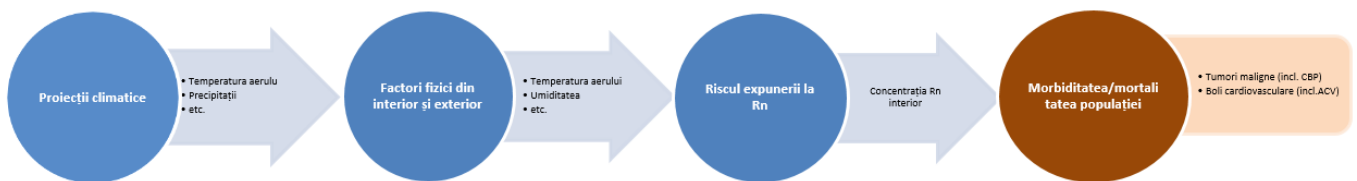
În Spania a fost efectuat un studiu al concentrației de radon în raport cu parametrii meteorologici locali și pentru a determina comportamentul acestuia în timpul valurilor de căldură [55]. Măsurătorile anuale, sezoniere și zilnice ale radonului și ale parametrilor meteorologici au fost executate în timpul a două valuri de căldură în nordul Spaniei, în regiunea cu orografie complexă și mare variabilitate temporală și spațială a condițiilor meteorologice. Conform rezultatelor obținute radonul prezintă evoluții temporale diferite și nu este posibil să se identifice un model general al concentrației radonului în cazul apariției valurilor de căldură, din cauza rolului direcției vântului în concentrațiile ^{222}Rn . Această analiză a demonstrat influența cheie a vântului de suprafață și, în special, a brizei asupra evoluției temporale a concentrațiilor de radon.

În contextul regional, în Republica Moldova la fel problema radonului rezidențial în legătură cu factorii interni și externi poate fi legată cu fluctuațiile condițiilor exterioare meteorologice în dependență de sezon fie prin modul de păstrare a echilibrului termic în clădiri (iarna – case „sigilate” de frig, vara – case „sigilate” din cauza caniculei), fie prin influența directă a parametrilor meteorologici asupra concentrațiilor radonului. În contextul schimbărilor climatice ca una dintre provocările globale, aceste relații pot fi, de asemenea, supuse schimbărilor, de aceea este deosebit de important să se elaboreze metode de evaluare a dependenței concentrației de radon rezidențial de factorii de mediu externi și interni la momentul actual, și legarea acestor dependențe cu proiecțiile schimbărilor climatice regionale. Dezvoltarea unor astfel de metode ar trebui să se bazeze pe utilizarea experienței internaționale, deși încă limitate în astfel de studii, pe disponibilitatea și compatibilitatea datelor regionale (măsurătorile concentrațiilor de radon, condiții meteorologice, proiecții climatice, indicatori de sănătate), precum și pe utilizarea instrumentelor analitice bazate

pe metode statistice de evaluare adoptate în cercetări biomedicale și de mediu. Studiul relațiilor condițiilor externe meteo cu concentrația radonului rezidențial pe baza datelor existente și folosirea proiecțiilor regionale ale schimbărilor climatice pentru construirea modelelor pronosticate al impactului viitor, este necesar în scopul elaborării măsurilor de prevenire și adaptare a sistemului de sănătate publică la provocările climatice regionale.

Luând în considerare cele de mai sus și conectând caracteristicile efectelor directe și indirecte ale factorilor de risc externi și interni asupra concentrațiilor de radon într-un climat în schimbare, este posibil să se identifice un lanț de influențe ale acestora asupra rezultatului final – sănătatea umană (Figura 2).

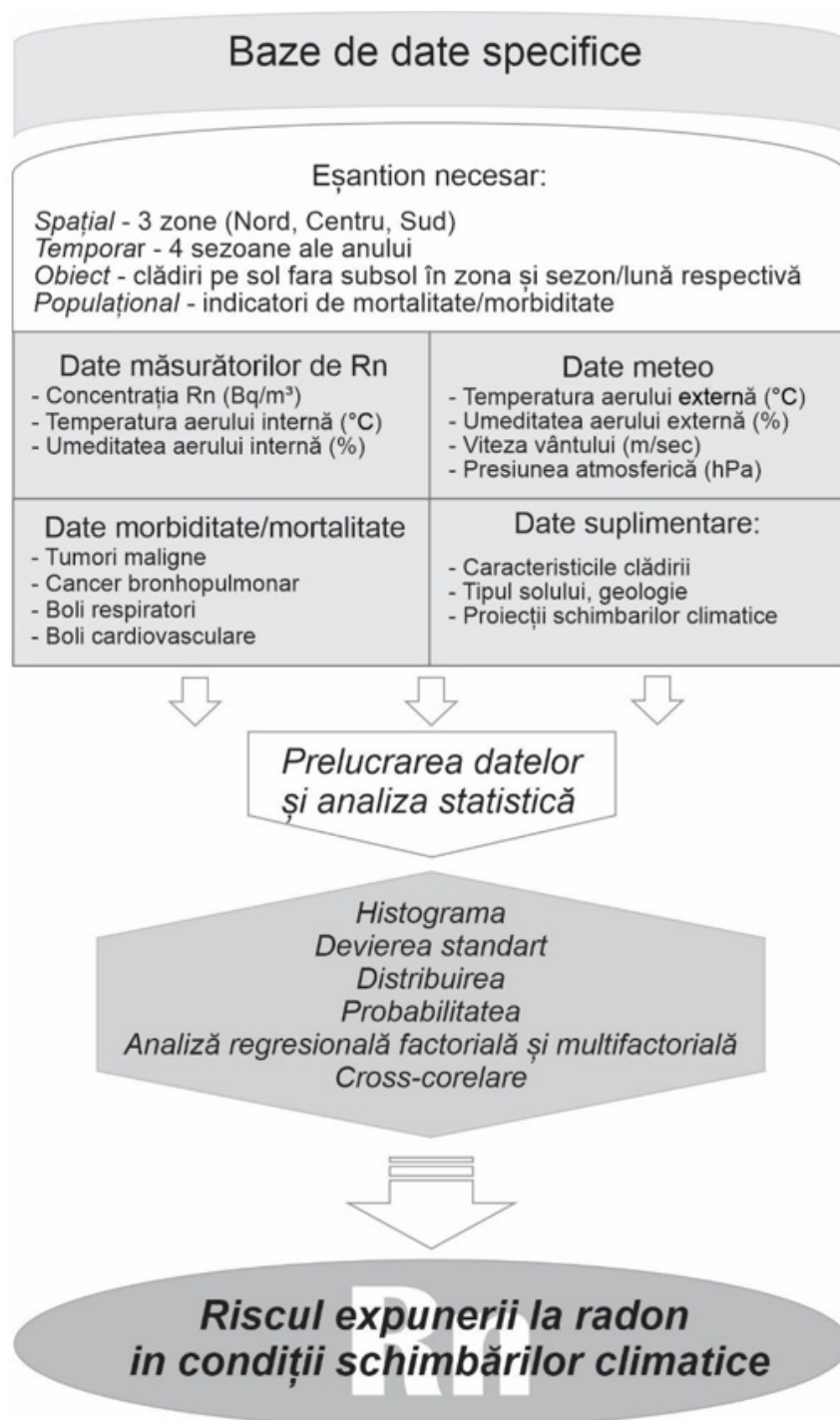
Figura 2. Lanțul de influență al schimbărilor climatice asupra expunerii sănătății umane la radon rezidențial.



Pentru a evalua cantitativ și calitativ un astfel de impact în lanț al schimbărilor climatice la nivel regional, este nevoie de aceeași metodologie de cercetare „în lanț”. În figura 3 este prezentată schema metodologiei de evaluare a relației dintre factorii meteorologici, radon și riscul de cancer bronhopulmonar într-un climat în schimbare. Inițial este necesar de a crea bazele de date (existente și accesibile) pentru formarea eșantionului necesar pentru studiu. Deoarece proiecțiile climatice în sine sunt limitate la scara țării și a zonelor agroecologice (Nord, Centru și Sud) din cauza dimensiunii mici a țării și a particularităților modelării climatice [27], formarea unui set (eșantion) de date necesare pentru studiu implică crearea bazelor de date, obținute din surse diferite, cu specificații diferite, dar unite prin caracteristici temporale și spațiale. Setul bazelor de date pentru studiu trebuie să fie completat cu date privind caracteristicile clădirii colectate în timpul măsurătorii de radon în interior; privind tipul de sol și geologie (roci subiacente) a teritoriului din cauza pătrunderii subterane a radonului natural în clădiri; și, de asemenea, în etapa finală a studiului, sunt necesare date din proiecțiile climatice regionale pentru trei orizonturi de timp (2010-2039, 2040-2069 și 2070-2099). Prelucrarea datelor primare este necesară pentru conversie (comasare) și standardizare a datelor, precum și corectare a incertitudinii în valorile factorilor eterogene de studiu.

Statisticile descriptive, inclusiv histogramme de frecvență, abateri standard, estimări de distribuție, probabilitate, erori etc. vor permite identificarea caracteristicilor seriilor de date pentru analiza ulterioară a impactului și riscurilor. Analiza unică și multifactorială ajută la identificarea contribuției unuia sau mai multor factori la fenomenul studiat și, prin urmare, la determinarea gradului de variabilitate a fenomenului în funcție de modificările factorilor. Aici este necesar să se evalueze influența factorilor de mediu externi și interni asupra concentrațiilor de radon, influența concentrațiilor de radon asupra indicatorilor de sănătate publică, precum și influența schimbărilor climatice asupra fluctuației radonului rezidențial și, în consecință, asupra riscului pentru sănătate umană. În plus, este important să se studieze relațiile potențiale dintre concentrațiile interne de radon și condițiile meteorologice specifice în funcție de sezon, cum ar fi zilele geroase (temperatura minimă zilnică a aerului sub 0°C), zilele de vară (temperatura maximă zilnică a aerului atinge 25°C), sau zilele caniculare (temperatura maximă zilnică a aerului atinge 30°C). Deoarece schimbările ciclice ale temperaturii ambientale s-au dovedit a fi corelate direct cu fluctuațiile radonului subteran în experimentele de expunere [53], evaluările regionale/locale ale acestor expuneri ar trebui să includă Cross-corelare (răspunsul *lag*) – o funcție care descrie măsura similitudinii dintre două serii de date în funcție de cantitatea de părtinire a unei serii în raport cu cealaltă. Cuantificarea influenței factorilor externi asupra concentrației de radon intern, exprimată în parametri statistici ai ecuațiilor, va servi ca bază pentru o analiză predictivă a concentrației radonului în funcție de modificările valorilor factorilor meteorologici pe baza proiecțiilor climatice regionale.

Figura 3. Schema metodologiei de estimare a relațiilor factori interni/externi-radon-sănătate în contextul schimbărilor climatice.



Astfel, algoritmul propus pentru evaluarea influenței factorilor externi și interni asupra riscului de expunere la radon într-un climat în schimbare include instrumentele metodologice necesare, inclusiv un studiu pas cu pas de la crearea și combinarea bazelor de date până la analiza riscului și evaluări predictive.

Concluzii

1. În timp ce strategiile de eficiență energetică sunt esențiale pentru combaterea schimbărilor climatice, ele pot contribui și la creșterea concentrațiilor de radon în interiorul clădirilor. Acest lucru este accentuat de tendința de construire a clădirilor mai etanșe pentru a economisi energie, ceea ce necesită o atenție sporită asupra ventilației și controlului radonului.

2. În lumina schimbărilor climatice, societatea se confruntă cu dilema creșterii expunerii la radon ca urmare a eforturilor pentru eficiența energetică. În lipsa unor practici adecvate de control și reducere a expunerii la radon, potențialul de creștere a cancerului bronhopulmonar asociat radonului poate deveni o problemă majoră.

3. Concentrațiile ridicate de radon în interior sunt influențate de factorii meteorologici și este crucial să se colecteze datele meteorologice simultan cu măsurătorile radonului pentru o înțelegere mai profundă a acestor interacțiuni. În contextul schimbărilor climatice, se anticipează modificările temperaturii și umidității aerului, care pot afecta concentrațiile de radon și, implicit, impactul său asupra sănătății umane.

4. Elaborată pe baza experienței internaționale, metodologia de evaluare a influenței factorilor externi meteorologici asupra riscului de expunere la radon în aspect regional este un algoritm de acțiuni bine structurat și argumentat, cu instrumente de cercetare adaptate capacităților și disponibilității de date pentru acest studiu specific.

Aceste concluzii subliniază importanța înțelegerii interacțiunii dintre factorii meteorologici și concentrațiile de radon în interior, și evidențiază necesitatea luării în considerare a acestor aspecte în contextul schimbărilor climatice, pentru protejarea sănătății publice și dezvoltarea strategiilor adecvate de prevenire și adaptare la climatul viitor.

Referințe:

1. ZEEB, H., SHANNOUN, F. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*, 2009, 94 p. ISBN 978-92-4-154767-3
2. PANTELIĆ, G., ČELIKOVIĆ, I., ŽIVANOVIĆ, M., et al. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. In: *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, Vol. 204, p.163–174. DOI:10.1016/j.jenvrad.2019.04.010.
3. RAVIKUMAR, P., SOMASHEKAR, R. K. *Estimates of the dose of radon and its progeny inhaled inside buildings*. In: *EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 2013, Vol. 3, Issue 2, p. 88–95. DOI: 10.14712/23361964.2015.10.
4. IARC. *Codul European împotriva cancerului*. 2016. <https://cancer-code-europe.iarc.fr/index.php/ro/12-modalitati/radiatii>. Accessed February 18, 2021.
5. TIRMARCHE, M., HARRISON, J. D., LAURIER, D., et al. *ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon*. In: *Annals of the ICRP*, 2010, Vol. 40, Issue 1, pp.1–64. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.08.011.
6. IARC-WHO. *GLOBOCAN - Global Cancer Observatory*, 2024. <https://gco.iarc.fr/en>. Accessed February 23, 2021.
7. BIROUL NAȚIONAL DE STATISTICĂ AL REPUBLICII MOLDOVA. *Banca de date statistice Moldova. Ocrotirea sănătății. Morbiditatea populației*. [https://statbank.statistica.md/PxWeb/pxweb/ro/30 Statistica sociala/30 Statistica sociala__08 SAN__SAN020?rxid=2345d98a-890b-4459-bb1f-9b565f99b3b9](https://statbank.statistica.md/PxWeb/pxweb/ro/30%20Statistica%20sociala/30%20Statistica%20sociala__08%20SAN__SAN020?rxid=2345d98a-890b-4459-bb1f-9b565f99b3b9). Accessed February 15, 2024.
8. DARBY, S., HILL, D., DEO, H., et al. *Residential radon and lung cancer--detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe*. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 2006, Vol. 32 Suppl 1, pp.1–83. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16538937>.
9. KREWSKI, D., LUBIN, J. H., ZIELINSKI, J. M., et al. *Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies*. In: *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 2005, Vol. 16, Issue 2, pp.137–45. DOI: 10.1097/01.ede.0000152522.80261.e3.
10. AXELSSON, G., ANDERSSON, E. M., BARREGARD, L. *Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered?* In: *Cancer Causes & Control*, 2015, Vol. 26, Issue 4, pp.541–547. DOI: 10.1007/s10552-015-0531-6.
11. TURNER, M. C., KREWSKI, D., CHEN, Y., et al. *Radon and COPD mortality in the American Cancer Society Cohort*. In: *European Respiratory Journal*, 2012, Vol. 39, Issue 5, pp. 1113–1119. DOI: 10.1183/09031936.00058211.
12. BUCHHEIT, S. F., COLLINS, J. M., ANTHONY, K. M., et al. *Radon Exposure and Incident Stroke Risk in the Women's Health Initiative*. In: *Neurology*, 2024, Vol. 102, Issue 4. DOI: 10.1212/WNL.0000000000209143.

13. EU. Directive 2013/59/EURATOM. 2013:104.
14. STECK, D. J., FIELD, R. W., LYNCH, C. F. *Exposure to atmospheric radon*. In: *Environmental Health Perspectives*. 1999, Vol. 107, Issue 2, pp.123–127. DOI: 10.1289/ehp.99107123.
15. SILVA, J., LOPES, N., CURADO, A., et al. *A pre-diagnosis model for radon potential evaluation in buildings: A tool for balancing ventilation, indoor air quality and energy efficiency*. In: *Energy Reports*. 2022, Vol. 8, pp. 539–546. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.02.100.
16. SPASIĆ, D., GULAN, L., YARMOSHENKO, I., et al. *High Indoor Radon Case Study: Influence of Meteorological Parameters and Indication of Radon Prone Area*. In: *Atmosphere*, 2022, Vol. 13, Issue 12, pp. 2120. DOI: 10.3390/atmos13122120.
17. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers*. In: [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller AO (eds.)], ed. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2022:36.
18. GLOVER, P. W. J., BLOUIN, M. *Increased Radon Exposure From Thawing of Permafrost Due To Climate Change*. In: *Earth's Future*. 2022, Vol. 10, Issue 2. DOI: 10.1029/2021EF002598.
19. YARMOSHENKO, I., ZHUKOVSKY, M., ONISHCHENKO, A., et al. *Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings*. In: *Journal of environmental radioactivity*, 2021, Vol. 232, pp. 106575. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106575.
20. WALLS, K. L., BENKE, G. P., KINGHAM, S. P. *Potential increased radon exposure due to greater building energy-efficiency for climate change mitigation*. In: *Air Quality and Climate Change*, 2014, Vol. 48, Issue 1, pp. 16–22. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.601649825561885>.
21. VARDOULAKIS, S., DIMITROULOPOULOU, C., THORNES, J., et al. *Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK*. In: *Environment international*, 2015, Vol. 85, pp. 299–313. DOI: 10.1016/j.envint.2015.09.010.
22. BONE, A., MURRAY, V., MYERS, I., et al. *Will drivers for home energy efficiency harm occupant health?* In: *Perspectives in Public Health*. 2010, Vol. 130, Issue 5, pp. 233–238. DOI: 10.1177/1757913910369092.
23. EPNI, EARM, UNEP. *Fifth National Communication of the Republic of Moldova. Developed to be reported to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. (Lekoyiet S, Leon R, eds). Chisinau: Public Institution „Environmental Projects National Implementation Office”, Environment Agency of the Republic of Moldova, United Nations Environment Programme, 2023.
24. UNSCEAR. *UNSCEAR 2020 Report: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2020/2021. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes Volume III. Scientific Annex C*. New York, USA; 2021.
25. COREȚCHI, L., BAHNAREL, I., VÍRLAN, S., APOSTOL I. *Controlul, reglementarea și remediarea expunerii la radon a populației Republicii Moldova*. Chișinău, RM: Tipografia „Sirius”, 2020.
26. WHO. Radon. In: *Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition*, WHO Region. Copenhagen, Denmark, 2000:288.
27. TARANU, L., TRESCILO, L., BUGAEVA, T., et al. *Climate Change Impacts, Risks and Vulnerabilities in the Republic of Moldova: Observed Trends and Future Projections. 5th National Communication to the UNFCCC*. Chișinău, RM: Bons Offices, 2023.
28. STRATAN, V., ȘUTKIN, V., BRENIȘTER, S., et al. *Epidemiologia cancerului pulmonar în Republica Moldova*. In: *Buletinul Academiei de Științe a Moldovei. Științe Medicale*. 2015, Vol. 3, Issue 48, pp. 50–56. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/42325.
29. COREȚCHI, L., BAHNAREL, I., GÎNCU, M., COJOCARI, A., HOFFMANN M. *Controlul și evaluarea riscului expunerii populației la radon în Republica Moldova. One Health & Risk Management*, 2020, Vol. 1, pp. 42–49. DOI: 10.5281/zenodo.3701164.
30. ZHANG, S., JIN, D., JIN, H., et al. *Potential radon risk in permafrost regions of the Northern Hemisphere under climate change: A review*. In: *Earth-Science Reviews*. 2024, Vol. 250, pp. 104684. DOI: 10.1016/j.ear-scirev.2024.104684.

31. CHADBURN, S. E., BURKE, E. J., COCS, P. M., et al. *An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming*. In: *Nature Climate Change*. 2017, Vol. 7, Issue 5, pp. 340–344. DOI: 10.1038/nclimate3262.
32. PUCHKOV, A. V., YAKOVLEV, E. Y., HASSON, N., et al. *Radon Hazard In Permafrost Conditions: Current State Of Research*. In: *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, Vol. 14, Issue 4, pp. 93–104. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-037.
33. AKDAG, S., YILDIRIM, H. *Toward a sustainable mitigation approach of energy efficiency to greenhouse gas emissions in the European countries*. In: *Heliyon*. 2020, Vol. 6, Issue 3, pp. e03396. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03396.
34. YARMOSHENKO, I. V., MALINOVSKY, G. P., ONISHCHENKO, A. D., et al. *Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review*. In: *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020, Vol. 12, Issue 4, pp. 56–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65.
35. DERBEZ, M., WYART, G., LE PONNER, E., et al. *Indoor air quality in energy-efficient dwellings: Levels and sources of pollutants*. In: *Indoor air*. 2018, Vol. 28, Issue 2, pp. 318–338. DOI: 10.1111/ina.12431.
36. HAMILTON, I., MILNER, J., CHALABI, Z., et al. *Health effects of home energy efficiency interventions in England: a modelling study*. In: *BMJ open*. 2015, Vol. 5, Issue 4, pp. e007298. DOI: 10.1136/bmjopen-2014-007298.
37. SLEZÁKOVÁ, M., NAVRÁTILOVÁ ROVENSKÁ, K., TOMÁSEK, L., et al. *Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic*. In: *Radiation protection dosimetry*. 2013, Vol. 153, Issue 3, pp. 334–41. DOI: 10.1093/rpd/ncs111.
38. *EU. Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings*. Strasbourg, France: European Parliament and Council of Europe; 2023:02010L0031-20210101.
39. CUCOȘ, (DINU) A., DICU, T., COSMA, C. *Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania*. In: *Environmental Science, Engineering*. 2015, Vol. 60, Issue 9, pp. 1574–1580. https://rjp.nipne.ro/2015_60_9-10/RomJPhys.60.p1574.pdf.
40. REY, J. F., GOYETTE, S., GOYETTE PERNOT, J. *Weather Impacts on Indoor Radon Short-Term Measurements in Switzerland*. In: *Atmosphere*, 2023, Vol. 14, Issue 7, pp. 1163. DOI: 10.3390/atmos14071163.
41. REY, J. F., GOYETTE, S., GANDOLLA, M., et al. *Long-Term Impacts of Weather Conditions on Indoor Radon Concentration Measurements in Switzerland*. In: *Atmosphere*. 2022, Vol. 13, Issue 1, pp. 92. DOI: 10.3390/atmos13010092.
42. AQUILINA, N., FENECH, S. *The Influence of Meteorological Parameters on Indoor and Outdoor Radon Concentrations: A Preliminary Case Study*. In: *Journal of Environmental Pollution and Control*. 2019, Vol. 2, Issue 1, pp. 107. https://www.researchgate.net/publication/337924946_The_Influence_of_Meteorological_Parameters_on_Indoor_and_Outdoor_Radon_Concentrations_A_Preliminary_Case_Study.
43. NARASIMHAMURTHY, K. N., ASHOK, G. V., RAGHU, A., et al. *Study of variation of indoor radon levels in houses and prediction of indoor concentrations using house characteristics and outdoor radon levels*. In: *Radiation protection dosimetry*. 2023, Vol. 199, Issue 20, pp. 2406–2411. DOI: 10.1093/rpd/ncad271.
44. SATYANARAYANA, G. V. V., RATNARAJU, M., VIDYASAGAR, D., et al. *Seasonal variation of Indoor radon concentration in the dwellings of Visakhapatnam and estimation of indoor annual effective dose*. In: *Journal For Basic Sciences*, 2023, Vol. 23, Issue 12, pp. 618–633. https://www.researchgate.net/publication/377472734_Seasonal_variation_of_Indoor_radon_concentration_in_the_dwellings_of_Visakhapatnam_and_estimation_of_indoor_annual_effective_dose?enrichId=rgreq-50b909de158da3d6b7a54c4c688f62faXXX&enrichSource=Y292ZXJQY.
45. GIAGIAS, V., BURGHELE, D., COSMA, C. *Seasonal variation of indoor radon in dwellings from Athens, Greece*. In: *Romanian Journal of Physics*, 2015, 60(9):1581-1588.
46. DARAKTCHIEVA, Z. *New Correction Factors Based on Seasonal Variability of Outdoor Temperature for Estimating Annual Radon Concentrations in UK*. In: *Radiation protection dosimetry*, 2017, Vol. 175, Issue 1, pp. 65–74. DOI: 10.1093/rpd/ncw270.
47. CROCKETT, R., GROVES-KIRKBY, C. J., DENMAN, A.R., et al. *Significant annual and sub-annual cycles in indoor radon concentrations: seasonal variation and correction*. In: *Special Publications*, 2016, Vol. 451, pp. 35–47.

48. MUNTEAN, L. E., COSMA, C., CUCOS (DINU), A., DICU, T., MOLDOVAN, D. V. *Assessment of annual and seasonal variation of indoor radon levels in dwelling houses from Alba county, Romania*. In: *Environmental Physics*, 2014, Vol. 59, Issue 1–2, pp. 163–171. https://www.academia.edu/21028922/Assessment_of_annual_and_seasonal_variation_of_indoor_radon_levels_in_dwelling_houses_from_Alba_County_Romania?email_work_card=view-paper.
49. YARMOSHENKO, I., MALINOVSKY, G., VASILYEV, A., et al. *Seasonal Variation of Radon Concentrations in Russian Residential High-Rise Buildings*. In: *Atmosphere*. 2021, Vol. 12, Issue 7, pp. 930. DOI: 10.3390/atmos12070930.
50. ALGIN, E., ASICI, C., SOGUKPINAR, H., et al. *A case study on the use of seasonal correction factors for indoor radon measurements*. In: *Radiation Protection Dosimetry*. 2019, Vol. 183, Issue 4, pp. 423–431. DOI: 10.1093/rpd/ncy161.
51. CUCU, M., DUPLÉAC, D. *The impact of ventilation rate on radon concentration inside high-rise apartment buildings*. In: *Radiation protection dosimetry*, 2022, Vol. 198, Issue 5, pp. 290–298. DOI: 10.1093/rpd/ncac047.
52. ZORAN, M., SAVASTRU, R., SAVASTRU, D., et al. *Climate effects of aerosols and radon on COVID-19 pandemic in Bucharest metropolitan area*. In: *RAP Conference Proceedings*. Sievert Association. 2023, p. 8-14. DOI: 10.37392/RapProc.2023.03
53. HAQUIN, G., ZAFRIR, H., ILZYCER, D., et al. *Effect of atmospheric temperature on underground radon: A laboratory experiment*. In: *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, Vol. 253–254, pp. 106992. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106992.
54. IPCC. *IPCC, 2021: Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ([Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. [Masson-Delmotte, and BZ (eds.)], ed). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2022, p. 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.
55. ALEGRÍA, N., HERNÁNDEZ-CEBALLOS, M. Á., CINELL, G., et al. *Analysis of ²²²Rn Surface Concentrations in the Basque Country (Spain): A Case Study of Heat Waves*. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, Vol. 20, Issue 3, pp. 2105. DOI: 10.3390/ijerph20032105.

Notă: Cercetarea este susținută de Ministerul Sănătății și Ministerul Educației și Cercetării din Republica Moldova în cadrul subprogramului „Monitoringul expunerii la radiații ionizante a personalului expus profesional și publicului cu elaborarea măsurilor de radioprotecție”, codul 130102, al Programului instituțional de cercetare (2024-2027).

Date despre autori:

Ala OVERCENCO (autor-corespondent), doctor în științe geonomice, cercetător științific coordonator, Laboratorul Igiena Radiațiilor și Radiobiologie, Agenția Națională pentru Sănătate Publică.

ORCID: 0000-0002-6970-9216

E-mail: ala.overcenco@ansp.gov.md, allaovercenco@gmail.com

Liuba COREȚCHI, doctor habilitat în științe biologice, conferențiar cercetător, șef laborator, Laboratorul Igiena Radiațiilor și Radiobiologie, Agenția Națională pentru Sănătate Publică.

ORCID: 0000-0001-5758-3831

E-mail: liuba.koretski@ansp.gov.md, coretchiliuba@gmail.com

Prezentat la 10.09.2024