

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Nguyễn Thị Ánh Nguyệt

NGHIÊN CỨU SỰ THOÁT KHÍ RADON TRONG
NHÀ TRÌNH TƯỜNG: LẤY VÍ DỤ Ở XÃ BẠCH ĐÍCH,
HUYỆN YÊN MINH, TỈNH HÀ GIANG

LUẬN ÁN TIẾN SĨ ĐỊA CHẤT HỌC

Hà Nội – 2025

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Nguyễn Thị Ánh Nguyệt

NGHIÊN CỨU SỰ THOÁT KHÍ RADON TRONG
NHÀ TRÌNH TƯỜNG: LẤY VÍ DỤ Ở XÃ BẠCH ĐÍCH,
HUYỆN YÊN MINH, TỈNH HÀ GIANG

Chuyên ngành: Địa chất học

Mã số: 9440201.01

LUẬN ÁN TIẾN SĨ ĐỊA CHẤT HỌC

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- PGS. TS. Nguyễn Thùy Dương
- TS. Nguyễn Văn Hương

Hà Nội - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Luận án Tiến sĩ này là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được công bố trong các công trình luận văn, luận án khác.

Tác giả luận án

Nguyễn Thị Ánh Nguyệt

LỜI CẢM ƠN

Luận án được hoàn thành tại Bộ môn Khoa học và Công nghệ Địa chất - Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – Đại học Quốc gia Hà Nội dưới sự hướng dẫn và bảo trợ khoa học của PGS.TS. Nguyễn Thùy Dương và TS. Nguyễn Văn Hường. Nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới thầy hướng dẫn khoa học – PGS. TS. Nguyễn Thùy Dương, người đã gợi mở, hướng dẫn và đồng hành cùng nghiên cứu sinh trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án. Nghiên cứu sinh cũng xin gửi tới thầy hướng dẫn khoa học – TS. Nguyễn Văn Hường, người đã chia sẻ và hướng dẫn các kiến thức và ứng dụng để nghiên cứu sinh áp dụng hoàn thành luận án.

Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến TS. Arndt Schimmelmann (Đại học Indiana, Hoa Kỳ) đã giúp đỡ, chỉ bảo, truyền đạt những kinh nghiệm quý báu, hỗ trợ thiết bị cho nghiên cứu sinh trong suốt quá trình học viên thực hiện và hoàn thành luận án.

Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn đến các thầy cô Khoa Địa chất, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN đã quan tâm, hỗ trợ, giúp đỡ và tạo mọi điều kiện thuận lợi để nghiên cứu sinh hoàn thành luận án. Nghiên cứu sinh cũng xin gửi lời cảm ơn đến phụ trách đào tạo sau đại học - Phòng Đào tạo, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên đã hỗ trợ và tạo mọi điều kiện thuận lợi.

Luận án được hỗ trợ trực tiếp từ đề tài khoa học nghiên cứu về khí phóng xạ radon, nghiên cứu sinh xin cảm ơn đến tập thể tác giả và chủ nhiệm đề tài “*Giảm thiểu nồng độ khí radon ($Rn-222$ và $Rn-220$) trong nhà trình tường bằng các vật liệu che phủ bề mặt chi phí thấp*” (Mã số: 105.99-2021.49). Nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn tập thể tác giả và chủ nhiệm đề tài đã cho phép nghiên cứu sinh sử dụng và kế thừa các dữ liệu trong đề tài để hoàn thành luận án.

Nghiên cứu sinh cũng xin được gửi lời cảm ơn đến Tập đoàn Vingroup đã hỗ trợ tài chính cho nghiên cứu sinh với 2 học bổng tiến sĩ trong nước mã số

VINIF.2020.TS.64, VINIF.2021.TS.065 thuộc Viện nghiên cứu dữ liệu lớn và Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF).

Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn đến các đồng nghiệp phòng Công nghệ sinh học môi trường, Viện Khoa học công nghệ Năng lượng và Môi trường, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã giúp đỡ, hỗ trợ, chia sẻ và tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh tập trung hoàn thành luận án.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn đến gia đình, bạn bè và đồng nghiệp, những người luôn đồng hành, yêu thương và động viên nghiên cứu sinh trong suốt thời gian dài nghiên cứu và hoàn thành luận án này.

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn những sự giúp đỡ quý báu này.

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	1
LỜI CẢM ƠN	1
DANH MỤC KÍ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	6
DANH MỤC BẢNG	7
DANH MỤC HÌNH ẢNH	9
MỞ ĐẦU	12
1. Tính cấp thiết của đề tài luận án	12
2. Mục tiêu của luận án	13
3. Nội dung nghiên cứu	13
4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	13
5. Những luận điểm bảo vệ	13
6. Những điểm mới của luận án	14
7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	14
8. Cơ sở tài liệu	15
9. Cấu trúc luận án	16
10. Một số khái niệm và thuật ngữ sử dụng trong luận án	16
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN KHU VỰC NGHIÊN CỨU	18
1.1. Vị trí khu vực nghiên cứu	18
1.2. Đặc điểm điều kiện tự nhiên và kinh tế - xã hội	19
1.2.1. <i>Đặc điểm địa chất</i>	19
1.2.2. <i>Đặc điểm địa hình - địa mạo</i>	23
1.2.3. <i>Đặc điểm thủy văn</i>	25
1.2.4. <i>Đặc điểm khí hậu</i>	25
1.2.5. <i>Đặc điểm kinh tế - xã hội</i>	26

1.2.6. Nhà trình tường.....	28
1.3. Lịch sử nghiên cứu.....	31
1.3.1. Trên thế giới.....	31
1.3.2. Ở Việt Nam.....	36
1.3.3. Những tồn tại cần giải quyết.....	39
1.4. Tiểu kết.....	39
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ HỆ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	41
2.1. Hướng tiếp cận.....	41
2.2. Cơ sở lý luận.....	42
2.2.1. Nguồn gốc và hành vi địa hóa của urani và thori.....	42
2.2.2. Nguồn gốc và hành vi địa hoá của khí radon.....	44
2.2.3. Ứng dụng và ảnh hưởng của khí radon đến con người.....	47
2.2.4. Tính chất của vật liệu chứa radon.....	51
2.3. Các phương pháp nghiên cứu.....	52
2.3.1. Khảo sát thực địa.....	52
2.3.2. Phương pháp nghiên cứu thành phần vật chất của đất làm nhà trình tường và các vật liệu xây dựng.....	60
2.3.3. Phương pháp tính toán tốc độ thoát khí, liều chiếu hiệu dụng và đánh giá nguy cơ rủi ro.....	63
2.4. Tiểu kết.....	66
CHƯƠNG 3. KHÍ RADON TRONG TỰ NHIÊN VÀ TRONG NHÀ TRÌNH TƯỜNG	67
3.1. Nguồn gốc khí radon.....	67
3.1.1. Từ vỏ phong hóa được làm giàu.....	67
3.1.2. Từ vật liệu xây dựng.....	70

3.1.3. Từ môi trường không khí ngoài trời khu vực nghiên cứu	76
3.2. Quá trình thoát khí radon trong nhà trình tường	83
3.2.1. Sự phân bố nồng độ khí radon trong nhà trình tường	83
3.2.2. Tốc độ thoát khí radon trong nhà trình tường	93
3.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến sự thoát khí radon trong nhà trình tường	94
3.3.1. Thành phần vật chất của đất làm nhà trình tường	94
3.5.2. Các yếu tố khí hậu	97
3.5.3. Độ hạt và tỷ trọng	103
3.4. Tiểu kết	107
CHƯƠNG 4. ẢNH HƯỞNG KHÍ RADON ĐẾN SỨC KHOẺ CON NGƯỜI VÀ GIẢI PHÁP GIẢM THIỂU	109
4.1. Ảnh hưởng của khí radon đến sức khỏe con người	109
4.1.1. Liều chiếu cho từng đối tượng sinh sống trong nhà trình tường	109
4.1. 2. Nguy cơ rủi ro	114
4.2. Đề xuất một số giải pháp giảm thiểu rủi ro	116
4.3. Tiểu kết	118
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	119
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ	121
TÀI LIỆU THAM KHẢO	122
PHỤ LỤC	

DANH MỤC KÍ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
α	Alpha particle	Hạt alpha
β	Beta particle	Hạt Beta
Bq/kg	Becquerel per kilogram	Đơn vị đo hoạt độ phóng xạ
Bq/m ³	Becquerel per cubic meter	Đơn vị đo nồng độ khí phóng xạ
DOE	United States Department of Energy	Bộ năng lượng Hoa Kỳ
ĐVT		Đơn vị tính
EPA	United States Environmental Protection Agency	Cục bảo vệ môi trường Hoa Kỳ
IAEA	International Atomic Energy Agency	Cơ quan năng lượng nguyên tử Quốc tế
ICRP	International Commission on Radiological Protection	Ủy ban Quốc tế về bảo vệ phóng xạ
mSv/năm	Milisievert per year	Đơn vị đo liều trong 1 năm
n		Số lần thực hiện đo
TB		Trung bình
TCVN		Tiêu chuẩn Việt Nam
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation	Ủy ban khoa học Liên hợp quốc về tác động Bức xạ nguyên tử
WHO	World Health Organization	Tổ chức y tế Thế giới
WLM	Working level month	Đơn vị đo mức làm việc với số giờ tiếp xúc radon trong thời gian 1 tháng
γ	Gamma ray	Tia gamma

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2. 1 Khuyến cáo ngưỡng an toàn của đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí nhà ở và nơi làm việc trên thế giới [UNSCEAR, 2006, 2008; WHO, 2009].....	49
Bảng 2. 2 Nồng độ đồng vị khí Rn-222 an toàn cho môi trường không khí trong nhà ở theo năm ở Việt Nam [TCVN 7889:2008] và ICRP [1995, 2018].	50
Bảng 3. 1 Nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m ³) trong vỏ phong hóa khu vực xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang.....	67
Bảng 3. 2 Hoạt độ phóng xạ (quang phổ gamma phòng nền thấp – detector HPGe) và hàm lượng các nguyên tố phóng xạ (quang phổ khối ICP_MS) trong đất làm nhà.	68
Bảng 3. 3 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m ³) trong các kiểu nhà ở khu vực nghiên cứu (số điểm đo mỗi nhà, n = 5).....	71
Bảng 3. 4 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m ³) trong môi trường không khí ngoài trời khu vực nghiên cứu.....	77
Bảng 3. 5 Thống kê một số khảo sát nồng độ đồng vị khí Rn-222 ở môi trường không khí ngoài trời trên thế giới [Čeliković và cs., 2022] và ở Việt Nam (*trong luận án thực hiện khảo sát).....	81
Bảng 3. 6 Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 (Bq/m ³) trong môi trường không khí ngoài trời trên Thế giới và ở Việt Nam.....	82
Bảng 3. 7 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m ³) trong nhà trình tường.....	85
Bảng 3. 8. Tốc độ thoát khí radon (Bq/m ² s) trong tường và nền nhà trình tường.	93
Bảng 3. 9. Thành phần hóa học (% tl) có trong đất sử dụng làm nhà trình tường (xác định bằng phương pháp XRF).....	95
Bảng 3. 10. Thành phần khoáng vật (% tl) trong đất sử dụng làm nhà trình tường (xác định bằng phương pháp XRD).	95

Bảng 3. 11. Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m ³) thoát ra từ mô hình gạch đất mô phỏng tường đất nhà trình tường theo độ ẩm khác nhau (n = 16)	101
Bảng 3. 12 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m ³) theo tỷ trọng.	106
Bảng 4. 1. Phân chia thời gian (giờ) trong nhà và ngoài trời phơi nhiễm đối với từng nhóm đối tượng cụ thể sinh sống trong nhà trình tường trong một năm	110
Bảng 4. 2. Liều chiếu hiệu dụng (mSv/năm) từ môi trường không khí ngoài trời	111
Bảng 4. 3. Liều chiếu hiệu dụng (mSv/năm) từ môi trường không khí nhà trình tường	112
Bảng 4. 4. Nguy cơ rủi ro tương đối có thể bị ung thư phổi do tổng khí radon gây ra trên từng đối tượng.....	115

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1. 1 Sơ đồ vị trí xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang [Nguồn: Bản đồ hành chính huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang, https://hagiang.gov.vn/] ..	18
Hình 1. 2 Sơ đồ cấu trúc - kiến tạo khu vực cao nguyên đá Đồng Văn [Nguồn: Đỗ Thị Yến Ngọc và cs., 2022].....	20
Hình 1. 3 Sơ đồ địa chất xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang [Nguồn: Bản đồ địa chất miền Bắc Việt Nam tỷ lệ 1:500.000, Trần Đức Lương và Nguyễn Xuân Bao, 1977]	22
Hình 1. 4 Biểu đồ nhiệt độ và lượng mưa trung bình khu vực cao nguyên đá Đồng Văn [Nguồn: Niên giám thống kê tỉnh Hà Giang, 2022]	25
Hình 1. 5 Kiến trúc nhà được xây dựng từ bùn, đất ở Togo, Châu Phi (a) và ở Thiruvananthapuram, Ấn Độ (b) [Nguồn: https://grantforsyth.blogspot.com/2011/05/togo-earthen-castles.html ; https://timesofindia.indiatimes.com/city/thiruvananthapuram/mud-houses-are-the-new-fad-in-the-capital/articleshow/64116032.cms]	29
Hình 1. 6 Các bước làm nhà trình tường.....	31
Hình 1. 7 Nhà trình tường ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang	31
Hình 1. 8 Đường di chuyển của khí radon thoát vào môi trường không khí trong nhà.	34
Hình 1. 9 Khí radon di chuyển trong môi trường không khí trong nhà khi nhiệt độ ngoài trời thấp hơn trong nhà.	36
Hình 1. 10 Sơ đồ tóm tắt nghiên cứu khí radon trên thế giới và đặc điểm địa chất khu vực xã Bạch Đích.	40
Hình 2. 1 Urani và thori được làm giàu trong đất thổ nhưỡng từ quá trình phong hóa đá carbonat [Qiang và cs., 2023].	43
Hình 2. 2 Chuỗi phân rã đồng vị khí radon [Nguồn: http://www.world-nuclear.org]	45
Hình 2. 3 Hiệu ứng giật lùi (recoil) [Barillon và cs., 2005].....	45

Hình 2. 4 Quá trình hình thành và di chuyển của khí radon [IAEA, 2013].....	46
Hình 2. 5 Mạng lưới khảo sát khí radon trong nhà trình tường.	53
Hình 2. 6 Quy trình hiệu chuẩn thiết bị SARAD® RTM 2200.	55
Hình 2. 7 Khảo sát khí radon trong khí đất bằng SARAD® RTM 2200.....	55
Hình 2. 8 Khảo sát nồng độ khí radon trên nền và tường đất bằng SARAD® RTM 2200.....	56
Hình 2. 9 Mô hình gạch đất và khả năng thoát khí radon từ gạch đất.	59
Hình 2. 10 Khảo sát nồng độ khí radon từ các mẫu gạch bằng thiết bị Thoron Scout.	60
Hình 2. 11 Hệ phương pháp nghiên cứu.	66
Hình 3. 1 Quá trình làm giàu urani và thori lớp vỏ phong hóa.....	69
Hình 3. 2 Biểu đồ nồng độ trung bình khí radon trong vật liệu xây dựng.	70
Hình 3. 3 Sơ đồ trung bình nồng độ khí radon trong các kiểu nhà.	72
Hình 3. 4 Biểu đồ trung bình nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà ở trong các kiểu nhà được xây dựng từ bùn, đất, gạch không nung trên thế giới và trong luận án.....	75
Hình 3. 5 Nhà được xây dựng từ bùn, đất (a) ở Trung Quốc cao và nhiều cửa sổ lưu thông không khí, (b) ở Đông Phi thấp và không gian đóng kín	76
Hình 3. 6 Sơ đồ trung bình nồng độ khí radon ngoài trời khu vực nghiên cứu. ...	78
Hình 3. 7 Sơ đồ phân bố nồng độ đồng vị khí Rn-220 ngoài trời khu vực xã Bạch Đích [Nguồn: Bản đồ địa chất miền Bắc Việt Nam tỷ lệ 1:500.000, Trần Đức Lương và Nguyễn Xuân Bao, 1977].	80
Hình 3. 8 Mô hình nhà trình tường và các mặt cắt khảo sát.	84
Hình 3. 9 Nồng độ khí radon theo mặt cắt AA'.	86
Hình 3. 10. Biểu đồ nồng độ đồng vị khí radon theo mặt cắt BB'	87
Hình 3. 11. Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt CC'.	88
Hình 3. 12 Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt DD'.....	90
Hình 3. 13. Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt EG.....	91

Hình 3. 14 Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt FG.	92
Hình 3. 15 Quá trình hấp phụ urani trong khoáng vật dạng lớp có chứa sét [Wang và cs., 2024].	96
Hình 3. 16 Biểu đồ nhiệt độ và nồng độ trung bình khí radon trong nhà trình tường.	99
Hình 3. 17 Biểu đồ sự hấp phụ nước ở các mảnh tường trong nhà trình tường	100
Hình 3. 18 Biểu đồ khả năng thoát đồng vị khí Rn-220 tương ứng với hàm lượng nước trong mô hình gạch đất.....	103
Hình 3. 19 Biểu đồ trung bình nồng độ khí radon trong các viên gạch được làm từ các cấp hạt đất khác nhau.....	105
Hình 3. 20 Nồng độ khí radon theo tỷ trọng.	107
Hình 3. 21 Sơ đồ các yếu tố ảnh hưởng đến sự thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường	108
Hình 4. 1 Biểu đồ tổng liều chiếu hiệu dụng cho từng nhóm đối tượng, trong đó: UNSCEAR [2000] là tổng liều chiếu trung bình năm do UNSCEAR khuyến cáo.....	113
Hình 4. 2 Biểu đồ tổng liều chiếu hiệu dụng trong môi trường không khí nhà trình tường cho từng nhóm đối tượng, trong đó: ERR_{Rn-222} là liều chiếu trong do đồng vị Rn-222; ERR_{Rn-220} là liều chiếu trong do đồng vị Rn-220; AEDR: là liều chiếu ngoài; UNSCEAR [2000] là tổng liều chiếu trung bình năm do UNSCEAR đưa ra.	114
Hình 4. 3 Biểu đồ nguy cơ rủi ro tương đối bị bệnh phổi do khí radon gây ra cho các nhóm đối tượng nghiên cứu.....	116
Hình 4. 4 Sơ đồ phơi nhiễm khí radon của người dân sinh sống trong nhà trình tường khu vực xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang.....	118
Hình 4. 5 Sơ đồ nguyên lý đưa ra giải pháp giảm thiểu khí radon trong nhà trình tường.....	118

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Khí radon tồn tại khắp nơi trên Trái đất, đóng góp > 50% năng lượng phóng xạ có nguồn gốc tự nhiên ảnh hưởng đến con người [UNSCEAR, 2000] và là nguyên nhân thứ hai gây ung thư phổi ở con người [WHO, 2009]. Khí radon tích tụ nồng độ cao trong các môi trường kín (như nhà ở, hầm lò, hang động, ...), có thể gây ảnh hưởng đến sức khỏe đến người tiếp xúc. Các nghiên cứu trên thế giới đã ghi nhận nồng độ khí radon cao trong các kiểu nhà được xây dựng từ bùn, đất [Chege và cs., 2019; Sivakumar, 2016; Anil và Alok, 2016] trong đó nhà trình tường ở cao nguyên đá Đồng Văn, tỉnh Hà Giang, Việt Nam cũng là trường hợp tương tự [Đặng Thị Phương Thảo và cs., 2016].

Ở Việt Nam, nhà trình tường là kiểu nhà được xây dựng trực tiếp từ đất địa phương (không phối trộn với bất kỳ phụ gia nào) và là ngôi nhà truyền thống phổ biến của một số cộng đồng dân tộc thiểu số ở khu vực miền núi phía Bắc. Nhà trình tường có nhiều ưu điểm phù hợp với điều kiện địa hình, khí hậu và kinh tế của người dân địa phương. Tuy nhiên, đến nay chưa có nghiên cứu cụ thể nào đánh giá chi tiết mức độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà cũng như các giải pháp giảm thiểu rủi ro phơi nhiễm. Vì vậy, luận án ***“Nghiên cứu sự thoát khí radon trong nhà trình tường: lấy ví dụ ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang”*** là cần thiết thực hiện nhằm xác định nguồn gốc và mức độ tồn tại khí radon trong nhà trình tường. Kết quả của luận án là cơ sở khoa học để đánh giá tác động của khí radon đến sức khỏe của người dân sinh sống trong nhà trình tường, đồng thời đưa ra các đề xuất giảm thiểu, góp phần bảo tồn và phát triển bền vững nhà trình tường.

Nghiên cứu lựa chọn thực hiện trên nhà trình tường ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang, nơi có đặc điểm địa hình, địa chất và các yếu tố tự nhiên có khả năng liên quan với sự tích tụ khí radon trong môi trường không khí. Người dân ở xã Bạch Đích có truyền thống sử dụng nhà trình tường để sinh sống từ lâu

đời, và có nhiều kinh nghiệm xây dựng nhà trình tường. Hơn nữa, người dân sẵn sàng cung cấp các thông tin liên quan và tạo điều kiện cho công tác nghiên cứu.

2. Mục tiêu của luận án

Làm sáng tỏ sự thoát khí radon trong nhà trình tường nhằm xác định nguồn gốc và nguyên nhân khí radon (gồm hai đồng vị Rn-222 và Rn-220) tích tụ nồng độ cao trong môi trường không khí trong nhà trình tường, các yếu tố ảnh hưởng đến sự giải phóng các đồng vị khí radon. Từ đó, đánh giá nguy cơ rủi ro sức khỏe cho người dân sinh sống trong nhà trình tường cũng như các biện pháp giảm thiểu phơi nhiễm.

3. Nội dung nghiên cứu

- Xác định nguồn gốc và nguyên nhân dẫn đến tồn tại nồng độ khí radon (Rn-222 và Rn-220) cao trong môi trường không khí trong nhà trình tường;
- Phân tích các yếu tố có thể ảnh hưởng đến khả năng giải phóng khí radon (Rn-222 và Rn-220) vào môi trường không khí trong nhà trình tường;
- Đánh giá nguy cơ rủi ro sức khỏe cho người dân sinh sống trong nhà trình tường và đưa ra các biện pháp giảm thiểu phơi nhiễm khí radon (Rn-222 và Rn-220).

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- *Đối tượng nghiên cứu:* các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220) trong môi trường không khí trong nhà trình tường.
- *Phạm vi nghiên cứu:* môi trường không khí ngoài trời và trong nhà trình tường ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang.

5. Những luận điểm bảo vệ

- **Luận điểm 1:** Khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường cao tương đối so với môi trường không khí bên ngoài, (1) có nguồn gốc từ các thành tạo địa chất dưới sâu di chuyển lên trên bề mặt đất qua hệ thống kênh

dẫn là các đứt gãy, khe nứt và thành phần đất tự nhiên xây dựng nhà trình tường; và (2) phụ thuộc vào đặc điểm cấu trúc nhà trình tường và điều kiện thời tiết.

- **Luận điểm 2:** Nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường cao gây nên liều chiếu phóng xạ đối với người dân sinh sống ở đây cao hơn quy chuẩn an toàn phóng xạ cho phép đối với cơ thể người, vì vậy tiềm tàng nguy cơ rủi ro nhiễm bệnh phổi đối với cư dân, đặc biệt là đối với những người có thói quen hút thuốc lá. Để giảm thiểu nồng độ khí radon và tác hại của chúng đối với cư dân, cần áp dụng các giải pháp tăng sự lưu thông không khí và/hoặc che phủ bề mặt tường, nền nhà bằng các vật liệu phù hợp có thể ngăn sự thoát khí radon vào môi trường không khí trong nhà.

6. Những điểm mới của luận án

Luận án có những điểm mới quan trọng sau:

- 1) Luận án nghiên cứu và giải thích được nguồn gốc và nguyên nhân dẫn đến nồng độ khí radon ($Rn-222$ và $Rn-220$) cao trong môi trường không khí trong nhà trình tường.
- 2) Luận án phân tích làm rõ các yếu tố chính ảnh hưởng đến sự thoát khí radon vào môi trường không khí trong nhà trình tường bao gồm các thành tạo địa chất, các yếu tố khí hậu và thành phần vật liệu đất làm nhà.
- 3) Nội dung luận án đã tính toán được liều chiếu trung bình năm, đồng thời ước tính được nguy cơ rủi ro bị bệnh và đưa ra một số biện pháp giảm thiểu phơi nhiễm cho người dân sinh sống trong nhà trình tường tại xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- *Ý nghĩa khoa học:* góp phần hoàn thiện cơ sở lý luận của nguồn gốc và nguyên nhân tồn tại nồng độ khí radon cao trong môi trường không khí trong nhà trình tường. Phân tích, đánh giá được sự ảnh hưởng của các yếu tố chính tác động đến sự phân bố và tích lũy khí radon trong môi trường nhà ở.

- *Ý nghĩa thực tiễn*: kết quả của luận án là cơ sở để đưa ra đánh giá, cảnh báo khả năng phơi nhiễm khí radon cho người dân sinh sống trong nhà trình tường; cơ sở để nghiên cứu các giải pháp giảm thiểu nồng độ khí radon trong nhà mà vẫn bảo tồn được kiến trúc của kiểu nhà trình tường.

8. Cơ sở tài liệu

Luận án được xây dựng trên cơ sở nghiên cứu sinh thu thập và trực tiếp thực hiện qua các đề tài và các công trình công bố, gồm:

- Các tài liệu thu thập phục vụ đánh giá luận giải, khảo sát thực địa gồm: các bản đồ địa chất khu vực cao nguyên đá Đồng Văn tỷ lệ 1:200.000; bản đồ địa chất miền Bắc Việt Nam tỷ lệ 1:500.000; dữ liệu khí radon nền khu vực trong đề tài “Nghiên cứu đánh giá tổng hợp các loại hình tai biến địa chất trên lãnh thổ Việt Nam và các giải pháp phòng tránh” của Trần Trọng Huệ và cộng sự [2004].
- Các dữ liệu từ khảo sát, thu thập mẫu: luận án thực hiện 02 đợt khảo sát nồng độ khí radon (268 điểm đo ngoài trời, 165 điểm đo trong nhà, 2 điểm đo khí đất), thu thập 03 mẫu đất sử dụng làm nhà trình tường, và 4 loại vật liệu xây dựng, dữ liệu thời tiết (vào tháng 7 năm 2020 và tháng 1 năm 2021), thông tin về phong tục tập quán và thói quen sinh sống của người dân khu vực nghiên cứu.
- Các dữ liệu từ đề tài, đề án các cấp mà nghiên cứu sinh trực tiếp tham gia: “Nghiên cứu sự phát xạ khí radon (^{220}Rn , ^{222}Rn) trong môi trường karst khu vực Đông Bắc Việt Nam” (mã số: 105.99-2016.16); và “Giảm thiểu nồng độ khí radon (Rn-222 và Rn-220) trong nhà trình tường bằng các vật liệu che phủ bề mặt chi phí thấp” (mã số: 105.99-2021.49) do Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia NAFOSTED tài trợ và PGS. TS. Nguyễn Thùy Dương chủ nhiệm (2016 – 2020 và 2021 – 2025).
- Kết quả của các công trình, bài báo do NCS là tác giả và đồng tác giả đã đăng trong các tạp chí quốc tế có uy tín (2 bài), quốc gia (1 bài), hội thảo quốc tế (1 bài).

- Các tài liệu tham khảo trong và ngoài nước liên quan đến nội dung luận án.

9. Cấu trúc luận án

Luận án được trình bày trong 4 chương, không bao gồm mở đầu, kết luận, tài liệu tham khảo và phụ lục:

Chương 1: Tổng quan khu vực nghiên cứu

Chương 2: Cơ sở tài liệu và hệ phương pháp nghiên cứu

Chương 3: Khí radon trong tự nhiên và trong nhà trình tường

Chương 4: Ảnh hưởng khí radon đến sức khỏe con người và giải pháp giảm thiểu

10. Một số khái niệm và thuật ngữ sử dụng trong luận án

a. Khí radon và các đồng vị khí radon

Radon là nguyên tố phóng xạ trơ, tồn tại ở trạng thái khí trong điều kiện tự nhiên, gồm 3 đồng vị phổ biến và chiếm tỷ lệ lớn trong tự nhiên: Rn-222, Rn-220, và Rn-219. Dựa vào đặc điểm của các đồng vị (chi tiết được trình bày trong mục 2.2.1 Chương 2), luận án chỉ nghiên cứu các đồng vị Rn-222 và Rn-220. Các thuật ngữ liên quan với khí radon trong luận án được sử dụng với nghĩa như sau:

- Khí radon: gồm hỗn hợp hai đồng vị khí Rn-222 và Rn-220.

b. Sự thoát khí

Là quá trình giải phóng khí đã bị giữ lại trong một số vật liệu do bị đóng băng hoặc bị hấp phụ [Strong, 1938; Allaby, 2008]. Sự thoát khí bao gồm các quá trình giải hấp, bay hơi, khuếch tán và thẩm thấu [Bukhari và Shukla, 2017].

- + Giải hấp: là quá trình loại bỏ hoặc giải phóng các phân tử, ion hoặc khí ra khỏi bề mặt chất rắn.

- + Bay hơi: là quá trình chuyển trạng thái từ rắn, lỏng sang trạng thái khí.

- + Khuếch tán (khí): là quá trình các phân tử khí di chuyển từ khu vực có nồng độ cao hơn đến khu vực có nồng độ thấp hơn.

- + Thẩm thấu (khí): là quá trình khí đi qua một vật liệu rắn.

Trong luận án, sự thoát khí được sử dụng với nghĩa là quá trình giải phóng (giải hấp và khuếch tán) khí radon (Rn-222 và Rn-220) từ dưới sâu lên và từ vật liệu làm nhà.

c. Liều chiếu

- **Liều chiếu trong:** là liều bức xạ do bị chiếu từ các nuclit phóng xạ xâm nhập vào bên trong cơ thể (do ăn uống, hít thở các chất phóng xạ vào cơ thể người và các nuclit phóng xạ có sẵn ở bên trong cơ thể) (ĐVT: mSv/năm) [TCVN 9415:2012].

- **Liều chiếu ngoài:** là liều bức xạ do bị chiếu xạ bằng các nguồn xạ ở bên ngoài cơ thể (ĐVT: mSv/năm) [TCVN 9415:2012].

- **Liều hiệu dụng:** Là tổng liều tương đương của từng mô (trong cơ thể người) nhân với trọng số mô tương ứng tính cho tất cả các mô và cơ quan trong cơ thể người (ĐVT: mSv/năm) [TT19/2012/BKHCN].

d. Các mức cảnh báo về nồng độ các đồng vị khí radon

- **Mức hành động:** là mức nồng độ radon trong không khí mà ở đó các tổ chức hạt nhân, môi trường và y tế khuyến nghị người dân nên thực hiện các biện pháp giảm thiểu nếu vượt quá ngưỡng an toàn [TCVN 7889:2008].

- **Mức khuyến cáo:** là mức nồng độ radon trong không khí mà con người có thể tiếp xúc mà không gây rủi ro sức khỏe đáng kể [TCVN 7889:2008].

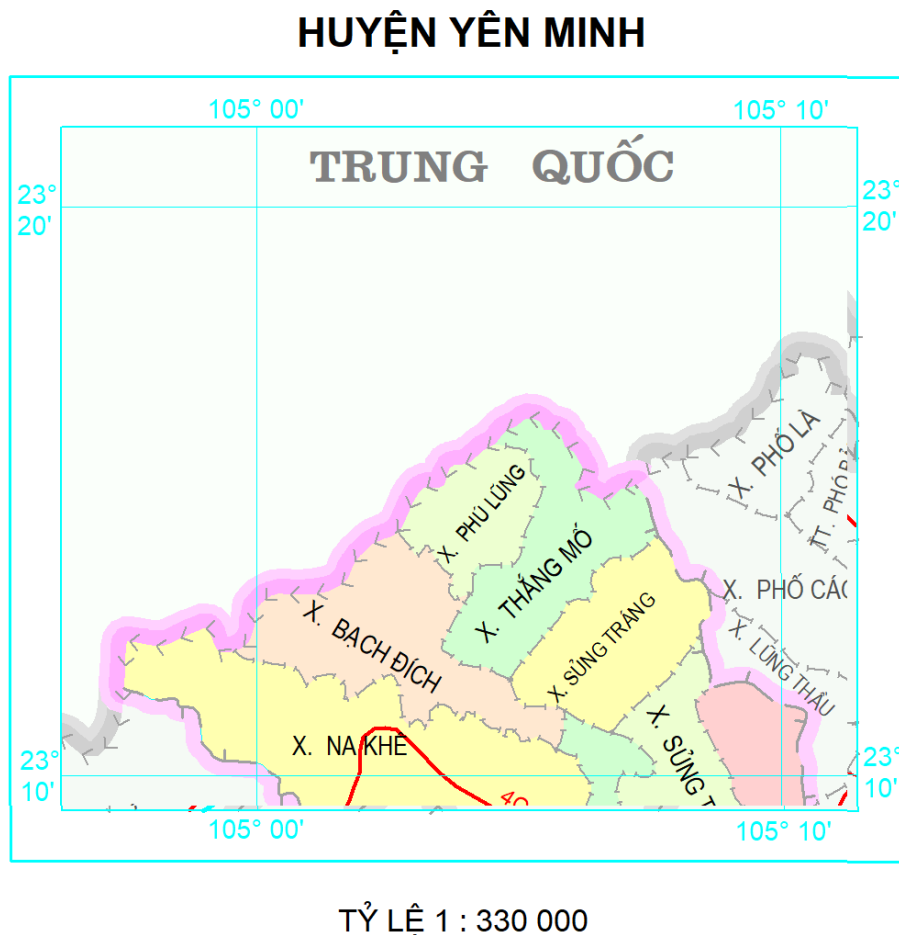
- **Mức phấn đấu:** là mức nồng độ radon trung bình thấp nhất trong nhà có thể đạt được theo khả năng [TCVN 7889:2008].

- **Mức khuyến nghị:** là mức nồng độ đồng vị Rn-220 mà tổ chức UNSCEAR đưa ra mà tại đó có thể có yếu tố rủi ro dẫn đến nguy cơ rủi ro an toàn sức khỏe.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN KHU VỰC NGHIÊN CỨU

1.1. Vị trí khu vực nghiên cứu

Bạch Đích là xã biên giới nằm ở phía Bắc của huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang, phía Bắc giáp Trung Quốc và xã Phú Lũng, phía Đông giáp xã Thắng Mố và xã Sùng Thái, phía Nam giáp xã Na Khê, phía Tây giáp Trung Quốc và xã Na Khê (Hình 1.1). Xã Bạch Đích có đường biên giới quốc gia dài 7,32 km (từ mốc 355/1 đến mốc 358) với tổng diện tích đất 2.898,66 ha [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Với vị trí địa lý đặc thù và tiềm năng phát triển kinh tế vùng biên giới, xã Bạch Đích đóng vai trò quan trọng trong chiến lược phát triển biên giới huyện Yên Minh và tỉnh Hà Giang.



Hình 1. 1 Sơ đồ vị trí xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang
[Nguồn: Bản đồ hành chính huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang, <https://hagiang.gov.vn/>]

1.2. Đặc điểm điều kiện tự nhiên và kinh tế - xã hội

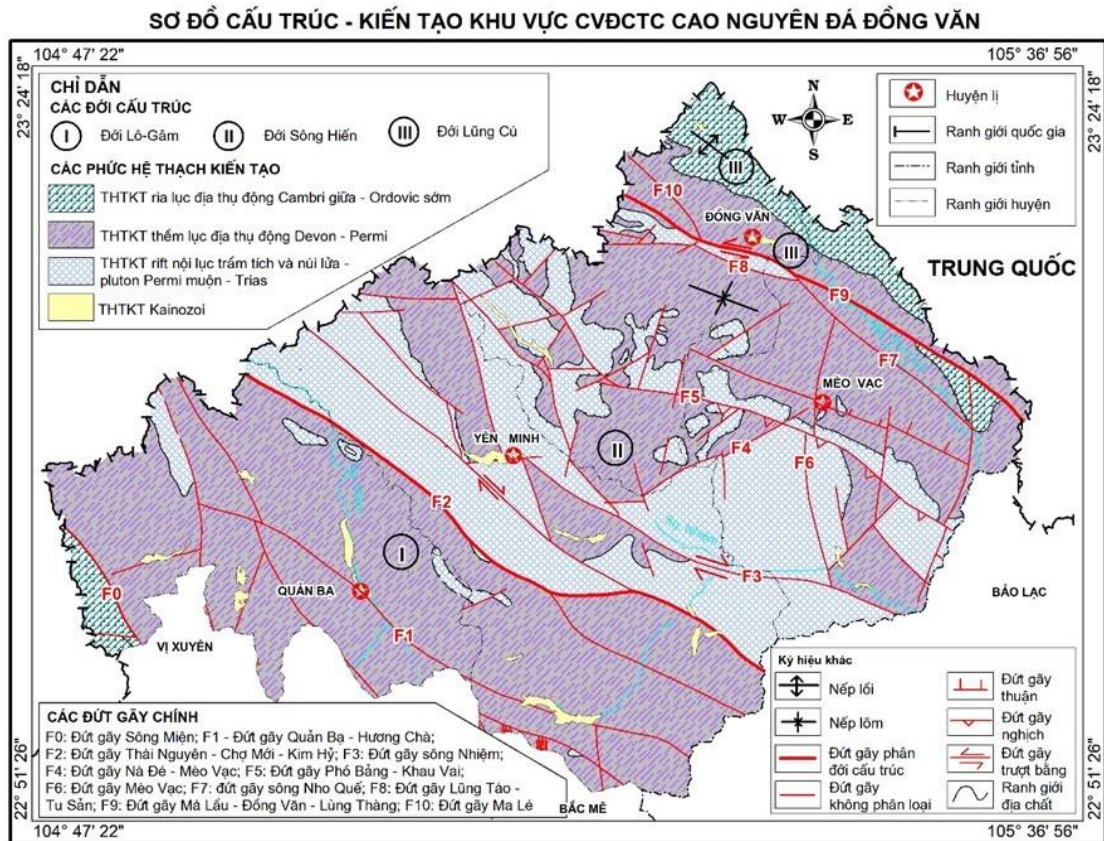
1.2.1. Đặc điểm địa chất

Xã Bạch Đích là một trong nhiều xã thuộc Công viên Địa chất Toàn cầu UNESCO Cao nguyên đá Đồng Văn, nằm trong khối cấu trúc Đông Bắc Bộ, có lịch sử phát triển kiến tạo từ giữa Paleozoi đến Kainozoi. Sự xuất hiện các đới trượt cắt – chồm nghịch biến dạng dẻo ở khu vực diễn ra ở các pha kiến tạo cổ nhất, trong giai đoạn Ordovic – Silur [Tran Thanh Hai và cs., 2013]. Trong Mesozoi, các trũng rift Sông Hiến được hình thành, cùng các pha biến dạng dẻo và dòn – dẻo kịch phát đến cuối Trias. Quá trình này xảy ra bởi quá trình kiến tạo Indosinia định hình cấu trúc địa chất vùng với các uốn nếp quy mô lớn [Tran Thanh Hai và cs., 2013]. Trong Kainozoi, hệ quả của quá trình xô húc hai mảng Ấn Độ và Á – Âu đã diễn ra các biến dạng dòn, biểu hiện là các đứt gãy trượt bằng trên các đứt gãy trước đó. Quá trình này hình thành nên cảnh quan địa hình nhiều đứt gãy và hệ thống karst nhiều đập vỡ của khu vực nghiên cứu [Nguyễn Văn Hướng và cs., 2016; Đỗ Thị Yến Ngọc và cs., 2022].

Cao nguyên đá Đồng Văn nằm trong trong tổ hợp phức nếp lồi Bắc Thái – Hạ Lang, phức nếp lồi Sông Gâm và trũng chõng Sông Hiến [Trần Trọng Huệ và cs., 2004], phân bố chủ yếu lần lượt ở khu vực huyện Đồng Văn, Quán Bạ và Yên Minh. Khu vực lựa chọn nghiên cứu nhà trình tường chi tiết là xã Bạch Đích, huyện Yên Minh nằm ở phía Tây Bắc của cao nguyên đá Đồng Văn, nằm trong đới cấu trúc kiến tạo Lô Gâm theo phương Tây Bắc – Đông Nam. Khu vực nghiên cứu nằm chủ yếu trong rift nội lục trầm tích và núi lửa pluton Permi muộn – Trias [Đỗ Thị Yến Ngọc và cs., 2022].

Cao nguyên đá Đồng Văn bị chia cắt bởi nhiều hệ thống đứt gãy, chủ yếu theo phương Tây Bắc – Đông Nam và có một số ít đứt gãy theo phương Đông Bắc – Tây Nam (Hình 1.2). Các hệ thống đứt gãy phương Tây Bắc – Đông Nam đóng vai trò chủ chốt trong định hình các cấu trúc địa chất của vùng. Hai đứt gãy phân khu vực theo ba đới cấu trúc là đứt gãy Thái Nguyên – Chợ Mới – Kim Hỷ và đứt

gãy Mã Lầu – Đồng Văn – Lũng Thàng (Hình 1.2). Các hệ thống đứt gãy phương Đông Bắc – Tây Nam ảnh hưởng không đáng kể đến kiến tạo và địa hình khu vực. Đới đứt gãy Yên Minh – Ngân Sơn – Phú Lương là đới đứt gãy chính được hình thành trong giai đoạn kiến tạo Indosinia, đây cũng là đứt gãy đi qua khu vực lựa chọn nghiên cứu chi tiết cho luận án.



Hình 1. 2 Sơ đồ cấu trúc - kiến tạo khu vực cao nguyên đá Đồng Văn
 [Nguồn: Đỗ Thị Yến Ngọc và cs., 2022]

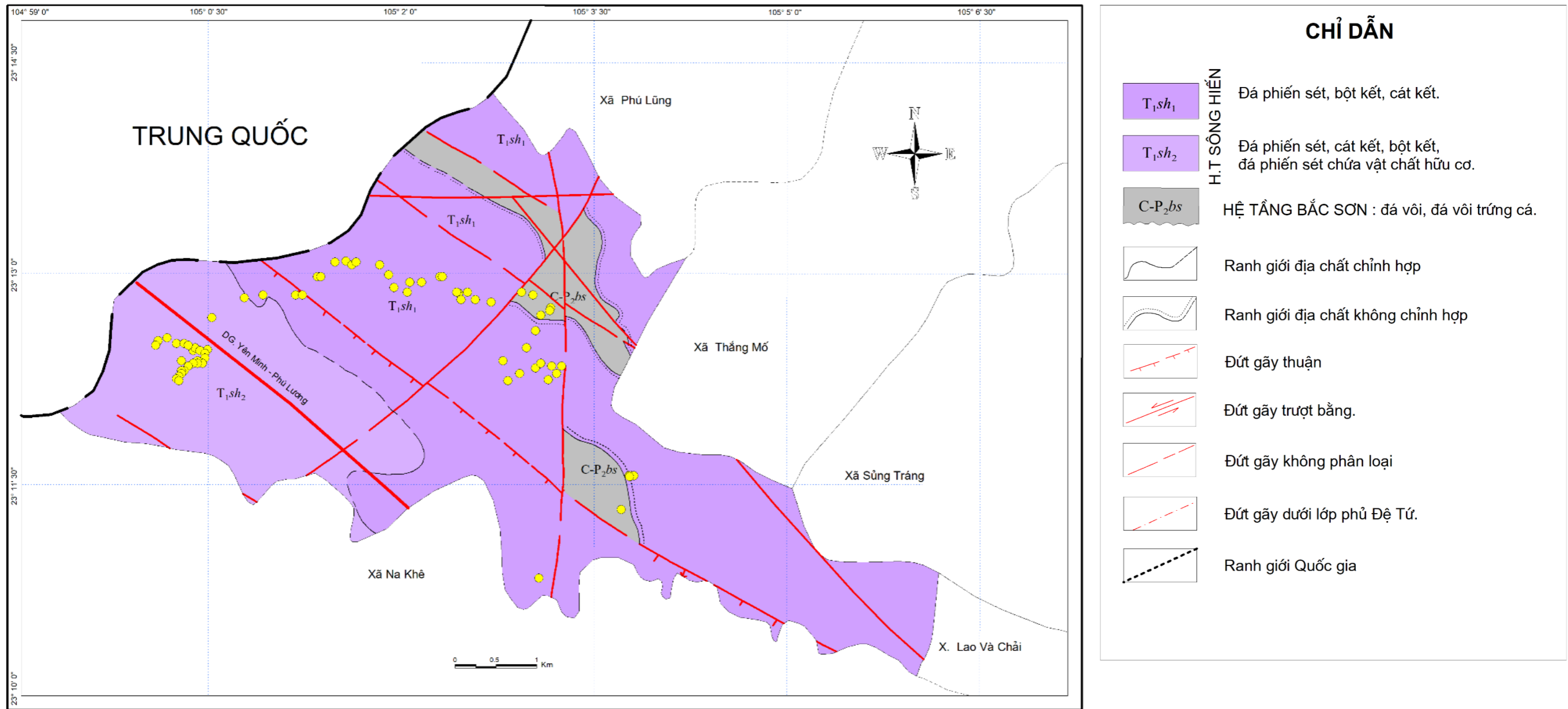
Xã Bạch Đích có địa hình chia cắt phức tạp, núi đá xen lẫn thung lũng, nhiều hệ thống đứt gãy lớn nhỏ đan xen nhau (Hình 1.3). Đứt gãy Yên Minh – Ngân Sơn – Phú Lương là đứt gãy phân chia các kiến trúc uốn nếp, là giới hạn phân cách của nếp lồi Bắc Thái – Hạ Lang và nếp lõm Sông Gâm. Đứt gãy này dài khoảng 430 km và đi qua khu vực xã Bạch Đích, xã Mậu Duệ (huyện Yên Minh) [Đặng Trần Huyền, 2009]. Đứt gãy được chia thành ba đoạn có phương khác nhau trong đó đoạn Yên Minh – Ngân Sơn có phương Tây Bắc – Đông Nam

dài 150 km đi qua khu vực xã Bạch Đích [Lê Duy Bách, 2016]. Dọc theo hai cánh của đứt gãy phát triển nhiều đứt gãy phụ quy mô lớn bé khác nhau. Đứt gãy Yên Minh – Phú Lương xuất hiện từ Paleozoi sớm và trải qua các hoạt động nén ép, chòem trượt của tổ hợp phức hệ nếp lồi, nếp lõm đến giai đoạn sau của Tân kiến tạo, nên đứt gãy đa dạng về các phương và hình thái khác nhau ở các đoạn khác nhau của đứt gãy. Đới đứt gãy này bị biến dạng với quy mô lớn có bề dày từ hàng trăm đến hàng nghìn mét, các đá bị biến dạng dẻo hoàn toàn, kéo theo sự xáo trộn kiến tạo, trầm tích, magma siêu mafic [Lê Duy Bách, 2016]. Sự đa dạng trong quá trình biến dạng của đới đứt gãy này tạo nên các tổ hợp thạch kiến tạo ngoại lai và nguồn gốc và thành tạo các đá của khối vây quanh. Đứt gãy Yên Minh – Phú Lương (Hình 1.3) là đứt gãy được dự đoán có thể dễ dàng tái hoạt động khi có điều kiện địa động lực thích hợp, được thể hiện rõ ở các dị thường địa hóa khí đất (Ra, CO₂, CH₄) dọc các đứt gãy, trượt lở ở khu vực đứt gãy đi qua [Trần Trọng Huệ và cs., 2004; Lê Duy Bách, 2016]. Dọc đứt gãy này đã ghi nhận một số trận động đất có cường độ ~ 5 độ richter [Lê Duy Bách, 2016].

Khu vực xã Bạch Đích gồm chủ yếu là các thành tạo lục nguyên xen carbonat thuộc hệ tầng Sông Hiến (**T_{1 sh}**) và hệ tầng Bắc Sơn (**C-P_{2 bs}**).

Hệ tầng Sông Hiến (**T_{1 sh}**): gồm các thành tạo lục nguyên, có nơi chứa các lớp đá phun trào axit dày ở dưới chân mặt cắt [Đặng Trần Huyền, 2009]. Mặt cắt Sùng Sừ - Bạch Đích thuộc hệ tầng Sông Hiến là mặt cắt của các thành tạo lục nguyên, nhưng không lộ ra đá phun trào, với thành phần chủ yếu bao gồm: đá phiến sét xám sẫm, phân lớp mỏng, đá phiến sét-vôi, bột kết vôi, cát kết tuf, tuf ryolit xám xen bột kết, đá phiến sét [Đặng Trần Huyền, 2009].

Hệ tầng Bắc Sơn (**C-P_{2 bs}**): gồm thành tạo carbonat là chủ yếu, nằm không chỉnh hợp dưới với hệ tầng Đồng Đăng (**P_{3c đđ}**). Đặc trưng của hệ tầng là các khối đá vôi lớn, bao gồm đá vôi màu xám sáng, hạt thô, phân lớp dày. Thành phần đá vôi chủ yếu là dolomit, một vài lớp chứa silic hoặc ỏ silic [Đoàn Nhật Trường, 2009].



Hình 1. 3 Sơ đồ địa chất xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang [Nguồn: Bản đồ địa chất miền Bắc Việt Nam tỷ lệ 1:500.000, Trần Đức Lương và Nguyễn Xuân Bao, 1977]

Vỏ phong hóa hình thành liên quan tới nhiều yếu tố khác nhau như đá gốc, địa hình, khí hậu, nước ngầm và thảm thực vật. Sản phẩm phong hóa trên các thành tạo lục nguyên xen carbonat ở khu vực xã Bạch Đích có thể là ferrosiallit xen lẫn terra rossa.

Vỏ phong hóa ferrosiallit (FeSiAl) có thành phần hóa học đặc trưng gồm SiO_2 , Al_2O_3 và Fe_2O_3 với tổng hàm lượng chiếm tới 80%. Tổ hợp khoáng vật tiêu biểu của vỏ phong hóa này gồm kaolinit – hydromica – goethit, kaolinit (goethit – gibsit), kaolinit – goethit – montmorilonit, và kaolinit – goethit – hydromica [Nguyễn Thành Vạn, 2009]. Tùy thuộc vào thành phần của đá gốc, địa hình núi cao, lượng mưa sẽ hình thành các tổ hợp khoáng khác nhau của vỏ phong hóa ferrosiallit.

Vỏ phong hóa terra rossa còn được xếp vào nhóm đất đỏ vàng, độ tơi xốp cao, khả năng thấm nước nhanh, độ ẩm đất từ 15 – 30%, màu nâu đỏ của vỏ phong hóa do sự tích tụ của nhiều sắt, hàm lượng mùn 1,36 – 1,91 % [Lê Thị Mỹ Hào và cs., 2020]. Vỏ phong hóa terra rossa được hình thành từ nhóm đá carbonat [Nguyễn Thành Vạn, 2009], cũng có thể được hình thành từ cặn không hòa tan của đá vôi, bụi đến từ quá trình phong hóa cơ học (do gió), vật liệu núi lửa, đá trầm tích [Durn, 2003; Aydinalp và FitzPatrick, 2009].

1.2.2. Đặc điểm địa hình - địa mạo

Địa hình ở khu vực xã Bạch Đích thuộc ba nhóm: (i) nhóm địa hình kiến tạo và cấu trúc bóc mòn; (ii) nhóm địa hình bóc mòn tổng hợp chủ yếu là các dạng địa hình bề mặt san bằng, bề mặt san bậc địa hình 400 – 950 m, các sườn bóc mòn và bóc mòn – xâm thực trên đá trầm tích lục nguyên; và (iii) nhóm địa hình karst.

Địa hình kiến tạo và cấu trúc bóc mòn khu vực nghiên cứu nằm trong ranh giới giao thoa giữa nếp lồi Bắc Thái – Hạ Lang và nếp lõm Sông Gâm. Các thành tạo địa chất cấu tạo nên phức nếp lõm Sông Gâm có rìa là các đá lục nguyên xen đá carbonat. Phần trung tâm là các khối đá carbonat thuộc hệ tầng Bắc Sơn (**C-P₂bs**) có tuổi Carbon – Permi. Phần rìa là các thành tạo lục nguyên của hệ tầng Sông

Hiển (**T₁ sh**) tuổi Trias có dạng lớp phủ lên trên hệ tầng Bắc Sơn (**C-P₂ bs**) [Tạ Hòa Phương và cs., 2010].

Nhóm địa hình bóc mòn tổng hợp trong khu vực nghiên cứu đã được xác định mức bề mặt san bằng có độ cao khác nhau cụ thể: (1) bậc 750 – 950 m tuổi Miocen muộn – Pliocen và (2) bậc 400 – 550 m tuổi Pliocen muộn [Tạ Hòa Phương và cs., 2010]. Đây là dạng địa hình gồm thành tạo chính là trầm tích lục nguyên của hệ tầng Sông Hiến (**T₁ sh**) và góp phần tạo nên nét mềm mại, uyển chuyển cho địa hình khu vực trên các đá trầm tích lục nguyên. Quá trình bóc mòn xâm thực trên trầm tích lục nguyên tạo nên kiểu sườn bóc mòn tổng hợp trên các đá trầm tích lục nguyên, sườn xâm thực – bóc mòn dọc theo các khe suối, sườn xâm thực và rửa trôi bề mặt [Tạ Hòa Phương và cs., 2010]. Địa hình này tạo nên do sự phối hợp của dòng chảy và quá trình sườn, tạo nên lớp trầm tích deluvi và lớp phủ đất thổ nhưỡng (ferrosiallit).

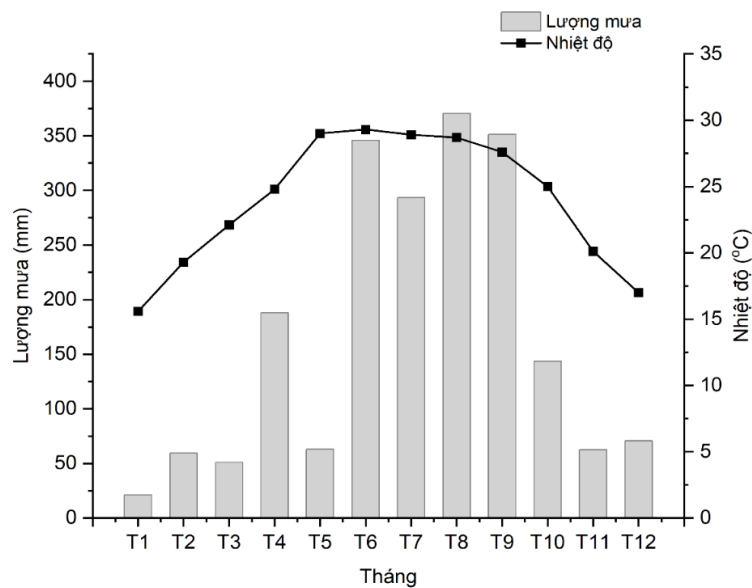
Nhóm địa hình karst tương đối phổ biến ở khu vực nghiên cứu với các dạng địa hình karst phổ biến trên đá vôi phân lớp dày, phân lớp mỏng và cả đá vôi dạng khối. Các nón karst do hệ tầng Bắc Sơn (**C-P₂ bs**) tạo thành có dạng nón karst cân đối, sườn trơn tru kiểu hoang mạc [Tạ Hòa Phương và cs., 2010]. Sự đa dạng về cảnh quan, địa hình – địa mạo ở khu vực còn được thể hiện bởi các phế u karst, thung lũng karst và cánh đồng karst. Dạng địa hình phế u karst có dạng vùng trũng thấp miệng gần tròn, phát triển theo phương thức phế u hòa tan hoặc phế u sập đổ. Các dạng phế u karst này đều có lớp phủ đất thổ nhưỡng (terra rossa), độ dày mỏng của lớp phủ phụ thuộc vào vị trí và dạng phát triển của phế u karst. Vùng trũng đáy các phế u karst hòa tan được người dân sử dụng với mục đích canh tác. Ở các phế u karst sập đổ thường phát triển ở khu vực núi đá carbonat, có độ sâu lớn, và đáy phế u karst dạng này thường là các mảnh vụn đá carbonat [Tạ Hòa Phương và cs., 2010]. Đây là khu vực người dân địa phương lựa chọn canh tác nông nghiệp phổ biến nhất.

1.2.3. Đặc điểm thủy văn

Xã Bạch Đích có 3 nhánh suối chính chảy qua, theo hướng từ các xã Phú Lũng, Thắng Mố và Đông Sao, tập trung về trung tâm xã và đổ ra sông Miện [Phạm Xuân Phương và cs., 2017]. Do đặc điểm địa hình dốc, mùa mưa các con suối đều chảy xiết có thể gây sạt lở, ngược lại mùa khô suối cạn gây thiếu nước cung cấp cho sinh hoạt và canh tác cho người dân trong xã.

1.2.4. Đặc điểm khí hậu

Xã Bạch Đích nằm trong khu vực có kiểu khí hậu nhiệt đới gió mùa. Mùa hè tương ứng với mùa mưa, thời tiết nóng ẩm mưa nhiều kéo dài từ tháng 5 đến tháng 10, đỉnh điểm là tháng 7. Mùa đông tương ứng với mùa khô, thời tiết lạnh giá ít mưa kéo dài từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau (hình 1.4) [Phạm Xuân Phương và cs., 2017; Niên giám thống kê tỉnh Hà Giang, 2022]. Theo niên giám thống kê tỉnh Hà Giang năm 2022, nhiệt độ trung bình dao động trong khoảng 20 – 30 °C, nhiệt độ chênh lệch ngày đêm lớn. Khí hậu khu vực xã Bạch Đích khắc nghiệt, có nhiều biến động thất thường, mưa đá, băng giá, ... ảnh hưởng đến sinh hoạt và sản xuất của người dân sinh sống nơi đây.



Hình 1. 4 Biểu đồ nhiệt độ và lượng mưa trung bình khu vực cao nguyên đá Đồng Văn [Nguồn: Niên giám thống kê tỉnh Hà Giang, 2022]

1.2.5. Đặc điểm kinh tế - xã hội

Theo niên giám thống kê huyện Yên Minh, tính đến 31/12/2021, dân số xã Bạch Đích có 3.772 người trên tổng 814 hộ, mật độ dân số 130 người/km², số người trong độ tuổi lao động là 2.325 [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Xã Bạch Đích, gồm 19 thôn, là nơi sinh sống của 12 dân tộc trong đó dân tộc Nùng chiếm ~ 63%, dân tộc Dao chiếm ~ 23% [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022].

Mỗi dân tộc đều có nét văn hóa đặc trưng riêng dựa trên đặc điểm điều kiện tự nhiên để thích ứng. Một thôn bản có thể có một hoặc nhiều dân tộc và mang nét đặc trưng của dân tộc chiếm phần lớn. Theo phong tục tập quán, mỗi hộ dân thường có 2 – 3 thế hệ cùng sinh sống. Hầu hết, cuộc sống của người dân đều gắn liền với nông nghiệp và tập quán tự cung tự cấp. Trẻ em sau khi sinh ra (khoảng 3 – 4 tháng) đã được các bà, các mẹ địu trên lưng đi làm nương. Trẻ em từ 4 – 6 tuổi được đi học tại các điểm trường mầm non thôn, bản, xã. Các lớp học mầm non trong thôn, bản thường chỉ tổ chức học một buổi sáng. Buổi chiều, trẻ thường chơi gần nhà hoặc theo bố mẹ lên nương. Trẻ từ 6 – 15 tuổi được đi học bán trú hoặc nội trú tại các điểm trường tập trung ở trung tâm xã. Do điều kiện kinh tế và cơ sở vật chất còn nhiều khó khăn, trẻ em độ tuổi đi học thường bỏ học. Tỉnh kết hợp với xã đã đưa ra một số chính sách nhằm khuyến khích trẻ đến trường. Trên địa bàn toàn xã Bạch Đích tính đến năm 2021 có 01 trường mầm non (11 lớp), 01 trường tiểu học (15 lớp) và 01 trường trung học cơ sở (8 lớp) [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Số học sinh trung bình các cấp theo các năm có xu hướng tăng từ năm học 2017 – 2018 đến 2020 – 2021 [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022].

Một số thôn bản vẫn còn tồn tại tục lệ tảo hôn, nữ giới nhiều hơn nam giới. Do kinh tế khó khăn, vấn nạn tảo hôn và kế hoạch hóa gia đình vẫn còn là bài toán khó cho cán bộ quản lý. Tảo hôn và sinh nhiều con trong một gia đình đều nhằm tăng lực lượng lao động. Vì vậy, độ tuổi lao động của người dân khu vực nghiên

cứu thường từ 15 – 60 tuổi. Tuổi thọ trung bình của dân số toàn tỉnh Hà Giang năm 2021 là 68,8 tuổi, trong đó tuổi thọ nữ giới (71,8 tuổi) cao hơn nam giới (65,9 tuổi). Người già (> 60 tuổi) đa phần nghỉ ngơi trong nhà, ít khi ra ngoài. Tùy vào từng dân tộc, nghi thức mai táng người chết sẽ được thực hiện khác nhau.

Tính đến 31/12/2021, tỷ lệ hộ nghèo của xã Bạch Đích là 45,97%, số hộ cận nghèo là 76 hộ, số hộ thoát nghèo là 65 hộ [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Tỷ lệ người dân được sử dụng nước hợp vệ sinh tại xã tính đến năm 2021 mới có 705 hộ (~ 86%), 100% các hộ trong xã đã có điện để sử dụng [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Đường giao thông liên xã, liên thôn đã được mở rộng và bê tông hóa các trục đường chính, tuy nhiên một số thôn giáp biên giới vẫn đang sử dụng đường đất. Do đặc thù địa hình dốc, vào mùa mưa, hiện tượng sạt lở thường phổ biến, dẫn đến ảnh hưởng đường giao thông, gây nhiều khó khăn cho đời sống và sản xuất của người dân.

Nông nghiệp và lâm nghiệp là phương thức kinh tế chính của xã Bạch Đích. Diện tích gieo trồng lúa năm 2021 của toàn xã là 206,82 ha, với năng suất 60,44 tạ/ha, sản lượng lúa đạt 1.250,08 tấn [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Bạch Đích là xã có sản lượng lúa bình quân đầu người cao nhất huyện Yên Minh với 331 kg/người/năm. Ngoài trồng lúa, các loại cây như ngô cũng được gieo trồng xen canh nhằm cung cấp thức ăn chăn nuôi và sản xuất rượu. Diện tích trồng ngô năm 2021 của xã là 237 ha, đạt năng suất 37,36 tạ/ha với sản lượng 885,50 tấn [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Không chỉ có cây lương thực, người dân xã Bạch Đích cũng trồng các cây lâu năm như cây chè, với tổng diện tích là 125,53 ha và sản lượng đạt 390,06 tấn [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022]. Từ năm 2017 đến 2021, hoạt động chăn nuôi ở xã có sự thay đổi, với tổng gia súc có xu hướng giảm và chăn nuôi gia cầm tăng. Xã Bạch Đích có diện tích rừng 1.290,10 ha trong đó có 928,20 ha rừng trồng và 361,90 ha rừng tự nhiên [Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022].

1.2.6. Nhà trình tường

Nhà được xây dựng trực tiếp từ đất, bùn kết hợp với rom, rạ, lá khô, tre nứa đã có từ rất lâu đời và xuất hiện ở nhiều nơi trên thế giới. Ở các nước có nền kinh tế khó khăn và khí hậu khắc nghiệt như Châu Phi, Châu Mỹ vẫn đang sử dụng phổ biến các ngôi nhà được xây dựng từ bùn, đất. Phụ thuộc vào điều kiện tự nhiên, phong tục tập quán ở từng địa phương, nhà được xây dựng từ bùn, đất sẽ có các kiểu kiến trúc khác nhau (Hình 1.5a). Kiểu nhà này có chi phí xây dựng thấp, thân thiện với môi trường do ít phát thải các chất gây ô nhiễm trong quá trình xây dựng, chẳng hạn như gián tiếp làm giảm lượng khí thải carbon thoát ra do không sử dụng các vật liệu phải qua chế biến (gạch nung, xi măng, cốt thép, ...). Hơn nữa, bùn, đất là vật liệu dồi dào trong tự nhiên, thường có sẵn tại nơi xây dựng, nên tiết kiệm được chi phí vận chuyển. Loại nhà được xây dựng từ bùn, đất thường có nhiều kiểu kiến trúc khác nhau do dễ tạo hình và tường dày, có khả năng giữ nhiệt tốt (có thể giữ ấm vào mùa đông và mát vào mùa hè), giúp tiết kiệm năng lượng. Tuy nhiên, kiểu nhà này có nhược điểm lớn bắt buộc khắc phục để đảm bảo tính bền vững của ngôi nhà là phải có hệ thống thoát nước tốt. Trong điều kiện độ ẩm cao, kết cấu tường bùn, đất bị yếu và dễ bị đổ sập. Với xu hướng tận dụng vật liệu xây dựng xanh, ngày nay ở các nước phát triển như Pháp, Anh, Mỹ, Ấn Độ đã và đang tiếp tục sử dụng bùn, đất để làm xây dựng các công trình kiến trúc phục vụ đời sống người dân và khai thác du lịch (Hình 1.5b).

Ở Việt Nam, nhà được xây dựng từ bùn, đất có nhiều tên gọi khác nhau tùy thuộc vào tổ hợp vật liệu tự nhiên làm nhà và người dân địa phương sử dụng. Nhà vách đất là kiểu nhà có khung bằng tre nứa và tường bằng đất bùn trộn với rom rạ. Kiểu nhà này phổ biến ở các vùng đồng bằng và có nền nông nghiệp dựa vào trồng lúa, tuy nhiên hiện nay rất ít nơi còn sử dụng loại nhà này. Nhà trình tường là kiểu nhà được xây dựng trực tiếp từ bùn đất, với tường được tạo hình bằng cách nén chặt hỗn hợp đất, bùn, nước và các tường nhà liên kết với nhau bằng cốt tre.



Hình 1. 5 Kiến trúc nhà được xây dựng từ bùn, đất ở Togo, Châu Phi (a) và ở Thiruvananthapuram, Ấn Độ (b)

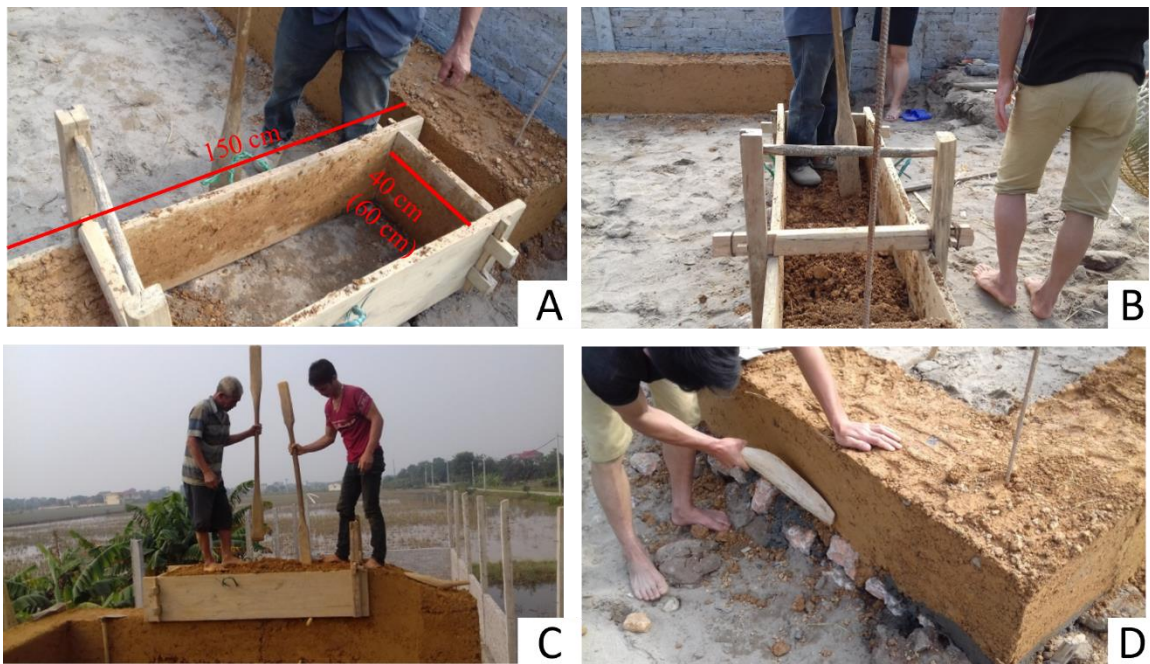
[Nguồn: <https://grantforsyth.blogspot.com/2011/05/togo-earthen-castles.html>; <https://timesofindia.indiatimes.com/city/thiruvananthapuram/mud-houses-are-the-new-fad-in-the-capital/articleshow/64116032.cms>]

Nhà trình tường là kiểu nhà phổ biến của cộng đồng dân tộc thiểu số ở vùng núi phía Bắc Việt Nam, đồng thời cũng là kiểu nhà phổ biến của dân tộc Nùng và dân tộc Dao ở xã Bạch Đích. Người dân lựa chọn đất tại chỗ làm vật liệu xây dựng nhà ở là do điều kiện khó khăn về cơ sở vật chất - kinh tế và do phong tục tập quán của mỗi dân tộc. Từ xa xưa, người dân cho rằng nhà trình tường là ngôi nhà thích hợp với khí hậu ở vùng núi cao, nhiều thú dữ, có thể giữ ấm vào mùa đông và làm mát vào mùa hè. Nhà trình tường của mỗi cộng đồng dân cư đều mang một nét đặc trưng kiến trúc, phản ánh được bản sắc văn hoá của mỗi dân tộc. Cùng với sự hình thành và phát triển của Công viên Địa chất toàn cầu UNESCO Cao nguyên đá Đồng Văn, nhà trình tường được công nhận là di sản văn hóa, cần được bảo tồn và phát triển.

Đi kèm với vật liệu xây dựng là đất tại chỗ, dụng cụ để xây dựng nhà trình tường đều đơn giản, dễ tìm và gắn liền với đời sống của người dân như cuốc, xẻng, ván gỗ, thanh gỗ, ... Đất làm vật liệu xây dựng nhà thường được chọn là tầng đất ở độ sâu 1 – 2 m (lớp đất trên bề mặt phổ biến là đất mùn); được đánh toi và loại bỏ rễ cây, sỏi, đá to, cỏ rác; trộn thêm với nước để tạo độ kết dính và được nén vào trong khuôn tường (làm từ ván gỗ) (Hình 1.6). Đất sau khi được trộn với nước được thực hiện trình tường (nén đất vào khuôn tường làm bằng ván gỗ) ngay để

tránh tình trạng vón cục và khô bề mặt, khó nén ép. Đất sử dụng làm nhà trình tường phải có độ tơi xốp và kết dính tốt khi trộn nước, thì quá trình nén ép để xây dựng nhà mới có thể tạo được bức tường vững chắc. Người dân sử dụng các tấm ván gỗ có kích thước 150*40 (hoặc 60)*60 cm làm khuôn để đổ đất trình tường (Hình 1.6A). Đất được cuốc ra một mặt phẳng, đánh tơi và trộn với lượng nước thích hợp, đổ vào trong khuôn (Hình 1.6B), dùng các khúc gỗ có đầu tù lớn để nén, ép (Hình 1.6C). Người dân sử dụng một thanh gỗ có bề mặt nhẵn bóng để đập, miết tạo độ nhẵn bóng cho bề mặt tường (Hình 1.6D). Nhà trình tường sau khi được hoàn thiện phần tường và nền, cần thời gian khoảng 10 – 15 ngày để tường đất ổn định cấu trúc và bề mặt trước khi lợp mái và lắp cửa.

Nhà trình tường của dân tộc Nùng ở xã Bạch Đích (Hình 1.7) có kiến trúc một tầng, tường cao khoảng 2,5 - 3 m, với một cửa chính thấp, một cửa phụ (thường liên thông với bếp) và hai cửa sổ nhỏ. Nhà có kiến trúc xây dựng đối xứng gồm ba gian: gian giữa được sử dụng sinh hoạt chung và là nơi thờ cúng gia tiên; hai gian bên được sử dụng để đặt giường ngủ và một số đồ dùng sinh hoạt. Người Nùng xây dựng khu bếp nấu ngay sát nhà ở, thông với nhau qua một cửa phụ. Giường ngủ thường được đặt ở các góc của gian hai bên và sát tường, được ngăn với không gian chung trong nhà bằng các tấm vải quây. Ở xã Bạch Đích, mái nhà trình tường được lợp bằng ngói âm dương và/hoặc tấm fibro xi măng tùy theo điều kiện kinh tế của từng gia đình. Theo phong tục tập quán, trước cửa chính mỗi ngôi nhà của người Nùng thường dán một tấm giấy màu đỏ với hy vọng mang lại may mắn.



Hình 1. 6 Các bước làm nhà trình tường



Hình 1. 7 Nhà trình tường ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang

1.3. Lịch sử nghiên cứu

1.3.1. Trên thế giới

Radon là khí phóng xạ có bức xạ chiếm ~ 50% tổng năng lượng phóng xạ có nguồn gốc từ tự nhiên ảnh hưởng đến cơ thể sống [UNSCEAR, 2000]. Nghiên

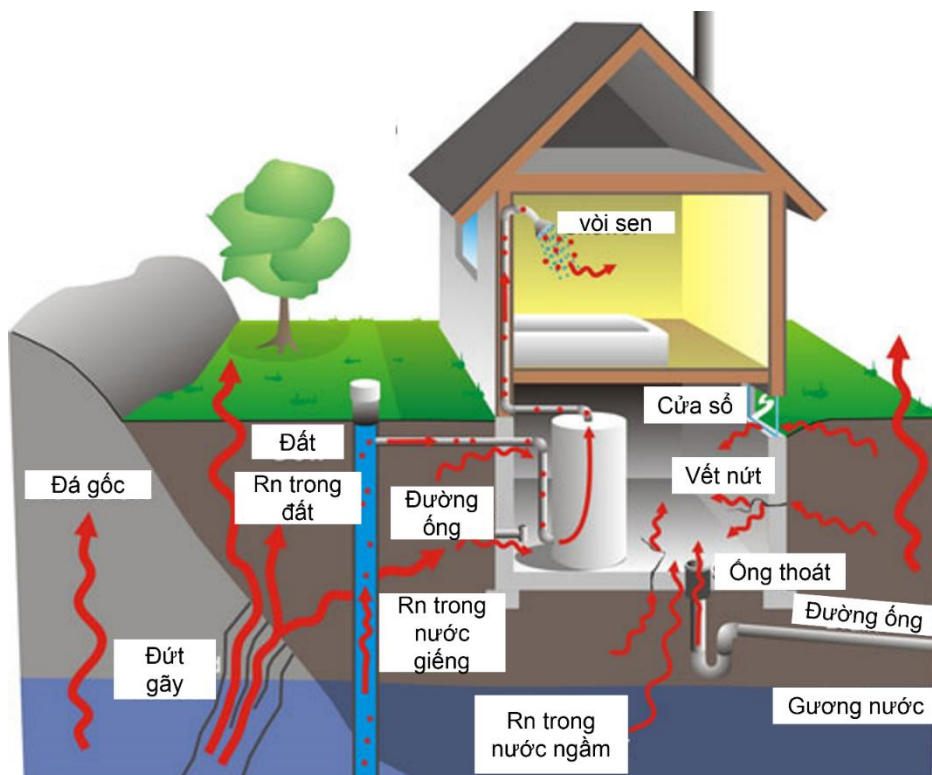
cứu về khí radon được nhiều nhà khoa học trong các lĩnh vực khác nhau tiếp cận nghiên cứu theo các cách khác nhau. Đặc điểm, hành vi và ảnh hưởng của khí radon và các sản phẩm phân rã của chúng đến các kiểu môi trường đã được thực hiện nghiên cứu trên thế giới [Guo và cs., 1992; Gunn, 2003; IAEA, 2004; Gabdo, 2016; Meisenberg và cs., 2017]. Khí radon tồn tại ở mọi nơi, trong mọi môi trường (rắn, lỏng, khí). Trong môi trường mở (như không khí ngoài trời), khí radon khi thoát vào môi trường không khí nhanh chóng bị phân tán, làm giảm nồng độ khí radon và gần như không ảnh hưởng đến sinh vật sống. Tuy nhiên, khí radon có đặc tính tích lũy, ở trong các môi trường kín (như hầm lò, hang động, nhà ở) khí radon trong không khí sẽ tích tụ với nồng độ cao và có thể gây nguy cơ phơi nhiễm cho người tiếp xúc [Gunn, 2003]. Con người khi tiếp xúc khí radon ở nồng độ cao trong thời gian dài có thể ảnh hưởng đến sức khỏe, đặc biệt là cơ quan hô hấp [WHO, 2009]. Trên thế giới, các nghiên cứu về khí radon trong môi trường không khí nhà ở của nhiều loại nhà được xây dựng từ các loại vật liệu khác nhau (như vật liệu đất, bê tông hiện đại, gạch nung, gỗ, ...) đã được tiến hành nghiên cứu [Guo và cs., 1992; Zhou, 2001; Hewamanna, 2001; Popit và Vaupotic, 2002]. Kiểu nhà được xây dựng trực tiếp từ đất, bùn cho thấy có nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà ở lớn hơn so với các ngôi nhà được xây dựng bằng vật liệu gạch nung, sắt, thép, ... [Guo và cs., 1992].

Sự thoát và phân bố khí radon vào môi trường không khí nhà ở bị tác động bởi nhiều yếu tố như thành tạo địa chất, thành phần và tính chất vật liệu xây dựng, khí hậu, ... (Hình 1.8) [Zhou, 2001; Ahmed, 2005; Sakoda và cs., 2010]. Trong các loại đá gốc magma axit (granit, dacit, rhyolit, ...), đá gneiss và đá trầm tích thường có hàm lượng urani và thori cao hơn trong các loại đá khác. Do đó, nồng độ khí radon chứa trong các loại đá magma axit, đá gneiss và đá trầm tích cao hơn các loại đá khác [Choubey và Ramola, 1997; Neal, 2016]. Mặc dù đá magma axit có chứa lượng urani và thori lớn hơn các loại đá khác, nhưng do đặc tính cấu trúc dạng khối, đặc sít nên có thể ngăn chặn đường dẫn khí radon từ dưới sâu lên trên

bề mặt khí quyển. Các ngôi nhà được xây dựng trên nền đá có độ rỗng và tính thấm cao, nhiều đứt gãy và đập vỡ (như đá carbonat) thường có nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà ở cao hơn so với đá gốc dạng khối đặc sít (như đá granit) [Narula và cs., 2009; Chauhan, 2011; Stephanie và cs., 2016]. Điều này được giải thích ở nền đá có nhiều đập vỡ, đứt gãy, tính thấm và độ rỗng cao là đường dẫn khí radon từ dưới sâu đi lên phía trên bề mặt trái đất và thoát vào môi trường không khí. Khí radon từ sâu dưới đất theo các dòng khí (CO_2 , CH_4 , hơi nước) đi lên trên bề mặt và thoát vào môi trường không khí theo định luật Fick [Etiope và Martinelli, 2002; Gabdo, 2016]. Ranh giới giữa lớp trầm tích deluvi, tầng đất thổ nhưỡng và đá carbonat được cho là khu vực khí radon dễ dàng di chuyển tự do [Stephanie và cs., 2016]. Khí radon theo các đứt gãy, đập vỡ của nền móng, hoặc nguồn nước ngầm đi vào trong môi trường không khí nhà ở. Các ngôi nhà có tuổi thọ lớn có xuất hiện các vết nứt nền móng và tường nhà, thường có nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà cao hơn các ngôi nhà mới xây [Kanokkan và cs., 2015; Popit và Vaupotic, 2002; Neal, 2016].

Khí radon cũng có thể thoát vào môi trường không khí nhà ở từ các mỏ khoáng sản (như mỏ đất hiếm, mỏ than), các nhà máy sử dụng năng lượng hạt nhân làm nguyên liệu [Popit và Vaupotic, 2002; Ramachandran, 2010]. Ở khu vực khai thác mỏ đất hiếm, mỏ than hay các nhà máy sử dụng năng lượng hạt nhân làm nguyên liệu sản xuất, nồng độ khí radon trong môi trường không khí thường cao vượt ngưỡng khuyến cáo. Do vậy, nồng độ khí radon trong nhà ở các khu vực đó có xu hướng cao, bắt nguồn từ sự di chuyển từ không khí ngoài trời vào trong nhà. Mặt khác, quá trình khuếch tán khí radon chịu ảnh hưởng của độ xốp và tính thấm của đất, đá trong khu vực xây dựng nhà. Độ xốp của đất, đá được xác định là lượng không gian trống giữa các hạt, quyết định sự di chuyển của khí radon. Độ thấm của đất, đá được xác định là mức độ mà chất lỏng có thể đi qua chúng. Như vậy, các loại đất, đá có độ xốp và tính thấm cao (đất thổ nhưỡng, đá carbonat) tạo điều kiện cho khí radon khuếch tán tốt hơn các loại đá có độ xốp và tính thấm thấp

hơn (đất sét, đá phiến sét) [Narula và cs., 2010; Leonel và cs., 2023]. Các kết quả nghiên cứu trên đều cho thấy thành tạo địa chất nền có ảnh hưởng đến nồng độ và sự phân bố khí radon trong môi trường không khí nhà ở.



Hình 1. 8 Đường di chuyển của khí radon thoát vào môi trường không khí trong nhà.

Sự thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà còn chịu ảnh hưởng của khí hậu. Sự thay đổi nhiệt độ và độ ẩm làm thay đổi áp suất không khí giữa môi trường trong và ngoài nhà, tác động lên bề mặt nguồn thoát khí (nền đất đá, sàn nhà, tường nhà, ...) vào môi trường không khí trong nhà [Chauhan, 2011; Cuezva và cs., 2011; Szabó và cs., 2013]. Khi nhiệt độ không khí tăng và độ ẩm giảm, thể tích chỗ trống trên bề mặt nguồn thoát khí tăng lên, làm giảm chỗ chứa các phân tử nước, tăng khả năng trao đổi khí, tạo điều kiện cho khí radon thoát ra ngoài môi trường không khí. Ngược lại, khi nhiệt độ không khí giảm và độ ẩm tăng, hệ thống khe nứt và chỗ trống trong vật liệu rắn (nguồn thoát khí) có xu hướng được lấp đầy các “hạt” nước (tiến tới trạng thái bão hòa nước), “bịt” kín đường di chuyển của khí radon từ nguồn thoát. Lúc này, khí radon hầu như bị giữ

lại trong nguồn thoát, khó có thể thoát ra ngoài môi trường không khí. Cơ chế này giải thích cho việc nồng độ khí radon trong nhà tăng cao vào mùa có kiểu thời tiết nóng khô và giảm vào mùa có kiểu thời tiết lạnh ẩm [Chauhan, 2011; Cuezva và cs., 2011; Szabó và cs., 2013]. Sự chênh lệch áp suất không khí cũng tạo ra hiệu ứng “ống khói” và thay đổi chiều khuếch tán và di chuyển của khí radon từ nguồn thoát khí vào môi trường không khí trong nhà (Hình 1.9) [Jordan, 2024]. Khi nhiệt độ ngoài trời thấp hơn trong nhà, không khí lạnh bên ngoài có xu hướng di chuyển vào trong nhà ở tầng thấp, làm giảm sự khuếch tán khí radon từ nguồn thoát khí vào môi trường không khí trong nhà. Mặt khác, theo nguyên lý đối lưu, nóng đi lên, lạnh đi xuống, khí radon đã tích tụ trong môi trường không khí trong nhà trước đó có thể thoát ra ngoài trời theo không khí nóng trong nhà qua hiệu ứng “ống khói”. Như vậy, khi nhiệt độ ngoài trời thấp hơn nhiệt độ trong nhà, nồng độ khí radon trong nhà thấp hơn do nguồn cung cấp khí bị giảm và khí radon trong môi trường không khí trong nhà thoát ra ngoài.

Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng chỉ ra sự thoát khí radon có liên quan trực tiếp đến thành phần của vật liệu tạo thành nên nguồn thoát khí. Khí radon là sản phẩm phân rã của nguyên tố phóng xạ mẹ - đồng vị radi. Sự phân bố của nguyên tố radi trên bề mặt vật liệu rắn cũng ảnh hưởng đến khả năng thoát khí radon ra ngoài môi trường không khí. Hàm lượng radi trong vật liệu có xu hướng tỷ lệ nghịch với kích thước hạt vật liệu. Các nguyên tố radi thường tồn tại dưới dạng hấp phụ trên bề mặt các hạt vật liệu. Các hạt vật liệu có kích thước càng nhỏ thì diện tích bề mặt hạt càng lớn [Sakoda và cs., 2010], khả năng hấp phụ radi trên bề mặt càng cao kéo theo sự phân rã ra sản phẩm khí radon thoát vào môi trường không khí càng lớn. Nguyên tố radi tồn tại ở trạng thái hấp phụ trên bề mặt các hạt khoáng vật sét và hydroxit sắt [Miklyaev và Petrova, 2011]. Tuy nhiên, quá trình phân rã các nguyên tố radi có thể tạo ra năng lượng, gây sai hỏng cấu trúc điểm của một số khoáng vật sét (kaolinit, dickit, montmorillonit và illit) kèm theo sự thoát khí radon [Allard và Calas, 2009]. Các khoáng vật sét và oxit sắt được

hình thành từ quá trình phong hóa đá magma, có sự biến đổi của plagioclas và/hoặc feldspar thành sericit, làm tăng hàm lượng urani (U^{6+}) bằng cách hấp phụ urani khi quá trình biến đổi diễn ra. Bên cạnh đó, thori (Th^{4+}) cũng xuất hiện trong các oxit sắt vô định hình, di chuyển và kết tủa giống như sắt [Edsfeldt, 2001]. Radi và thori là các nguyên tố phóng xạ mẹ phân rã ra đồng vị khí radon. Do đó, hàm lượng radi và thori trong vật liệu có thể ảnh hưởng đến hàm lượng khí radon trong môi trường không khí [Cinelli và cs., 2019].



Hình 1. 9 Khí radon di chuyển trong môi trường không khí trong nhà khi nhiệt độ ngoài trời thấp hơn trong nhà.

1.3.2. Ở Việt Nam

Khí radon là đối tượng được thực hiện trong nhiều nghiên cứu ở Việt Nam. Khí radon được nghiên cứu trong môi trường khí đất, nước, không khí ngoài trời và môi trường không khí trong nhà ở. Các nghiên cứu khí radon ở Việt Nam được thực hiện gián tiếp bằng film: CR-39 và LR 115 và/hoặc thiết bị khảo sát trực tiếp: RAD7 và SARAD GmbH EQF3220.

Nghiên cứu radon trong khí đất đã được thực hiện ở nhiều nơi: một số tỉnh miền núi phía Bắc, thành phố Hồ Chí Minh, Thừa Thiên Huế và Ninh Thuận [Trần Trọng Huệ và cs., 2004; Huynh Nguyen Phong Thu và cs., 2018, 2019; Pham Tich Xuan và cs., 2020]. Các nghiên cứu này đều tập trung chủ yếu vào đồng vị khí Rn-222 trong môi trường khí đất. Kết quả khảo sát khí radon nhằm đánh giá ô nhiễm phóng xạ cho thấy môi trường không khí ở khu vực có các mỏ xạ hiếm và có các đới đứt gãy đang hoạt động (như Hà Giang, Lai Châu, Lào Cai, Yên Bái và Phú Thọ) có nguy cơ cao [Trần Trọng Huệ và cs., 2004]. Nồng độ radon trong khí đất biến động ở các vị trí khác nhau: ở Thừa Thiên Huế $10 \text{ Bq/m}^3 - 144.570 \text{ Bq/m}^3$, trung bình $\sim 3.605 \text{ Bq/m}^3$ [Pham Tich Xuan và cs., 2020]; ở Ninh Sơn – Ninh Thuận $\sim 1.000 \text{ Bq/m}^3$ và ở Hồ Chí Minh $11.500 \text{ Bq/m}^3 - 15.600 \text{ Bq/m}^3$ [Huynh Nguyen Phong Thu và cs., 2018, 2019]. Có thể thấy khả năng thoát khí radon ở mỗi loại đất có thành phần vật chất khác nhau là không giống nhau.

Khí radon trong môi trường không khí ngoài trời và trong nhà cũng được chú ý nghiên cứu ở khu vực các mỏ khoáng sản (khu vực khai thác, chế biến, bãi thải và lân cận) nhằm đánh giá nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe của người lao động và người dân sinh sống trong vùng và lân cận [Dang Duc Nhan và cs., 2012; Bui Dac Dung và cs., 2013, 2014; Le Khanh Phon và cs., 2015]. Ở khu vực mỏ đất hiếm Lai Châu, nồng độ đồng vị khí Rn-222 môi trường không khí trong nhà có xu hướng thấp hơn ngoài trời, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong nhà $\sim 150 \text{ Bq/m}^3$, và nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong nhà $\sim 50 \text{ Bq/m}^3$ [Le Khanh Phon và cs., 2015]. Kết quả khảo sát nồng độ của cả 2 đồng vị khí radon cho thấy khả năng người dân trong khu vực có thể chịu nguy cơ rủi ro khi tiếp xúc trong thời gian dài [Le Khanh Phon và cs., 2015]. Ở khu vực khai thác và chế biến cát ở Hà Tĩnh, nồng độ đồng vị khí Rn-222 và Rn-220 trong môi trường không khí trong nhà máy lần lượt là 28 Bq/m^3 và 147 Bq/m^3 [Bui Dac Dung và cs., 2014]. Trên cơ sở đó, liều chiếu hiệu dụng đã được tính toán, và đề xuất khuyến cáo nhằm đảm bảo an toàn cho người lao động.

Khí radon trong môi trường không khí nhà ở còn được thực hiện nghiên cứu dựa trên nồng độ hoạt độ phóng xạ của vật liệu xây dựng [Le Nhu Sieu và cs., 2011; Bui Van Loat và cs., 2023; Le Quang Vuong và cs., 2023]. Ảnh hưởng của khí hậu đến nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà ở lần đầu được thực hiện tại thành phố Đà Lạt, nơi có 4 kiểu thời tiết trong một ngày [Le Viet Huy và cs., 2018]. Các nghiên cứu trên xác định được nồng độ đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220) trong môi trường không khí nhà ở. Một vài nghiên cứu cũng đã tính toán được liều hiệu dụng hàng năm đối với người dân sinh sống trong khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên, khảo sát khí radon trong môi trường không khí nhà ở trước đây mới dừng lại ở khảo sát một số điểm trong nhà, chưa nghiên cứu chi tiết theo không gian cụ thể. Nghiên cứu của Le Viet Huy và cộng sự [2018] xác định các yếu tố ảnh hưởng của khí hậu đến nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà ở.

Hiện trạng khí radon trong các kiểu môi trường (không khí ngoài trời, khí đất, không khí trong hang động, không khí trong nhà) ở khu vực đá vôi, ví dụ như cao nguyên đá Đồng Văn, tỉnh Hà Giang được thực hiện nghiên cứu từ những năm đầu thế kỷ 21 [Trần Trọng Huệ và cs., 2004; Nguyễn Thùy Dương và cs., 2016; Đặng Thị Phương Thảo và cs., 2016; Nguyen Thi Anh Nguyet và cs., 2018; Bùi Văn Đông và cs., 2022]. Khí radon trong môi trường không khí ngoài trời có nồng độ cao ở khu vực mỏ khai thác antimon Mậu Duệ, huyện Yên Minh [Bùi Văn Đông và cs., 2022]. Ở khu vực huyện Đồng Văn, nồng độ khí radon tập trung cao ở các hố sụt và trong nhà trình tường [Đặng Thị Phương Thảo và cs., 2016]. Các hang động khu vực cao nguyên đá Đồng Văn đưa vào khai thác du lịch, nồng độ khí radon trong hang của các hang động có kiểu kiến trúc buồng kín (hang có một cửa) cao hơn các hang có chế độ lưu thông tốt (hang có nhiều cửa và nhiều nhánh hang) [Nguyễn Thùy Dương và cs., 2016; Nguyen Thi Anh Nguyet và cs., 2018].

1.3.3. Những tồn tại cần giải quyết

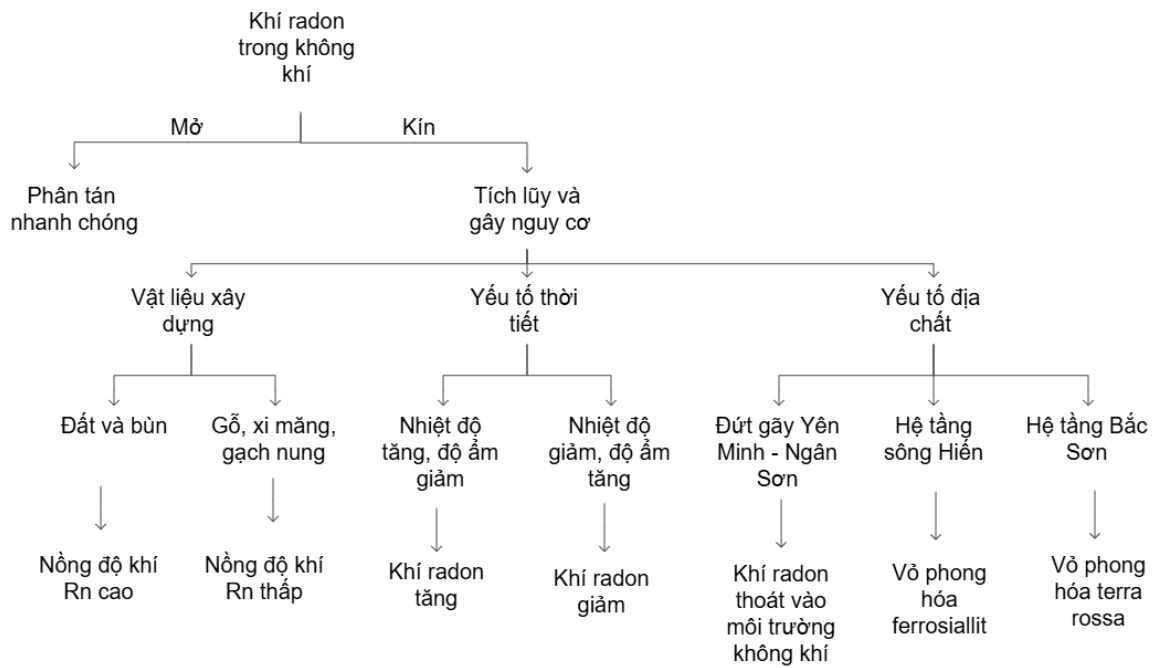
Môi trường không khí trong nhà trình tường được phát hiện có nồng độ khí radon cao, đặc biệt là đồng vị khí radon Rn-220 [Đặng Thị Phương Thảo và cs., 2016]. Tuy nhiên, nguồn thoát khí chưa được giải thích một cách cụ thể. Hơn nữa, mối liên hệ giữa nồng độ khí radon trong nhà và các yếu tố ảnh hưởng (ví dụ như khí hậu, đặc điểm nền địa chất, tính chất vật liệu xây dựng) chưa được phân tích một cách chi tiết.

Xã Bạch Đích, huyện Yên Minh nằm ở khu vực biên giới và người dân sử dụng nhà trình tường để ở và sinh hoạt cộng đồng từ lâu đời. Cho đến nay, ở Việt Nam chưa có nghiên cứu và thống kê cụ thể về các ca bệnh phát sinh do khí radon trong môi trường không khí trong nhà, bao gồm cả nhà trình tường. Nhà trình tường thường được sử dụng ở những vùng núi cao, nơi có điều kiện kinh tế và cơ sở vật chất khó khăn, các dữ liệu thống kê về sức khỏe người dân (tỷ lệ sinh và tử, các ca bệnh lý) còn hạn chế, và do đó xác định bệnh lý dẫn đến tử vong cũng rất khó khăn.

Do vậy, hướng nghiên cứu của luận án sẽ góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết về sự hình thành và phân bố khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường, bổ sung cho bộ dữ liệu về nồng độ khí radon ở các khu vực có nền địa chất là các thành tạo đá vôi như ở cao nguyên đá Đổng Văn, tỉnh Hà Giang. Đồng thời, các kết quả nghiên cứu có thể tạo tiền đề cho bộ dữ liệu khí phóng xạ radon trong nhà có thể ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng.

1.4. Tiểu kết

Các kết quả nghiên cứu tổng quan trên đã cho thấy mối quan hệ đáng chú ý của khí radon trong môi trường không khí trong nhà và đặc điểm địa chất, địa hình ở khu vực xây dựng nhà, cũng như các yếu tố khác (điều kiện thời tiết và tính chất vật liệu xây dựng). Từ đó, có thể khái quát sơ bộ quan hệ của khí radon trong nhà trình tường (ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh) và tổ hợp các yếu tố ảnh hưởng theo sơ đồ Hình 1.10.



Hình 1. 10 Sơ đồ tóm tắt nghiên cứu khí radon trên thế giới và đặc điểm địa chất khu vực xã Bạch Đích.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ HỆ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hướng tiếp cận

Quy luật phân tán và tập trung khí phóng xạ radon được chi phối bởi quy luật di chuyển, phân tán và tập trung của các nguyên tố phóng xạ mẹ urani và thori. Nhà trình tường sử dụng vật liệu xây dựng chính là đất thổ nhưỡng và lớp trầm tích deluvi tại chỗ, là các sản phẩm phong hóa của đá gốc ở khu vực. Do đó, đặc điểm các thành tạo địa chất đóng vai trò quan trọng quyết định đến sự phân bố nồng độ khí radon trong môi trường không khí ngoài trời và trong nhà khu vực nghiên cứu.

Hành vi địa hóa của các nguyên tố phóng xạ urani, thori trong các thành tạo địa chất cũng như của khí radon dựa trên (1) quy luật chu kỳ bán rã phóng xạ và (2) phương thức hòa tan.

(1) Theo quy luật chu kỳ bán rã phóng xạ: sau mỗi chu kỳ bán rã, các đồng vị urani và thori trong đá và các thành tạo địa chất phân rã, tạo thành khí phóng xạ radon tồn tại trong các khe nứt, lỗ hổng và có thể thoát lên trên bề mặt vỏ Trái đất theo các đứt gãy và khe nứt. Sau khi thành tạo, các đồng vị khí radon lưu trú và/hoặc di chuyển trong các lỗ hổng, khe nứt của vật liệu hoặc có thể hòa tan trong nước ngầm, và phát tán vào trong môi trường không khí.

(2) Theo phương thức hòa tan: các đồng vị phóng xạ urani và thori có thể được hòa tan dưới dạng dung dịch và keo mang điện tích dương, di chuyển theo các dòng nước mặt và nước ngầm. Vào mùa mưa, khi mực nước mặt và nước ngầm dâng cao, keo urani và thori mang điện tích dương hấp phụ vào các keo sét mang điện tích âm. Theo thời gian, urani và thori được làm giàu trong các sản phẩm phong hoá, và do đó tương ứng với khả năng nồng độ khí radon tăng cao trong các lớp đất.

Như vậy, nghiên cứu sự thoát khí radon được thực hiện dựa trên việc xác định nguồn gốc và hành vi địa hóa của các nguyên tố phóng xạ mẹ urani, thori và radon cùng các yếu tố ảnh hưởng đến khí radon trong môi trường không khí trong

nhà. Khí radon có thể ảnh hưởng đến sức khỏe người dân phụ thuộc vào nồng độ của chúng và thời gian tiếp xúc với chúng trong môi trường không khí. Trong khuôn khổ luận án, các tham số này sẽ được nghiên cứu dựa trên dữ liệu khảo sát nồng độ khí radon trong nhà trình tường, công thức tính liều chiếu và nguy cơ rủi ro nhằm đánh giá tác động của khí radon đến sức khỏe con người trên phương diện lý thuyết.

2.2. Cơ sở lý luận

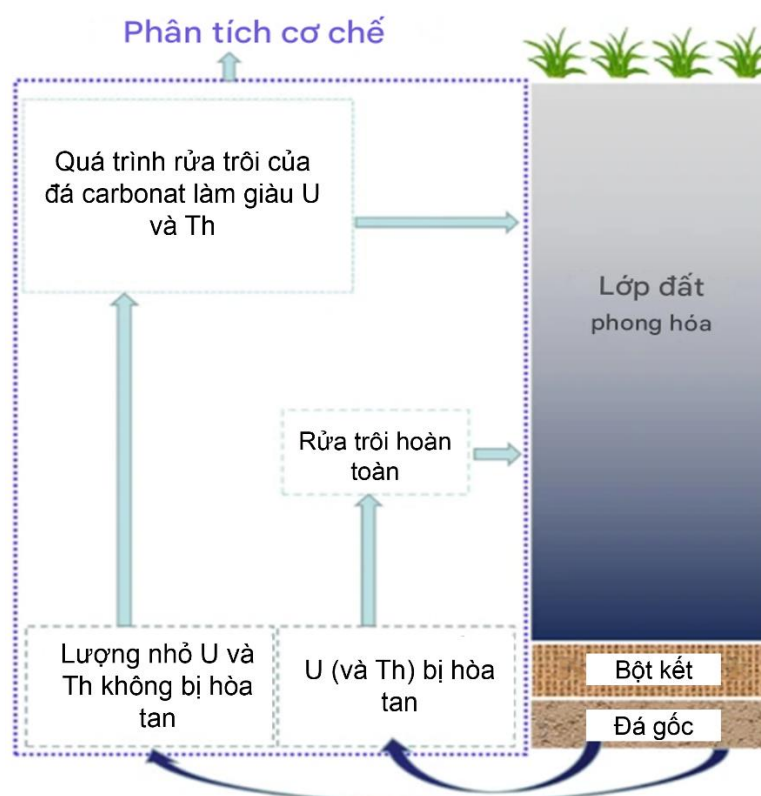
2.2.1. Nguồn gốc và hành vi địa hóa của urani và thori

Urani và thori là hai nguyên tố thuộc nhóm actinid liên quan chặt chẽ với các khoáng vật và đá trong lớp vỏ Trái đất. Đây là hai nguyên tố phóng xạ có trong tự nhiên và quá trình phân rã của chúng có thể gây ô nhiễm môi trường. Các thành tạo địa chất được coi như giữ vai trò quan trọng đối với nguồn gốc và hành vi địa hóa của urani và thori. Hai nguyên tố này tập trung nhiều trong đá granit, đá phiến sét xám đen và rất nghèo trong đá carbonat, đá trầm tích clastic (~ 2 mg/kg) [Singh và cs., 2003; Guagliardi và cs., 2020]. Tuy nhiên, sản phẩm phong hóa (đất và trầm tích) từ các thành tạo địa chất giàu carbonat lại được phát hiện có hàm lượng urani và thori tăng cao ở nhiều nơi trên thế giới, ví dụ như Guizhou (Trung Quốc) [Sun và cs., 2002; Li và cs., 2012; Zhou và cs., 2013]. Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng cho thấy các dị thường nồng độ khí radon trong đất và trong hang động ở các vùng karst trên thế giới và Việt Nam [Vaupotič và cs., 2007; Cevik và cs., 2011; Gregorič và cs., 2011; Nguyễn Thùy Dương và cs., 2016; Nguyen Thi Anh Nguyet và cs., 2018; Wang và cs., 2019].

Nhiều nghiên cứu trên thế giới cũng chỉ ra rằng hàm lượng urani được hòa tan trong nước chảy qua các đá carbonat cao hơn trong nước chảy qua đá granit, gneiss và đá phiến sét [Palmer và Edmond, 1993; Qian và cs., 1988; Han và cs., 1999; Ryu và cs., 2009]. Khác với urani, thori ít bị hòa tan trong nước và dễ dàng tạo phức trong môi trường kiềm giàu carbonat [Andersson và cs., 1995; Murphy

và cs., 1999; Porcelli và cs., 2001]. Thori thường được tìm thấy trong khoáng vật monazit, zicon, là các khoáng vật có thể tích tụ cùng và/hoặc trong đá carbonat trong quá trình phong hóa. Thori rất khó hòa tan trong nước, có xu hướng liên kết với các vật liệu rắn, thori có thể tạo phức với ion carbonat và giữ nó trong đá.

Có thể thấy quá trình phong hóa ảnh hưởng trực tiếp đến sự di chuyển và làm giàu của urani và thori trong các sản phẩm phong hoá (Hình 2.1). Urani và thori trong đá gốc, trải qua quá trình phong hóa một phần bị hòa tan và rửa trôi, và một phần nhỏ không bị hòa tan. Phần bị hòa tan chủ yếu được hấp phụ trên bề mặt tinh thể của khoáng vật carbonat và xi măng trong môi trường kiềm giàu carbonat. Quá trình hòa tan đá carbonat giải phóng hoàn toàn urani và thori. Quá trình này urani bị rửa trôi hoàn toàn và thori có xu hướng ở lại trong sản phẩm phong hóa (đất thổ nhưỡng và trầm tích deluvi). Do đó, urani và thori được làm giàu trong lớp đất thổ nhưỡng [Qiang và cs., 2023].



Hình 2. 1 Urani và thori được làm giàu trong đất thổ nhưỡng từ quá trình phong hóa đá carbonat [Qiang và cs., 2023].

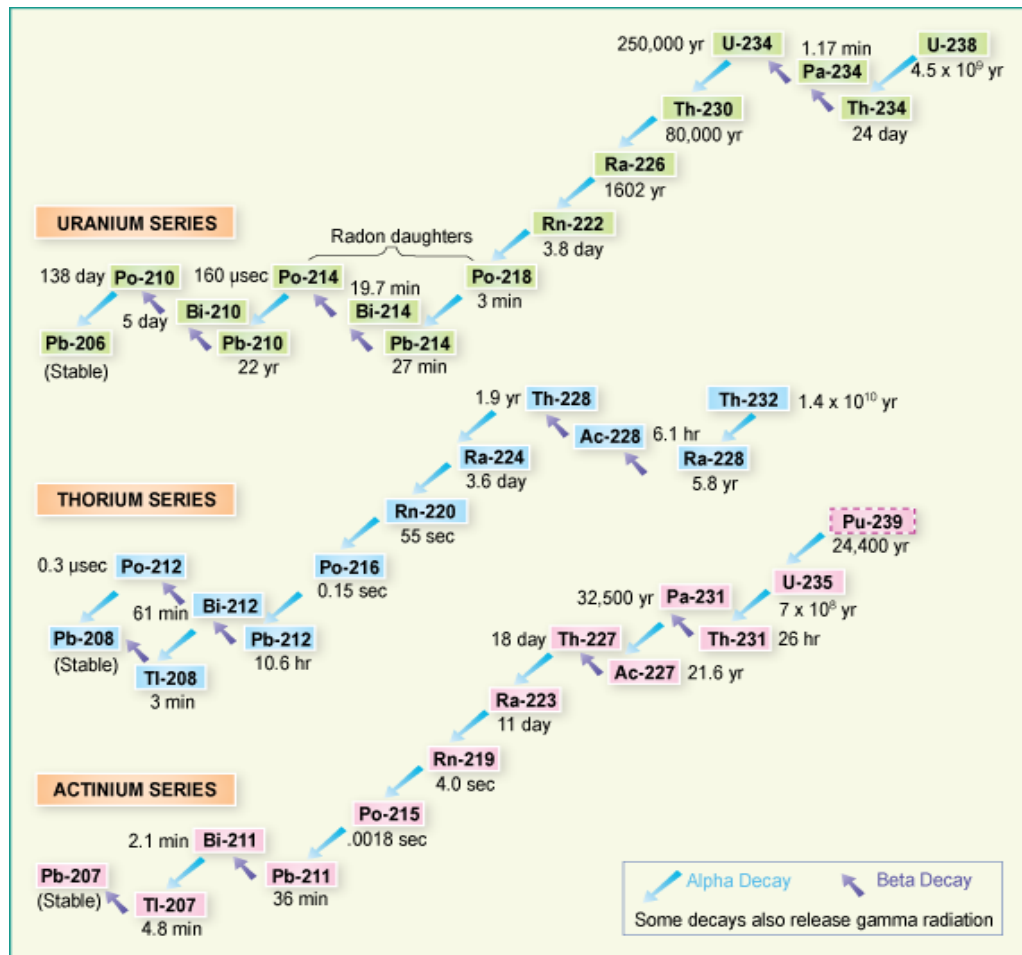
2.2.2. Nguồn gốc và hành vi địa hoá của khí radon

Radon là nguyên tử tồn tại ở dạng khí hiếm nặng có số hiệu nguyên tử là 86. Radon thuộc nhóm nguyên tố hóa học trơ, có cấu tạo lớp điện tử ngoài cùng cân bằng và hầu như không tạo liên kết với nguyên tử khác [Baskaran, 2011; 2016].

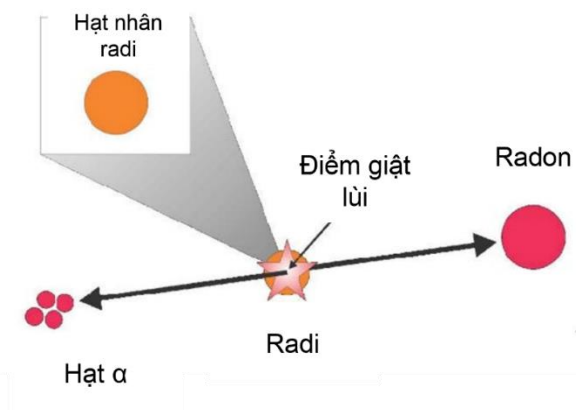
Radon có ~ 40 đồng vị nhưng chỉ có 3 đồng vị phổ biến và chiếm tỷ lệ lớn trong tự nhiên: đồng vị khí Rn-222 (radon), đồng vị khí Rn-220 (thoron) và đồng vị khí Rn-219 (actinon), lần lượt là các sản phẩm trung gian trong dãy phân rã của các đồng vị phóng xạ U-238 (urani), Th-232 (thori) và U-235 (actini) (Hình 2.2). Các đồng vị khí Rn-222, đồng vị khí Rn-220 và đồng vị khí Rn-219 có chu kỳ bán rã lần lượt là 3,82 ngày; 55,6 giây (Hình 2.2) [Bruenner và cs., 2021] và 3,96 giây [Yamamoto và cs., 2018]. Trong các dãy phân rã phóng xạ, sự hình thành và phân rã của các đồng vị khí radon đều giải phóng các hạt mang năng lượng (α , β) và tia γ . Sản phẩm phân rã của các đồng vị khí radon đều là các đồng vị của kim loại nặng, với sản phẩm cuối dãy là các đồng vị bền của chì (Pb-206, Pb-207, Pb-208) (Hình 2.2). Các hạt α , β và tia γ đều có khối lượng, mức năng lượng và khả năng đâm xuyên khác nhau, nên ảnh hưởng của chúng đến cơ thể sống là khác nhau. Mức năng lượng của hạt α khi hình thành và phân rã Rn-222 lần lượt là 4,78 MeV và 5,5 MeV, trong khi hình thành và phân rã Rn-220 lần lượt là 5,7 MeV và 6,3 MeV [Haynes và cs., 2015].

Sự hình thành các đồng vị khí radon diễn ra theo hiệu ứng giật lùi (recoil), và đi kèm giải phóng các hạt α (Hình 2.3) [Barillon và cs., 2005]. Mỗi đồng vị khí radon khi được hình thành có thể tồn tại một trong ba trạng thái: (1) thoát vào không gian lỗ hổng giữa các hạt vật liệu, (2) đi vào cấu trúc các hạt vật liệu liên kết phụ thuộc vào năng lượng còn lại sau khi hình thành, (3) ở lại trong vật liệu ban đầu (Hình 2.4) [IAEA, 2013]. Radon ở trạng thái (1) dễ dàng di chuyển và khuếch tán ra ngoài môi trường không khí theo các kênh dẫn. Ở trạng thái (2) và (3), các đồng vị radon cần nhiều năng lượng hơn để thắng được năng lượng nghi trong hạt vật chất ở dạng lỏng và rắn, sự di chuyển của radon cần nhiều thời gian

hơn và/hoặc đồng vị radon có thể tiếp tục phân rã ngay trong các trạng thái này. Do đó, khả năng khí radon khuếch tán ra ngoài môi trường không khí ở các trạng thái này cũng bị giảm.

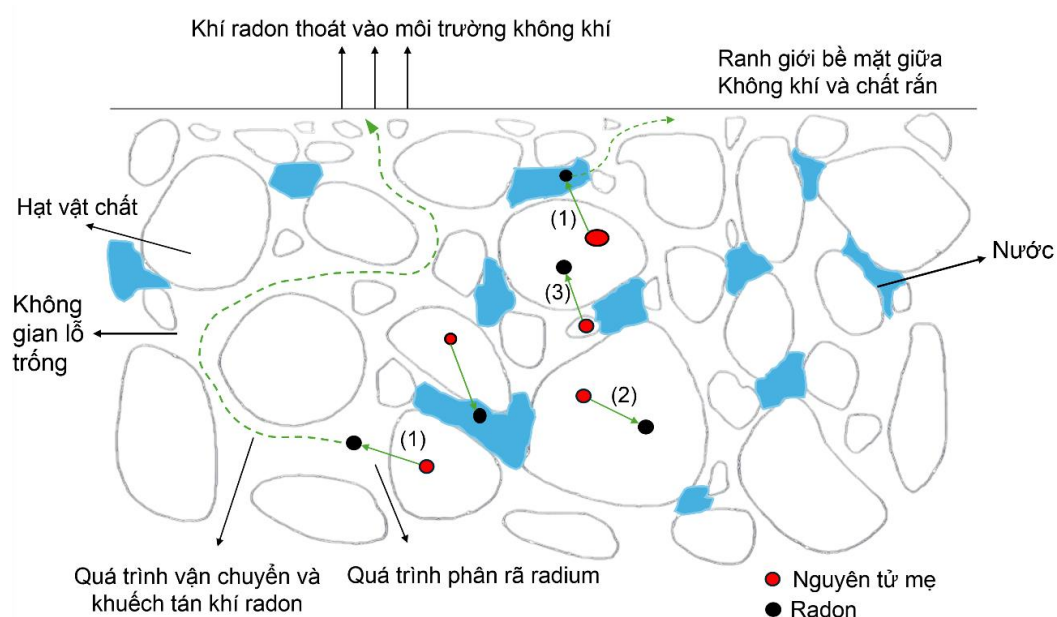


Hình 2. 2 Chuỗi phân rã đồng vị khí radon [Nguồn: <http://www.world-nuclear.org/>]



Hình 2. 3 Hiệu ứng giật lùi (recoil) [Barillon và cs., 2005]

Khí radon khi được hình thành ở trạng thái (1) dễ dàng di chuyển vào các lỗ hổng giữa các hạt vật chất trong chất rắn và/hoặc khe nứt để thoát ra ngoài không khí. Hành vi di chuyển của các chất khí nói chung và khí radon nói riêng đều diễn ra theo quá trình khuếch tán trong/giữa các môi trường (ví dụ: đất/đá – nước, đất/đá – không khí, nước – không khí) [Cinelli và cs., 2019; IAEA, 2013]. Quá trình giải phóng khí radon từ môi trường rắn sang môi trường không khí còn có thể xuất hiện trong quá trình đốt các nhiên liệu hoá thạch [EPA, 2009; IAEA, 2013]. Vì tồn tại ở trạng thái khí, radon có thể di chuyển từ các lớp đất, đá dưới sâu lên trên bề mặt trái đất dọc theo các đứt gãy và khe nứt, và có thể đi cùng các khí tự nhiên khác (như CO₂, CH₄) [Cinelli và cs., 2019]. Ngoài ra, khí radon cũng có thể di chuyển trong các môi trường nước (nước ngầm và nước mặt). Trong môi trường nước và/hoặc trong môi trường không khí có độ ẩm cao, khí radon có thể liên kết với các phân tử nước bằng lực Van der Waals, tạo thành cấu trúc Rn.6H₂O (radon ngậm nước) [Etiope và Martinelli, 2002]. Cấu trúc Rn.6H₂O được tạo thành bằng lực Van der Waals yếu nên khi bị tác động, dù nhỏ, trong quá trình di chuyển, cấu trúc Rn.6H₂O sẽ bị phá vỡ, giải phóng khí radon về lại trạng thái tự ban đầu [Howard và Thomas, 1984; Etiope và Martinelli, 2002].



Hình 2. 4 Quá trình hình thành và di chuyển của khí radon [IAEA, 2013].

Trong môi trường không khí, do đặc tính nặng, khí radon thường có xu hướng lắng đọng và tích tụ trong không gian dưới thấp, gần các nguồn thoát khí (bề mặt đất, đá), và có khả năng tích lũy trong không gian kín. Khí radon cũng có thể khuếch tán dễ dàng dưới tác động của các quá trình lưu thông không khí khi thay đổi nhiệt độ, áp suất và mật độ không khí, như đối lưu và/hoặc hiệu ứng ống khói.

2.2.3. Ứng dụng và ảnh hưởng của khí radon đến con người

Khí radon được ứng dụng trong cả lĩnh vực khoa học và y tế. Trong lĩnh vực y tế, từ đầu thế kỷ XX, radon được sử dụng để điều trị một số loại ung thư ở Châu Âu, và trong các liệu pháp giảm đau (chủ yếu là bệnh thấp khớp). Tuy nhiên, do sự nguy hiểm của radon đến sức khỏe con người nên cần cân nhắc lợi ích cũng như rủi ro khi áp dụng trị liệu. Vì vậy, nhiều bệnh viện trên thế giới đã dừng việc ứng dụng khí radon trong các liệu trình chữa bệnh [<https://juta.co.uk/juta-news/what-is-radon/>; <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/>].

Trong lĩnh vực khoa học, khí radon được ứng dụng trong dự báo động đất, định vị và đo lưu lượng nước ngầm trong nghiên cứu thủy văn, tìm kiếm và phát hiện các đứt gãy trong nghiên cứu địa chất [Trần Trọng Huệ và cs., 2004; Haerudin và cs., 2013; Phạm Tích Xuan và cs., 2017; Benà và cs., 2022]. Đặc tính hoá học trợ giúp khí radon dễ dàng giải phóng ra ngoài môi trường không khí qua các đường dẫn sâu, là đứt gãy. Hành vi này của khí radon được sử dụng để nghiên cứu và xác định đứt gãy địa chất. Liên kết Van der Waals yếu trong cấu trúc $Rn.6H_2O$ dễ dàng bị phá vỡ khi có tác động, nên khí radon được áp dụng để thực hiện các nghiên cứu thủy văn [Sukanya và cs., 2022].

Quá trình phân rã các đồng vị khí phóng xạ radon giải phóng đồng thời các hạt α , β và tia γ mang năng lượng. Các hạt hoặc tia năng lượng này đều có khả năng đâm xuyên và ảnh hưởng đến cơ thể sống, dù hạt α và β có khả năng đâm xuyên kém hơn tia γ . Các mức năng lượng này có thể ảnh hưởng đến cấu trúc tế bào và mô trong cơ thể sống, dẫn đến tổn thương tế bào và sai khác cấu trúc ADN

bên trong cơ thể sống [EPA, 2022]. Tia γ có mức năng lượng lớn và khả năng đâm xuyên tốt hơn cả (chúng không có khối lượng và không bị ảnh hưởng bởi từ trường), và do đó, tia γ là bức xạ ion hóa nguy hiểm đối với toàn bộ cơ thể sống, gồm cả trong và ngoài [EPA, 2022]. Khi cơ thể sống tiếp xúc với các bức xạ ion hóa ở cường độ cao và trong thời gian dài, các tế bào trong cơ thể sống có khả năng thích nghi và có thể tự sửa chữa các sai hỏng mà bức xạ ion hóa gây ra. Tuy nhiên, khi cơ thể sống tiếp xúc với các bức xạ ion hóa nhiều đến mức không thể tự thích nghi và đào thải ra ngoài qua hệ thống bài tiết và hô hấp, các chất phóng xạ ngày càng tích lũy nhiều trong cơ thể. Các bức xạ ion hóa sinh ra trong quá trình phân rã các hợp phần phóng xạ trong cơ thể gây tổn thương các tế bào, mô và ADN, góp phần làm tăng khả năng bị ung thư cho cơ thể sống.

Đồng vị khí Rn-219 có chu kỳ bán rã ngắn (~ 4 s), chúng bị phân rã ngay sau khi được hình thành, và nếu ở trong môi trường không khí, chúng cũng khó có thể tham gia vào nhịp thở cơ thể sống, và do đó, đồng vị khí Rn-219 gần như không ảnh hưởng đến môi trường và cơ thể sống [Meisenberg và cs., 2017]. Vì vậy, các nghiên cứu về ảnh hưởng của khí radon thường tập trung vào các đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220. Chu kỳ bán rã của khí radon (Rn-222 và Rn-220) đều lớn hơn nhiều lần thời gian mỗi nhịp thở của người trưởng thành khỏe mạnh (ở trạng thái nghỉ ngơi, nhịp thở dao động $\sim 12 - 20$ nhịp/phút). Nên khi các đồng vị này đi vào bên trong cơ thể, một phần trong số chúng có thể được quay trở lại môi trường không khí theo nhịp thở, phần còn lại tiếp tục thực hiện quá trình phân rã bên trong cơ thể. Kết quả của quá trình này tạo ra các bức xạ ion hóa tại chỗ, trực tiếp gây tổn thương cho các tế bào và mô chúng tiếp xúc, làm sai hỏng cấu trúc ADN và góp phần gây ra ung thư, đặc biệt là hệ thống hô hấp và phổi. Đây chính là giải thích chi tiết cho lý do khí radon là nguyên nhân gây ra ung thư phổi đứng thứ hai sau khói thuốc lá [WHO, 2009]. Các nghiên cứu đánh giá nguy cơ mắc ung thư phổi trên các đối tượng hút thuốc và không hút thuốc khi cơ thể phơi nhiễm ở các nồng độ khí radon khác nhau cho thấy khả năng mắc ung thư

phổi ở người có đồng thời tiếp xúc khói thuốc và khí radon cao gấp ~ 25 lần so với người không tiếp xúc với khói thuốc [ICRP, 2018]. Những thợ mỏ khai thác urani bị mắc ung thư phổi có đến 31% bị đột biến gene ở cùng một mã gene. Sự thay đổi đột biến mã gene do khí radon gây ra có thể gây tử vong, hoặc sau khi các tế bào được phân chia sẽ góp phần hình thành ung thư cho cơ thể sống [Mustafa và Daniel, 2009]. Các nghiên cứu về di truyền và tế bào là cần thiết để hiểu rõ cơ chế gây ung thư phổi và xác định nguy cơ phơi nhiễm do khí radon gây ra ở môi trường sống. Một vài nghiên cứu đã theo dõi sự thay đổi trong tế bào lympho máu của những người sống trong các ngôi nhà có nồng độ khí radon được giám sát [Bauchinger và cs., 1994; Cole và cs., 1996; Lindhom và cs., 1999]. Các nghiên cứu này đều cho thấy có sự gia tăng tỷ lệ sai lệch nhiễm sắc thể ở tế bào máu của những người thường xuyên tiếp xúc với nồng độ khí radon cao trong nhà.

Tổ chức y tế, tổ chức hạt nhân thế giới và một số quốc gia đã đưa ra các khuyến cáo về nồng độ khí radon trong môi trường nhà ở và nơi làm việc (Bảng 2.1). Ủy ban an toàn bức xạ quốc tế (ICRP) và Cơ quan năng lượng nguyên tử quốc tế (IAEA) là hai tổ chức quốc tế có vai trò trong việc khuyến cáo và ban hành các tiêu chuẩn an toàn bức xạ [Ngô Quang Huy, 2004]. Ở Việt Nam, các khuyến cáo và tiêu chuẩn an toàn bức xạ dựa trên tình hình trong nước được Bộ Khoa học và Công nghệ ban hành theo các văn bản theo Tiêu chuẩn Việt Nam [TCVN: 7889:2008].

Bảng 2. 1 Khuyến cáo ngưỡng an toàn của đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí nhà ở và nơi làm việc trên thế giới [UNSCEAR, 2006, 2008; WHO, 2009].

Tổ chức/ Quốc gia	Nhà ở	Nơi làm việc
UNSCEAR	100 Bq/m ³	
WHO	100 Bq m ⁻³	
Trung Quốc	200 Bq/m ³	

Tổ chức/ Quốc gia	Nhà ở	Nơi làm việc
Hoa Kỳ	4 pCi/L ¹ = 150 Bq/m ³ (EPA)	4 WLM (DOE, EPA)
Châu Âu	200 Bq/m ³ (nhà mới xây) 400 Bq/m ³ (nhà đang sử dụng)	6 * 10 ⁶ Bq/m ³ (WLM)

Hiện nay, các khuyến cáo về an toàn khí radon chủ yếu tập trung vào đồng vị khí Rn-222. Nồng độ các đồng vị khí radon trung bình trong không khí được xem như mức an toàn phóng xạ đối với cơ thể sống. Theo UNSCEAR, tổ chức duy nhất đưa ra mức khuyến nghị an toàn đối với đồng vị khí Rn-220, nồng độ trung bình các đồng vị radon Rn-220 và Rn-222 trong không khí lần lượt là 10 Bq/m³ [UNSCEAR, 2008] và 100 Bq/m³ [WHO, 2009; UNSCEAR, 2008]. Từ đó, nhiều tổ chức trên Thế giới đã xác lập được các mức an toàn theo nồng độ các khí radon. Dựa trên các tiêu chuẩn nồng độ đồng vị khí Rn-222 an toàn của các tổ chức Thế giới, Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam đưa ra tiêu chuẩn nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong nhà chi tiết theo quy định TCVN 7889:2008 với từng đối tượng áp dụng khác nhau (Bảng 2.2).

Bảng 2. 2 Nồng độ đồng vị khí Rn-222 an toàn cho môi trường không khí trong nhà ở theo năm ở Việt Nam [TCVN 7889:2008] và ICRP [1995, 2018].

Các mức	Đối tượng áp dụng	Quy định	ICRP [1995, 2018]
Mức hành động	Trường học	>150 Bq/m ³	
	Nhà ở	>200 Bq/m ³	200 – 600 Bq/m ³
	Nhà làm việc	>300 Bq/m ³	500 – 1.500 Bq/m ³
Mức khuyến cáo	Nhà xây mới	<100 Bq/m ³	
	Nhà hiện sử dụng	<200 Bq/m ³	
Mức phấn đấu	Các loại nhà	<60 Bq/m ³	

Trên cơ sở phân tích nồng độ các đồng vị khí radon theo đối tượng áp dụng, liều chiếu hiệu dụng là một chỉ số chi tiết hơn được sử dụng để cảnh báo an toàn môi trường đến sức khỏe con người. ICRP đề xuất liều chiếu hiệu dụng an toàn trong nhà $\sim 3 - 10$ mSv/năm [ICRP, 2018]. IAEA đưa ra khuyến cáo tổng liều chiếu hiệu dụng là 1 mSv/năm, trong trường hợp đặc biệt có thể áp dụng liều cao hơn nhưng trung bình mỗi năm trong 5 năm ~ 1 mSv/năm [IAEA, 2014]. Đây cũng là đề xuất của Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam [TCVN, 2001]. Liều chiếu hiệu dụng an toàn cho đồng vị khí Rn-220 chỉ mới được UNSCEAR đưa ra là 0,09 mSv/năm và 1,1 mSv/năm cho đồng vị khí Rn-222 [UNSCEAR, 2000]. Theo UNSCEAR, tổng thời gian liều chiếu tính trong một năm là 8760 giờ [TCVN 9416:2012, 2012].

2.2.4. Tính chất của vật liệu chứa radon

Trên thế giới, nghiên cứu về sự thoát khí radon trong nhà đã được thực hiện bằng thực nghiệm trên các loại vật liệu xây dựng như: xi măng, gạch đỏ, bê tông, cát, sỏi, thạch cao, gạch men, ... [Chen và cs., 2010; Norafatin và cs., 2014; Rafat, 2015; Bulut và Remzi, 2024]. Kết quả nghiên cứu cho thấy nồng độ khí radon trong nhà chủ yếu đến từ các nguồn: nền đất xây dựng nhà, nước ngầm và vật liệu xây dựng. Trong các loại vật liệu xây dựng đã được nghiên cứu, khả năng thoát khí radon giảm dần từ đá granit, thạch cao, bê tông, gỗ, còn nồng độ khí radon cao nhất trong cát và thấp nhất trong sỏi [Rafat, 2015]. Khí radon thoát ra từ vật liệu xây dựng chịu ảnh hưởng bởi hai yếu tố chính: hàm lượng các nguyên tố phóng xạ mẹ (urani và thori) trong vật liệu và đặc tính cấu trúc của vật liệu. Ở vật liệu có hàm lượng các nguyên tố phóng xạ mẹ urani và thori cao (như đá granit và cát) có nồng độ khí radon thoát ra ngoài môi trường không khí cao hơn các vật liệu khác. Mặt khác, khí radon thoát ra cũng phụ thuộc vào tính thấm và độ rỗng của vật liệu. Nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà giảm dần từ nhà được xây dựng từ đất, bê tông và gỗ [Mahmood và cs., 2013; Norafatin và cs., 2014; Sehrani và cs., 2019]. Đất sử dụng làm nhà thường có hàm lượng khoáng vật

sét >50%, có đặc tính trương nở cao, do đó có khả năng thấm hút và độ rỗng lớn. Đất làm nhà được xác định đồng thời là nguồn giải phóng và dẫn khí radon thoát ra ngoài môi trường không khí [Norafatin và cs., 2014]. Không giống như đất, bê tông có cấu trúc khung vững chắc nhất định, tính thấm kém và độ rỗng thấp hơn so với đất. Bê tông thường được tạo thành từ hỗn hợp cát, xi măng, nước và vụn đá vôi. Sự thoát khí radon từ bê tông có nguồn thoát khí có thể đến từ cát và đường dẫn khí radon từ sâu dưới đất lên không khí nhà ở do các vết nứt bê tông [Mahmood và cs., 2013].

2.3. Các phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Khảo sát thực địa

Mục đích của phương pháp khảo sát thực địa nhằm thu thập, tổng hợp các số liệu về khí hậu, đặc điểm địa chất, khí radon trong các môi trường ở khu vực nghiên cứu. Thu thập mẫu đất sử dụng làm nhà trình tường để phục vụ các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm. Luận án sử dụng ba thiết bị khảo sát khí radon vào các mục đích khác nhau phụ thuộc vào điều kiện môi trường và đặc tính của từng thiết bị.

a. Mẫu và các điểm khảo sát

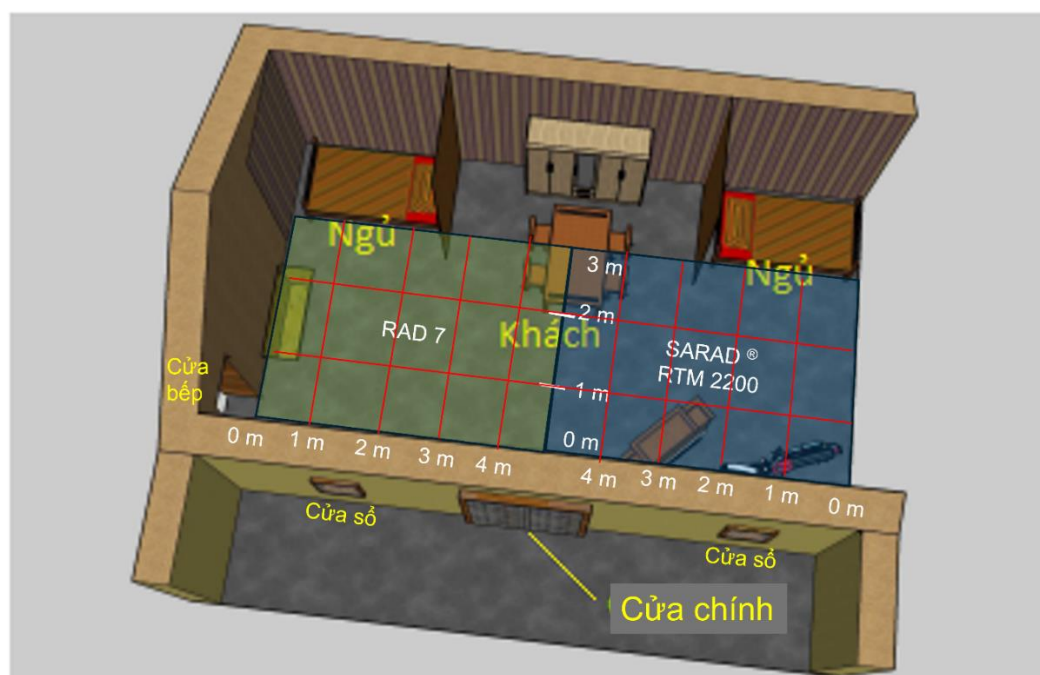
Các điểm khảo sát trong môi trường không khí ngoài trời được thực hiện dọc theo tuyến đường giao thông và tại các hố sụt karst, nơi người dân sinh sống. Luận án thực hiện tổng 341 điểm khảo sát trong đó ở khu vực huyện Quản Bạ (25 điểm), huyện Đồng Văn (129 điểm), huyện Yên Minh (187 điểm trong đó tại xã Bạch Đích 73 điểm).

Đất làm nhà trình tường được thu thập trong lớp vỏ phong hóa (đất thổ nhưỡng và trầm tích deluvi). Đất sử dụng làm nhà trình tường được cuốc ra khỏi lớp vỏ phong hóa, loại bỏ rác, sạn, cuội, mùn, rễ cây, đánh tơi và trộn với nước làm vật liệu xây dựng nhà trình tường. Ngoài đất và nước, người dân không trộn thêm bất kỳ phụ gia nào khác. Luận án đã thu thập mẫu đất sử dụng làm nhà trình

tường (ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang) và các mẫu vật liệu xây dựng ở khu vực nghiên cứu về phòng thí nghiệm để khảo sát quá trình thoát khí radon. Các vật liệu xây dựng được đo đối sánh trong thực nghiệm đối sánh với đất bỏ rời với khối lượng tương đương (~1 kg).

Gạch đất được chế tạo từ đất thô xây nhà trình tường nhằm mô hình lại tường đất, nhằm thực hiện các thực nghiệm. 16 viên gạch có kích thước tương tự như nhau (70*110*110 mm) và có khối lượng trung bình ~1.200 g (Hình 2.10) được chế tạo bằng các nén chặt đất làm nhà,

Nhà trình tường được sử dụng để nghiên cứu khảo sát chi tiết sự thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà tại xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang. Ngôi nhà có kiến trúc truyền thống dạng đối xứng trên diện tích 5,5*9,0*2,8 m, gồm 3 gian, với 01 cửa chính 1,2*1,8 m, 02 cửa sổ nhỏ có kích thước 0,6*0,6 m (Hình 2.5 mô tả nhà trình tường với các tuyến đo). Theo kiến trúc đối xứng và diện tích từng gian, nghiên cứu khảo sát theo mạng lưới. Khảo sát mạng lưới trong nhà được thực hiện trong mùa mưa và mùa khô, với số điểm khảo sát ~ 76 điểm/mùa.



Hình 2. 5 Mạng lưới khảo sát khí radon trong nhà trình tường.

b. Thiết bị khảo sát SARAD® RTM 2200.

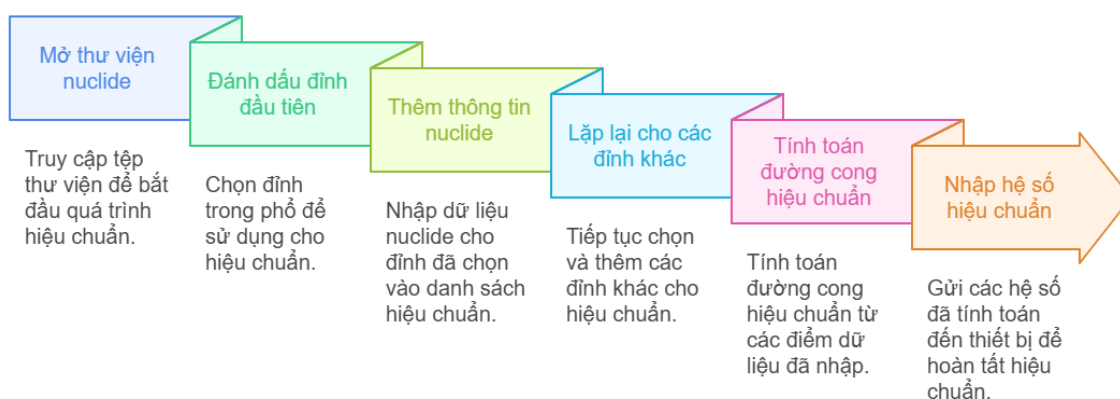
SARAD® RTM 2200 là thiết bị hoạt động trên nguyên lý xác định nồng độ các đồng vị khí radon bằng cách tính tổng hạt α giải phóng trong quá trình phân rã của từng đồng vị Po-218 và Po-216, và sử dụng quang phổ α để tách biệt hai hạt nhân. Đối với đồng vị khí Rn-222, thiết bị có chế độ đo nhanh (fast mode) và đo chậm (slow mode). Chế độ đo nhanh hiển thị nồng độ đồng vị khí Rn-222 tức thời, phản ứng nhanh nhạy với sự thay đổi nồng độ khí Rn-222 trong môi trường và được tính trên 5 lần phân rã của Po-218. Chế độ đo chậm xác định nồng độ khí Rn-222 bằng các chuỗi phân rã của cả Po-218 và Po-214 tích hợp theo thời gian, nên thường cần nhiều thời gian hơn, cho độ chính xác và độ nhạy cao hơn chế độ đo nhanh. Đối với nồng độ khí Rn-220, thiết bị xác định dựa trên sự phân rã của Po-216 và hiển thị nồng độ khí Rn-220 gần như tức thời (chỉ trong ~ 1 giây), do chu kỳ bán rã của Po-216 rất ngắn ($\sim 0,15$ giây) [SARAD GmbH, 2015].

SARAD® RTM 2200 là thiết bị đo các đồng vị khí radon có tính năng vượt trội nhất, tích hợp được nhiều cảm biến linh hoạt và thu khí bằng các đầu dò. SARAD® RTM 2200 không chỉ đo khí radon mà còn có thể tích hợp đo nồng độ các khí trong tự nhiên, như CO₂ và CH₄, và một số tham số khác (như tọa độ điểm đo, nhiệt độ, áp suất, độ ẩm không khí). Thiết bị có độ nhạy cao, dải đo lớn ($1 - 10^6$ Bq/m³), sai số trong khoảng tin cậy, thời gian ghi nhận kết quả nhanh và ít chịu ảnh hưởng của các yếu tố bên ngoài tác động [SARAD GmbH, 2015]. Do đó, luận án sử dụng thiết bị SARAD® RTM 2200 để thực hiện khảo sát các đồng vị khí radon trong các kiểu môi trường khác nhau.

Thiết độ đo SARAD® RTM 2200 được điều khiển, cài đặt tham số đo và đọc, trích xuất dữ liệu bằng phần mềm dVISION kết nối với máy tính. Các bước thực hiện khảo sát bằng SARAD® RTM 2200 được sơ đồ hoá theo Hình 2.6. Luận án sử dụng SARAD® RTM 2200 để khảo sát nồng độ các đồng vị khí radon trong khí đất, môi trường không khí ngoài trời và trong nhà.

- Khí đất được ở độ sâu 0,5 m, thời gian đo mỗi điểm ~ 60 phút (Hình 2.7).

- Môi trường không khí ngoài trời được thực hiện bằng chế độ đo nhanh ở các vị trí cách mặt đất ~1 m.
- Môi trường không khí trong nhà được đo theo chế độ đo chậm, ở độ cao cách mặt sàn nhà ~1 m.
- Thực nghiệm khảo sát khả năng thoát khí radon trên tường và nền đất (Hình 2.8).



Hình 2. 6 Quy trình hiệu chuẩn thiết bị SARAD® RTM 2200.



Hình 2. 7 Khảo sát khí radon trong khí đất bằng SARAD® RTM 2200.



Hình 2. 8 Khảo sát nồng độ khí radon trên nền và tường đất bằng SARAD® RTM 2200.

c. Thiết bị khảo sát RAD7.

RAD7 là thiết bị khảo sát nồng độ khí radon phổ biến. Thiết bị hoạt động trên nguyên lý phát hiện và tính tổng α trong quá trình phân rã Po-218 và Po-216 bằng cảm biến silicon. Cũng tương tự SARAD® RTM 2200, thiết bị đo RAD7 có hai chế độ đo Sniff và Normal cho đồng vị khí Rn-222. Chế độ Sniff chỉ đếm tổng α trong sự phân rã của Po-218, tương ứng với chế độ đo nhanh. Sau 3 giờ chạy chế độ Sniff, nếu không cài đặt tham số, thiết bị sẽ tự động chuyển sang đo chế độ Normal. Chế độ Normal tương ứng với chế độ đo chậm, tính toán tổng α của quá trình phân rã Po-218 và Po-214 [DurrIDGE, 2023]. Rn-220 được phân tích dựa trên năng lượng đặc trưng của các hạt α trong quá trình phân rã của Po-216.

Thiết bị RAD7 có thể xác định nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong khoảng 4 – 750.000 Bq/m³ (sai số tuyệt đối 5%) và hoạt động trong điều kiện nhiệt độ 0 – 45 °C. Mẫu được hút vào thiết bị bằng bơm tích hợp có tốc độ dòng khoảng 1 phút/lít. Trước khi đi vào buồng đo, khí được đi qua ống hút ẩm để làm khô khí và loại bỏ hơi nước. Thiết bị có thể khảo sát khí radon linh hoạt trong mọi môi trường (không khí, khí đất, nước) [DurrIDGE, 2023]. RAD7 có thể được vận hành trực tiếp và/hoặc gián tiếp qua phần mềm CAPTURE. Thiết bị RAD7 khảo sát nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường, ở các độ cao cách mặt đất ~ 1 m. Kết quả đo nồng độ các đồng vị khí radon từ RAD7 được in

trực tiếp từ máy in từ đi kèm sau mỗi điểm đo và/hoặc xuất dữ liệu vào máy tính thông qua phần mềm và dây cáp kết nối [DurrIDGE, 2023].

Thiết bị RAD7 có thể được người dùng hiệu chuẩn chủ động dựa trên sách hướng dẫn đi kèm thiết bị. Trong quá trình hiệu chuẩn, thiết bị cần được làm sạch buồng đo và hệ thống thu mẫu khí, toàn bộ hệ thống thiết bị cần được làm khô hoàn toàn. Sử dụng nguồn radon chuẩn để đưa thiết bị vào thực hiện quá trình hiệu chuẩn trong thời gian cố định (tối thiểu 1 giờ) và so sánh với kết quả nguồn chuẩn, từ đó điều chỉnh hệ số đo phù hợp. Để đảm bảo tính chính xác và được công nhận theo tiêu chuẩn, thiết bị RAD7 nên gửi đến phòng hiệu chuẩn có uy tín trên thế giới đáp ứng yêu cầu ISO/IEC 17025.

Thiết bị RAD7 có độ tin cậy cao và thường được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu về khí radon, giá thành thiết bị cũng thấp hơn nhiều so với thiết bị SARAD® RTM 2200 nhưng vẫn đảm bảo mọi tính năng cần thiết, tuy nhiên thiết bị có điều kiện thu khí phải qua hệ thống hút ẩm. Do đó, nghiên cứu sử dụng thiết bị RAD7 để thực hiện khảo sát chi tiết sự thoát khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường, có độ ẩm gần như không thay đổi trong các quá trình khảo sát.

d. Thiết bị khảo sát Thoron Scout.

Nghiên cứu sử dụng thiết bị SARAD® RTM 2200 và RAD7 để khảo sát khí radon trong môi trường không khí ngoài trời và nhà ở do hai thiết bị này đều sử dụng bơm để thu khí. Hai thiết bị này thích hợp cho quá trình khảo sát khí radon trong không gian lớn, hoặc trong các thí nghiệm cần thực hiện trong thời gian ngắn (thí nghiệm thay đổi độ ẩm trong gạch đất). Tuy nhiên, trong các thí nghiệm khảo sát khí radon trong vật liệu xây dựng bờ rời, hoặc mô hình gạch đất, nghiên cứu sử dụng thiết bị khảo sát Thoron Scout. Lựa chọn Thoron Scout làm thiết bị khảo sát trong phòng thí nghiệm vì đây là thiết bị nhỏ gọn, hoạt động nhạy trong phạm vi hẹp, môi trường đo được khép kín hoàn toàn để đảm bảo độ chính xác cao và thiết bị sử dụng pin để hoạt động, theo chỉ dẫn của nhà sản xuất SARAD GmbH

[2021]. Thoron Scout được sử dụng trong các thí nghiệm khảo sát nồng độ và sự thoát khí radon từ các loại vật liệu xây dựng và gạch đất (mô hình cho tường đất của nhà trình tường).

Thoron Scout không sử dụng hệ thống máy bơm để thu khí mà sử dụng buồng đo khuếch tán. Sự trao đổi không khí được thu vào buồng đo có độ thấm cao đặt bên ngoài thiết bị. Cũng như hai thiết bị trên, Thoron Scout sử dụng đầu dò bán dẫn phân tích quang phổ α của các đồng vị Po-218 và Po-216, hoạt động độ nhạy cao [SARAD GmbH, 2021]. Thời gian tối thiểu để thiết bị có thể ghi lại dữ liệu là 15 phút. Do vậy, thời gian cần thực hiện khảo sát khí radon của thiết bị Thoron Scout dài hơn so với RAD7 và SARAD[®] RTM 2200. Thiết bị cũng được đi kèm cảm biến liên quan đến độ ẩm, nhiệt độ, và áp suất và khoảng đo rộng, $\sim 1 - 10^6$ Bq/m³, độ chính xác $\sim 95\%$ [SARAD GmbH, 2021].

Dữ liệu nồng độ các đồng vị khí radon và các tham số tương ứng được đọc và thống kê từ Thoron Scout bằng phần mềm Radon Vision Software. Thiết bị không tự hiệu chuẩn, và được gửi đi hiệu chuẩn tại công ty hiệu chuẩn tuân thủ quy trình và đáp ứng yêu cầu của DIN ISO/IEC EN 17025:2018. Trong quá trình thực hiện luận án, thiết bị Thoron Scout đã được gửi thực hiện hiệu chuẩn 3 lần. Sau khi hiệu chuẩn, thiết bị luôn được kiểm tra đối chứng song song với SARAD[®] RTM 2200 và cho kết quả tương đương nhau.

e. Thực nghiệm khảo sát nồng độ khí radon trong các môi trường không khí

Luận án áp dụng thực nghiệm khảo sát nồng độ khí radon trong các môi trường không khí theo tiêu chuẩn quốc gia TCVN 10759-1:2016, ISO 11665 1:2012 về đo hoạt độ phóng xạ trong môi trường không khí. Các kết quả khảo sát nồng độ khí radon ngoài thực địa trong luận án đều áp dụng phương pháp đo điểm. Phép đo điểm là phép đo một mẫu được lấy tức thời trong khoảng thời gian dưới một giờ và tại một điểm được xác định trong không gian.

Luận án áp dụng theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7889:2008 về yêu cầu chung trong phương pháp đo nồng độ khí radon tự nhiên trong nhà. Luận án lựa

chọn phương pháp đo ngắn hạn, đo liên tục dưới 90 ngày trong điều kiện đóng kín tất cả các cửa (đối với nhà ở) ít nhất 12 giờ trước và trong suốt quá trình khảo sát [TCVN 7889:2008]. Nghiên cứu khảo sát chi tiết sự thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà được thực hiện khảo sát tại từng điểm theo mạng lưới trong nhà (Hình 2.5), mỗi điểm khảo sát được đo 3 lần lặp lại, thời gian đo tối thiểu mỗi lần là 15 phút, đầu cảm biến được đặt cách mặt sàn nhà 1 m, tương ứng với khoảng cách trung bình của người dân sinh sống trong nhà trình tường với nền nhà ở các trạng thái khác nhau, như ngồi, nằm ngủ trên giường,

Thí nghiệm trên gạch đất nhằm xác định quá trình thoát khí radon và các yếu tố ảnh hưởng, như độ ẩm, độ rỗng (thể hiện qua tỷ trọng của gạch đất) được thực hiện bằng cách đặt các viên gạch đất lần lượt vào hộp nhựa kín. Hộp nhựa trong thí nghiệm có kích thước 280*180*140 mm, vỏ hộp dày 2 mm, được nối với đầu thu khí của thiết bị SARAD[®] RTM 2200 (Hình 2.9). Thời gian khảo sát của mỗi viên gạch đất tối thiểu là 30 phút. Độ ẩm thay đổi theo thời gian diễn ra rất nhanh, do đó nghiên cứu sử dụng thiết bị khảo sát có độ nhạy cao nhất là SARAD[®] RTM 2200 để thực hiện.



Hình 2. 9 Mô hình gạch đất và khả năng thoát khí radon từ gạch đất.

Nghiên cứu cũng khảo sát sự thoát khí radon từ một số loại đất có hoạt độ phóng xạ cao bằng mô hình gạch đất, tương tự như mô hình gạch đất mô phỏng

tường nhà trình tường và 5 loại vật liệu xây dựng được sử dụng để xây dựng nhà được thu thập trong khu vực nghiên cứu. Các vật liệu khảo sát đều có cùng khối lượng (1 kg). Thí nghiệm được thực hiện trong hộp nhựa kín kích thước 280*180*140 mm, bề dày vỏ hộp 2 mm, với thiết bị Thoron Scout và thời gian đo khảo sát mỗi mẫu tối thiểu 2 ngày (Hình 2.10).



Hình 2. 10 Khảo sát nồng độ khí radon từ các mẫu gạch bằng thiết bị Thoron Scout.

2.3.2. Phương pháp nghiên cứu thành phần vật chất của đất làm nhà trình tường và các vật liệu xây dựng

a. Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD)

Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) dùng để nghiên cứu thành phần, cấu trúc tinh thể khoáng vật của vật liệu. Mẫu nghiên cứu được sấy khô tự nhiên ở nhiệt độ 40 °C, nghiền mịn đến cấp hạt < 40 μm , và trải đều trên 1 mặt phẳng. Mẫu được phân tích bằng máy phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) Model Siemens D5005, Khoa Vật lý – Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQGHN), với các tham số vận hành: ống bức xạ Cu-K α , khe phân kỳ có thể thay đổi với bước đo 0,02 °2 θ trong thời gian 3 giây, khoảng đo từ 4 °2 θ – 70 °2 θ . Kết quả đo được phân tích bằng phần mềm Winfit để xác định sự tồn tại của các pha khoáng vật và phần mềm

BGMN Rietveld để xác định sự phân bố các pha khoáng vật trong mẫu phân tích [Ufer và cs., 2008; Hoang Thi Minh Thao và cs., 2017].

b. Phương pháp huỳnh quang tia X (XRF)

Phương pháp huỳnh quang tia X (XRF) dùng để xác định thành phần nguyên tố hoá học trong mẫu đất, phân tích bằng thiết bị XRF – 1800 Shimadzu tại khoa Địa chất, trường Đại học Khoa học Tự nhiên. Thiết bị vận hành theo các tham số: ống phát tia X có dòng điện 20 KV và 10 mA, buồng mẫu chân không, khí tỷ lệ (PR gas) 90% Ar và 10% CH₄. Mẫu phân tích được sấy khô (105 °C), nghiền đến kích thước hạt < 63 µm, và được ép thành bánh có bề mặt phẳng. Mất khi nung (LOI) là phương pháp kết hợp với XRF, nhằm xác định thành phần vật chất hữu cơ (khối lượng mẫu thay đổi giữa 105 °C và 550 °C) và carbon vô cơ (khối lượng mẫu thay đổi giữa 550 °C và 1.100 °C). Kết quả thành phần hóa học được thể hiện dưới dạng tỷ lệ khối lượng (%) cho các oxit của nguyên tố chính và (ppm) cho các nguyên tố vi lượng.

c. Phương pháp quang phổ gamma phòng nền thấp (detector HPGe)

Phương pháp quang phổ gamma phòng nền thấp (detector HPGe) nhằm xác định hoạt độ phóng xạ có trong mẫu đất sử dụng làm nhà trình tường. Mẫu đất sử dụng làm nhà trình tường được đưa vào trong một hộp kín nhằm đưa đến trạng thái cân bằng. Sử dụng máy dò có độ phân giải cao HPGe với phòng nền thấp của OrtecTM và phần mềm Gamma Vision. Nồng độ hoạt độ được xác định dựa trên các vạch gamma tương ứng. Sự hấp thụ gamma là kết quả của sự khác biệt về mật độ của mẫu phân tích so với mẫu chuẩn được đưa vào dựa trên mô tả của Jodlowski [2006]. Quang phổ gamma phòng nền thấp (detector HPGe) có thể xác định hoạt độ của các nguyên tử Ra-226, K-40, U-235 và Th-232.

Các mẫu đất sử dụng làm nhà trình tường được phân tích bằng phương pháp này sử dụng các vạch gamma năng lượng thấp làm tín hiệu phân tích: 46,5 keV đối với Pb-216, 63,3 và 92 keV đối với U-238; và 186,1 keV đối với Ra-226. Th-

232 được phân tích bằng các vạch gamma 338,3 keV; 911,2 keV và 967,0 keV của Ac-228; và 1461 keV đối với K-40 [Melgunov và cs., 2003; Gavshin và cs., 2005]. Các phép đo được thực hiện trên máy dò HPGe nền thấp EURISYS MEASURES EGPC192-P21-R với thể tích hoạt động là 220 cm³, hiệu suất tương đối 50%. Thể tích mẫu cần phân tích là 10 ml, trọng lượng trong khoảng 5 – 15 g, thời gian phân tích mẫu khoảng 12 – 48 giờ.

d. Phương pháp quang phổ khối (ICP-MS)

ICP-MS là phương pháp phân tích thành phần hoá học, thường là các nguyên tố kim loại. Phương pháp sử dụng plasma Ar để phân tích mẫu dưới dạng các ion sau đó được đo bằng máy quang phổ khối (MS). Thiết bị phân tích gồm 2 thành phần chính là nguồn ion (ICP) và máy quang phổ khối (MS). Khoảng 0,5g mẫu đất khô được đưa vào ống teflon, thêm 4 ml HNO₃ đặc và 1 ml H₂O₂ 30%. Mẫu được đưa vào tủ sấy gia nhiệt 190 °C trong 20 phút, sau đó đưa ra ngoài để nguội đến nhiệt độ phòng và được pha loãng bằng nước khử ion đến vạch 25ml và đưa vào hệ thống phân tích ICP-MS Agilent 7900 [Trung Nguyen-Quang và cs., 2021]. Trước khi đưa mẫu vào phân tích, đường chuẩn được xây dựng dựa trên dung dịch chuẩn đa nguyên tố ICP ở các nồng độ khác nhau (tối thiểu 3 nồng độ).

e. Phương pháp phân tích cấp hạt đất bằng laser

Phương pháp phân tích cấp hạt đất bằng laser mục đích để xác định thành phần các cấp hạt theo kích thước trong mẫu đất. 5 g mẫu đất tươi được đưa vào ống nghiệm 50 ml, nhỏ 2 ml HCl (10%) loãng nguội đối với mẫu có hàm lượng sét thấp, để lắng phản ứng 24 giờ. Sau 24 giờ, thêm 2 ml HCl kiểm tra tính phản ứng hoàn toàn. Ly tâm loại bỏ axit dư và các chất sau phản ứng. Sau đó, tiếp tục nhỏ 5 ml H₂O₂ (< 10%) ở nhiệt độ thường quan sát phản ứng có thể gây tràn ra ngoài ống nghiệm trong quá trình xảy ra phản ứng, để lắng phản ứng 24 giờ. Sau 24 giờ, thêm 2 ml H₂O₂ kiểm tra tính phản ứng hoàn toàn. Ly tâm loại bỏ các chất sau phản ứng và H₂O₂ dư. Sau khi sử dụng HCl và H₂O₂ để loại bỏ carbonat và

hợp chất hữu cơ, tiếp tục sử dụng 20 ml $(\text{NaPO}_3)_6$ (hexametaphosphate) 5,5 g/l cho 0,1 g mẫu khô siêu âm trong vòng 24 giờ. Sau siêu âm 24 giờ nếu có xuất hiện huyền phù lắng mạnh huyền phù và đưa vào máy phân tích [Adam và Jeremy, 2015].

Nghiên cứu sử dụng thiết bị LA – 950V2 tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQGHN để xác định thành phần các cấp độ hạt trong đất sử dụng làm nhà trình tường. Thiết bị sử dụng nhiễu xạ laser và dải thấu kính đơn để xác định các cấp độ hạt trong khoảng từ 0,01 μm – 3.000 μm . Phân tích được các cấp hạt nhỏ và huyền phù. Thiết bị phân tích trước khi thực hiện phân tích đã được chuẩn hóa bằng các dung dịch chuẩn đi kèm thiết bị. Kết quả phân tích độ hạt được đưa ra dưới dạng biểu đồ hoặc bảng số liệu. Mỗi mẫu được phân tích lặp lại 3 lần, độ lệch chuẩn < 1% [Horiba Instruments, 2019].

2.3.3. Phương pháp tính toán tốc độ thoát khí, liều chiếu hiệu dụng và đánh giá nguy cơ rủi ro

a. Tốc độ thoát khí

Sự thoát khí của vật liệu nhanh hay chậm, hiệu quả hay kém hiệu quả được đánh giá qua tốc độ thoát khí. **Tốc độ thoát khí** là lượng khí thoát ra khỏi một đơn vị diện tích về mặt trong một đơn vị thời gian nhất định. Tốc độ thoát khí radon được tính toán dựa trên công thức [Kanse và cs., 2021]:

$$J_s = \frac{\lambda * V * C}{A}$$

Trong đó:

J_s : tốc độ thoát khí ($\text{Bq}/\text{m}^2\text{s}$)

λ : hằng số phân rã của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 lần lượt là $2,10*10^{-6}$ và $1,25*10^{-2}$

V: thể tích không gian khảo sát (m^3)

C: nồng độ các đồng vị khí radon (Bq/m^3)

A: diện tích bề mặt khảo sát (m^2)

b. Công thức tính liều chiếu

Liều chiếu hiệu dụng hàng năm là cơ sở để đánh giá nguy cơ rủi ro của khí radon đến sức khỏe con người. Liều chiếu hiệu dụng hàng năm bao gồm liều chiếu trong hàng năm và liều chiếu ngoài hàng năm. UNSCEAR [2000] đã đề xuất công thức tính liều chiếu trong hàng năm như sau:

$$E_{Rn} = (0,17 + 9 \cdot F_{Rn}) \cdot C_{Rn} \cdot H_{occ} \cdot 10^{-6}$$

$$E_{Tn} = (0,11 + 40 \cdot F_{Tn}) \cdot C_{Tn} \cdot H_{occ} \cdot 10^{-6}$$

$$E = E_{Rn} + E_{Tn}$$

Trong đó:

- Rn và Tn là từ viết tắt tương ứng lần lượt của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220;
- E_{Rn} , E_{Tn} , E: lần lượt là liều chiếu trong hàng năm do đồng vị khí Rn-222, đồng vị khí Rn-220 và tổng liều chiếu trong hàng năm của cả 2 đồng vị (mSv/năm);
- F là hệ số cân bằng của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 trong môi trường không khí trong nhà lần lượt là: $F_{Rn} = 0,4$ [UNSCEAR, 2000] và $F_{Tn} = 0,02$ [UNSCEAR, 2006];
- H_{occ} là thời gian phơi nhiễm trong năm (h)
- C là nồng độ các đồng vị khí radon (Bq/m^3)
- 10^{-6} là hệ số chuyển đổi nSv sang mSv

Ở Việt Nam, công thức tính liều chiếu trong hàng năm (liều chiếu tương đương) khi có phóng xạ được thể hiện trong Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9415:2012 về điều tra, đánh giá địa chất môi trường – phương pháp xác định liều chiếu tương đương năm 2012.

$$E_{Rn} = 0,6 \cdot C_{Rn} \cdot 8760 \cdot 9$$

$$E_{Rn} = 0,047 \cdot C_{Rn}$$

$$E_{Tn} = 0,01 \cdot C_{Tn} \cdot 8760 \cdot 40$$

$$E_{Tn} = 0,0035 \cdot C_{Tn}$$

Trong đó:

- R_n và T_n là từ viết tắt tương ứng của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220;
- E_{R_n} , E_{T_n} : lần lượt là liều tương đương hàng năm do của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 (mSv/năm);
- 9 và 40 là hệ số cân bằng của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 trong môi trường không khí (nSv/ (Bq h/m³);
- 8760 là thời gian chiếu xạ trong năm (tính bằng giờ) tương ứng 365 ngày;
- C là nồng độ các đồng vị khí radon (Bq/m³)

c. Công thức đánh giá nguy cơ rủi ro

Liều chiếu hiệu dụng trung bình mỗi năm được tính trên tổng liều chiếu hiệu dụng bên ngoài (tiếp xúc ngoài da) và bên trong (đi vào trong cơ thể qua đường hô hấp và tiêu hóa) ở cả hai môi trường là môi trường không khí ngoài trời và trong nhà. Liều chiếu ngoài được tính toán dựa trên kết quả đo suất liều γ và nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 ngoài trời, liều chiếu trong được tính toán dựa trên kết quả đo nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 trong môi trường nhà ở theo công thức của UNSCEAR [2000] đã được nêu ở trên.

Ước tính rủi ro được tính toán dựa trên công thức của EPA [2003] cụ thể:

$$ERR_{R_n} = EEC_{R_n} * F_{R_n} * C_{R_n} * H_{occ} * R * L$$

$$ERR_{T_n} = EEC_{T_n} * F_{T_n} * C_{T_n} * H_{occ} * R * L$$

$$ERR = ERR_{R_n} + ERR_{T_n}$$

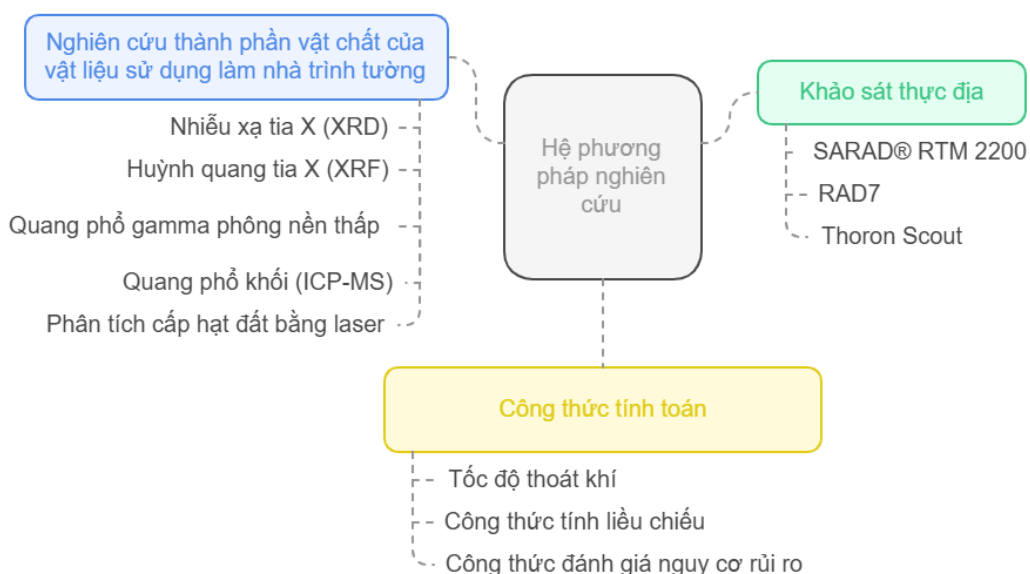
Trong đó:

- ERR , ERR_{R_n} , ERR_{T_n} : nguy cơ tương đối có thể bị ung thư do tổng khí radon, đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 gây ra trong suốt cuộc đời của con người (đơn vị tính: %)
- EEC : nồng độ ở trạng thái cân bằng lần lượt của đồng vị khí Rn-222 là $EEC_{R_n} = 1,59 * 10^{-6}$, của đồng vị khí Rn-220 là $EEC_{T_n} = 2,1 * 10^{-5}$.

- F là hệ số cân bằng của đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 trong môi trường không khí trong nhà lần lượt: $F_{Rn} = 0,4$ [UNSCEAR, 2000] và $F_{Tn} = 0,02$ [UNSCEAR, 2006];
- H_{occ} là thời gian phơi nhiễm trong năm (h);
- C là nồng độ khí (Bq/m^3);
- R là ước tính rủi ro trên mỗi đơn vị phơi nhiễm trong đó:
 - + Dân số nói chung (toàn bộ dân số có nguy cơ rủi ro tương đối có thể bị ung thư phổi.): $5,38 \cdot 10^{-4}$
 - + Người hút thuốc: $9,68 \cdot 10^{-4}$
 - + Người không hút thuốc: $1,67 \cdot 10^{-4}$
- L là tuổi thọ dự kiến.

2.4. Tiểu kết

Luận án đã xác định được cách tiếp cận vấn đề nghiên cứu và cơ sở lý luận theo hướng hành vi địa hóa của nguyên tố mẹ urani, thori cũng như khí radon dựa trên (1) quy luật chu kỳ bán rã phóng xạ và (2) phương thức hòa tan. Dựa trên định hướng đó, luận án đã đưa ra hệ phương pháp nghiên cứu để thực hiện luận án cụ thể theo mô hình Hình 2.11.



Hình 2. 11 Hệ phương pháp nghiên cứu.

CHƯƠNG 3. KHÍ RADON TRONG TỰ NHIÊN VÀ TRONG NHÀ TRÌNH TƯỜNG

3.1. Nguồn gốc khí radon

3.1.1. Từ vỏ phong hóa được làm giàu

Luận án thực hiện khảo sát khí đất trong vỏ phong hóa bằng thiết bị SARAD[®] RTM 2200. Kết quả khảo sát được thể hiện trong bảng 3.1.

Bảng 3. 1 Nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m³) trong vỏ phong hóa khu vực xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang.

Điểm đo	Tọa độ		Rn-222		Rn-220	
	Vĩ độ	Kinh độ	TB	STDEV	TB	STDEV
BĐ 60	23,2161	105,0497	773,72	±168,22	19.719,72	±4.860,13
BĐ 61	23,2163	105,0408	10.792,43	±2.573,24	26.717,14	±725,90

TB: Trung bình; STDEV: Độ lệch chuẩn; BĐ 60: được tính toán trên 5 chu kỳ đo; BĐ 61: được tính toán trên 5 chu kỳ đo.

Hai điểm khảo sát khí đất BĐ 60, BĐ 61 đều nằm trong khu vực nhà trình tường được khảo sát chi tiết. Điểm khảo sát BĐ 60 nằm ở vị trí sườn đồi, điểm khảo sát BĐ 61 nằm ở vị trí gần con suối, tương ứng với kết quả khảo sát nồng độ các đồng vị khí radon ở BĐ 61 cao hơn BĐ 60 (Bảng 3.1). Các nghiên cứu về khí radon trong đất ở Việt Nam trước đây đều chỉ tập trung nghiên cứu đồng vị khí Rn-222. Nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong khí đất ở khu vực nghiên cứu có xu hướng cao hơn so với một số nghiên cứu ở khu vực khác ở Việt Nam như Thừa Thiên Huế (~ 3.605 Bq/m³) [Pham Tich Xuan và cs., 2020]; Ninh Sơn – Ninh Thuận (~ 1.000 Bq/m³) [Huynh Nguyen Phong Thu và cs., 2018]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu của Trần Trọng Huệ và cộng sự [2004], khí đất ở khu vực huyện Yên Minh (điểm khảo sát tại khu vực dân cư Mậu Duệ và thị trấn Yên Minh) cho kết quả khảo sát nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 trong khí đất lên đến ~ 36.000 Bq/m³. Không chỉ có đồng vị khí Rn-222, kết quả nồng độ đồng vị khí Rn-220

trong khí đất ở luận án này lên đến $> 26.000 \text{ Bq/m}^3$. Điều này cho thấy, nguồn khí radon trong lớp vỏ phong hóa ở khu vực nghiên cứu là khá lớn.

Nguồn khí radon trong khí đất đến từ quá trình phân rã urani và thori trong vỏ phong hóa. Phân tích thành phần urani và thori trong vỏ phong hóa (đất thổ nhưỡng và trầm tích deluvi) cho kết quả như trong Bảng 3.2.

Bảng 3. 2 Hoạt độ phóng xạ (quang phổ gamma phòng nền thấp – detector HPGe) và hàm lượng các nguyên tố phóng xạ (quang phổ khối ICP_MS) trong mẫu đất làm nhà.

	U-238	Ra-226	Th-232	Ra-224
Hoạt độ (Bq/kg)	$63,6 \pm 3,9$	$38,9 \pm 0,9$	$112,2 \pm 2,4$	$108,5 \pm 2,2$
Hàm lượng (ppm)	$4,2 \pm 0$	-	$16,9 \pm 0,6$	-

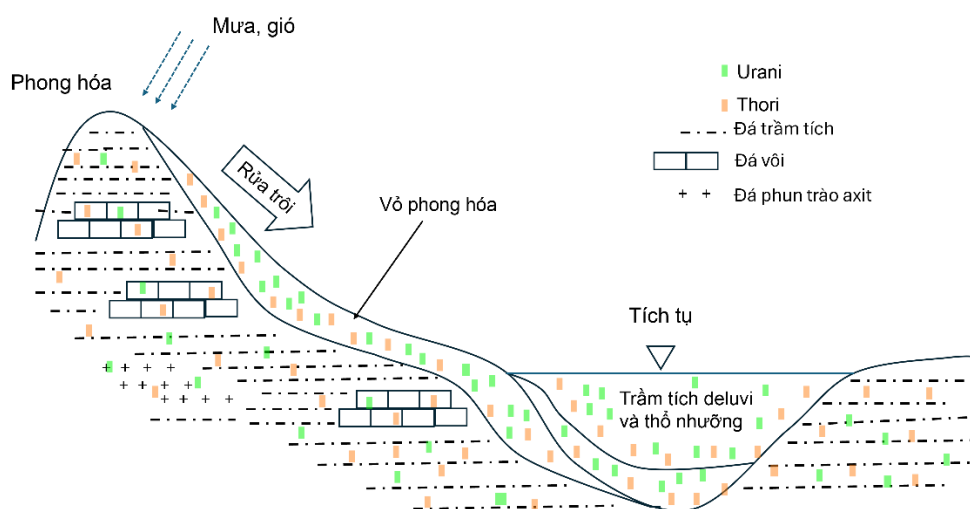
Hàm lượng các nguyên tố phóng xạ mẹ (urani và thori) trong vỏ phong hóa lần lượt là 4,2 ppm và 16,9 ppm. Hoạt độ phóng xạ của các nguyên tố mẹ phân rã ra khí radon trong vỏ phong hóa lần lượt là 63,6 Bq/kg (U-238) và 112,2 Bq/kg (Th-232).

Vỏ phong hóa khu vực xã Bạch Đích là sản phẩm phong hóa của các đá thuộc hai hệ tầng là hệ tầng Sông Hiến và hệ tầng Bắc Sơn. Hệ tầng Sông Hiến có thành tạo chủ yếu là lục nguyên có chứa đá phun trào axit, thành phần chủ yếu có đá phiến sét xám sẫm [Đặng Trần Huyền, 2009]. Theo các nghiên cứu trên thế giới, các loại đá phun trào axit thuộc loại đá giàu urani; các đá phiến sét có hàm lượng urani và thori cao nhất trong các đá trầm tích ($\sim 4 \text{ mg/kg}$ đối với urani và $\sim 12 \text{ mg/kg}$ đối với thori) [Agnieszka, 2017]. Trải qua quá trình phong hóa, urani và thori trong đá gốc được hòa tan, rửa trôi và làm giàu trong lớp đất thổ nhưỡng – vỏ phong hóa.

Hệ tầng Bắc Sơn có thành tạo chủ yếu là đá vôi dolomit có chứa silic [Đoàn Nhật Trường, 2009]. Thori ít bị hòa tan và dễ dàng tạo phức với các ion carbonat và được giữ trong đá. Trải qua quá trình phong hóa, chúng tách khỏi ion carbonat

và ở lại trong lớp cận phong hóa. Các dòng nước hòa tan urani, nhất là trong mùa mưa, quá trình khử diễn ra khiến U^{6+} chuyển thành U^{4+} hấp phụ vào các hạt keo sét mang điện âm [Qiang và cs., 2023]. Điều này cũng đã được chứng minh trong một số nghiên cứu trên thế giới, các sản phẩm phong hóa từ đá carbonat có hàm lượng urani và thori lớn hơn so với các đá khác, tạo nên một số dị thường trong quá trình khảo sát khí radon ở vùng karst. Như vậy, quá trình phong hóa đá carbonat tạo nên vỏ phong hóa terra rossa và trầm tích deluvi có chứa thori và urani được tích tụ.

Lớp vỏ phong hóa của khu vực nghiên cứu có thể được làm giàu và tích tụ nguyên tố mẹ urani và thori theo sơ đồ Hình 3.1. Hàm lượng các nguyên tố phóng xạ trong vỏ phong hoá, đặc biệt, thori (16,9 ppm) cao hơn trung bình trong đá trầm tích (~ 12 ppm) và trong đá carbonat (~ 2 ppm) [Agnieszka, 2017]. Hoạt độ các đồng vị phóng xạ của vỏ phong hóa trong nghiên cứu, Ra-226 ~38,9 Bq/kg và Th-232 ~112,2 Bq/kg, cũng cao hơn trung bình hoạt độ các đồng vị phóng xạ tương ứng trong đất tự nhiên trên thế giới, Ra-226 ~35 Bq/kg và Th-232 ~30 Bq/kg [UNSCEAR, 1982, 2000].

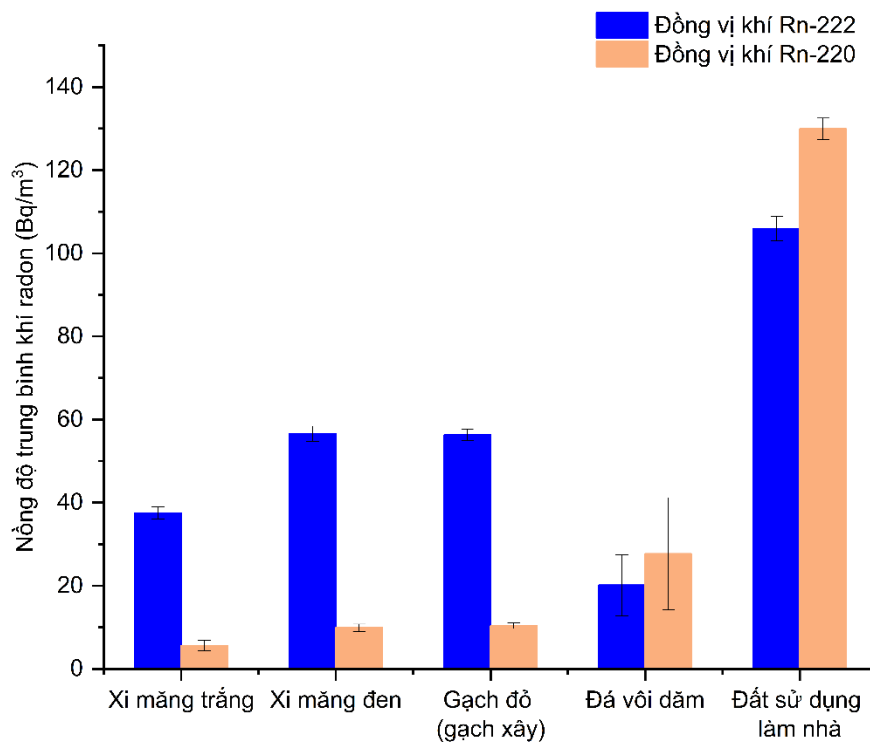


Hình 3. 1 Quá trình làm giàu urani và thori lớp vỏ phong hóa.

3.1.2. Từ vật liệu xây dựng

Nồng độ các đồng vị khí radon trong thí nghiệm thoát các đồng vị khí radon từ loại vật liệu xây dựng được thể hiện trong Hình 3.2. Kết quả cho thấy nồng độ các đồng vị khí radon giải phóng từ các vật liệu xây dựng thông thường (xi măng trắng, xi măng đen, gạch đỏ, đá vôi dăm) đều có $< 100 \text{ Bq/m}^3$; trong đất sử dụng làm nhà trình tường $> 100 \text{ Bq/m}^3$. Như vậy, đất làm nhà trình tường là vật liệu xây dựng có khả năng giải phóng khí radon vào môi trường không khí cao nhất trong các loại vật liệu.

Khảo sát nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà được thực hiện tại các kiểu nhà được xây dựng từ các loại vật liệu khác nhau. Các kiểu nhà tương ứng với các vật liệu xây dựng khác nhau được chia thành 2 nhóm: (1) nhóm nhà được xây dựng bằng các vật liệu thông thường (bê tông, xi măng, gạch đỏ, ...) và (2) nhóm nhà trình tường. Kết quả cho thấy sự khác biệt về nồng độ khí radon trong các nhóm nhà (Bảng 3.3, Hình 3.3).



Hình 3. 2 Biểu đồ nồng độ trung bình khí radon trong vật liệu xây dựng.

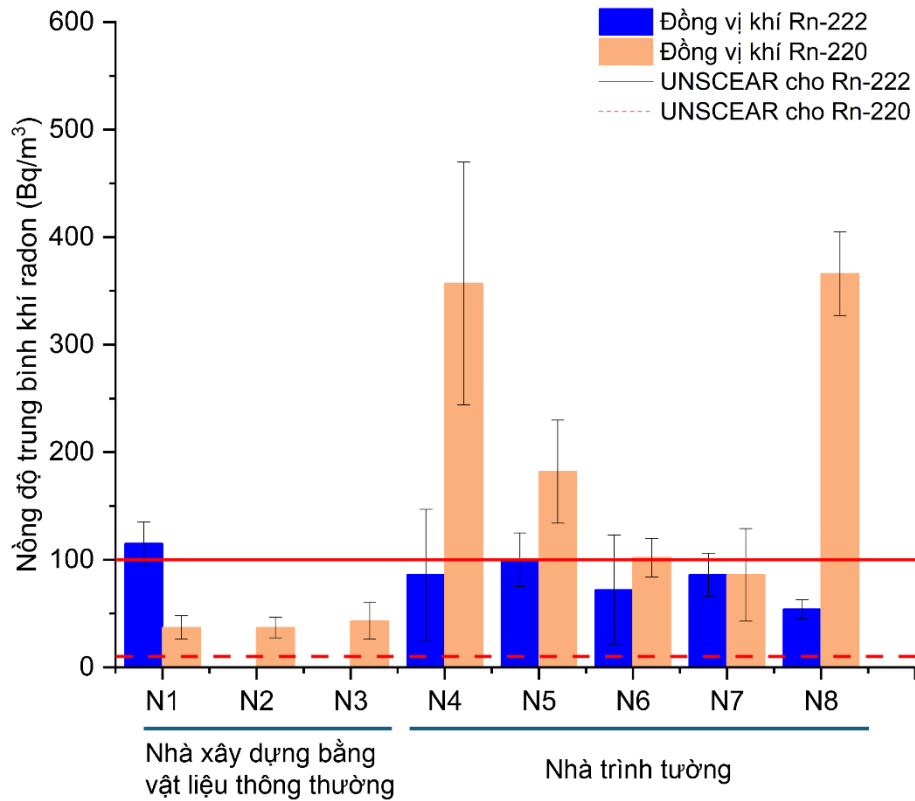
Bảng 3. 3 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m³) trong các kiểu nhà ở khu vực nghiên cứu (số điểm đo mỗi nhà, n = 5).

Nhóm nhà	Kiểu nhà	Ký hiệu	Rn-222		Rn-220	
			TB	STDEV	TB	STDEV
Nhà xây dựng bằng vật liệu thông thường	Nhà bê tông mới (Phố Cổ - Đồng Văn)	N1	115	±20	37	±11
	Nhà bê tông cao tầng (Phố Cổ - Đồng Văn)	N2	0	0	37	±26
	Nhà bê tông đang sử dụng (N3, Bạch Đích - Yên Minh)	N3	0	0	43	±21
Nhà trình tường	Nguyên bản (N4, Bạch Đích - Yên Minh; N5, Lũng Cầm - Đồng Văn)	N4	86	±61	357	±113
		N5	100	±25	182	±48
	Có tường được che phủ bằng giấy bìa (Phố Cổ – Đồng Văn)	N6	72	±51	102	±18
	Có tường được che phủ bằng tấm bạt mỏng (Phố Cổ – Đồng Văn)	N7	86	±20	86	±43
	Được xây dựng ở Hà Nội bằng đất vỏ phong hóa xã Bạch Đích – Yên Minh	N8	244	±65	697	±39

TB: Trung bình; STDEV: Độ lệch chuẩn

Trong môi trường không khí trong nhà của nhóm nhà được xây dựng bằng vật liệu thông thường, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 rất thấp, nhiều vị trí đo có giá trị ~ 0 Bq/m³; trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 < 50 Bq/m³.

Trong nhóm nhà trình tường, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 dao động từ 72 – 244 Bq/m³; nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-220 dao động từ 86 – 357 Bq/m³.



Hình 3. 3 Sơ đồ trung bình nồng độ khí radon trong các kiểu nhà.

Trong nhóm nhà được xây dựng bằng vật liệu thông thường, nồng độ đồng vị khí Rn-222 ~ 0 Bq/m³ được hiểu rằng do nồng độ khí radon trong môi trường nằm ngoài khoảng đo mà thiết bị đo có thể ghi nhận (Hình 3.3). Nhà mới được xây dựng bằng bê tông (N1), nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 cao > 100 Bq/m³ do nhà nằm ở khu vực có đứt gãy và dòng suối chảy qua nhà. Mặt khác, ngôi nhà này vừa được xây dựng và sơn tường nhà trước thời gian thực hiện khảo sát 1 tháng. Một số nghiên cứu trên thế giới cũng chỉ ra một số loại sơn tường có chứa thành phần hóa học dạng bay hơi (formaldehyd, benzen, toluene), chúng dễ dàng thoát ra từ sơn đi vào môi trường không khí. Quá trình thoát khí của các chất hóa học dạng bay hơi có thể kéo theo sự thoát đồng vị khí Rn-222. Điều này có

thể giải thích nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong ngôi nhà mới xây này cao hơn so với các ngôi nhà được xây dựng cùng loại vật liệu khác [Haghani và cs., 2013; Ali và Hawraa, 2018]. Ngoài nhà (N1), nồng độ khí đồng vị khí Rn-222 trong nhóm nhà được xây dựng bằng vật liệu thông thường đều có nồng độ nằm dưới ngưỡng khuyến cáo cho nhà đang sử dụng ($< 200 \text{ Bq/m}^3$) [TCVN 7889:2008], và cho không khí trong môi trường nhà ở trên thế giới ($< 100 \text{ Bq/m}^3$) [UNSCEAR, 2000].

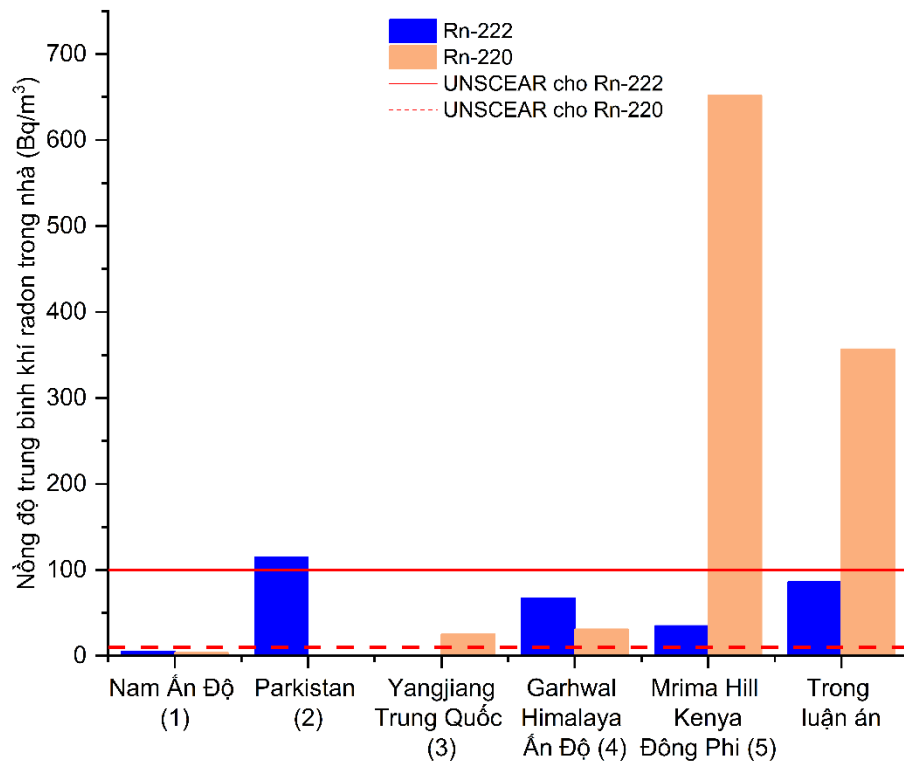
Trong nhóm nhà trình tường, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 đều $< 100 \text{ Bq/m}^3$ (Hình 3.3) ($50 \text{ Bq/m}^3 - 150 \text{ Bq/m}^3$) đều nằm trong ngưỡng khuyến cáo an toàn cho môi trường không khí trong nhà của tổ chức thế giới (UNSCEAR) và Việt Nam (TCVN).

Hiện nay, UNSCEAR là tổ chức duy nhất đưa ra nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí nói chung là 10 Bq/m^3 , được xem như mức khuyến cáo cho nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí) [UNSCEAR, 2000]. Đối chiếu kết quả khảo sát khí Rn-222 trong môi trường không khí trong nhà, các kiểu nhà đều có trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 cao hơn mức khuyến nghị mà UNSCEAR đưa ra, đặc biệt trong nhà trình tường (Hình 3.3). Trong nhóm nhà được xây dựng bằng vật liệu thông thường, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 đều có giá trị ghi nhận, $< 50 \text{ Bq/m}^3$. Trong nhà trình tường, nồng độ đồng vị khí Rn-222 dao động $72 \text{ Bq/m}^3 - 357 \text{ Bq/m}^3$, cao hơn nhiều lần mức khuyến nghị của UNSCEAR. Trong một số nhà trình tường có sử dụng vật liệu che phủ tường, như giấy bìa và bạt, (nhà trình tường N6, N7), trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 có xu hướng thấp hơn trong môi trường không khí các nhà trình tường có tường nguyên bản còn lại (Hình 3.3). Điều này cho thấy, các vật liệu che phủ tường đất có thể đã làm giảm nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong nhà trình tường. Mặt khác, nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí nhà trình tường (N4) và (N8), có cùng vật liệu xây dựng, nhưng được xây dựng tại các vị trí địa lý có đặc điểm khác nhau, cũng cho kết quả tương tự nhau (Hình 3.3). Có thể thấy, khí radon trong môi trường không khí trong nhà

trình tường chủ yếu đến từ vật liệu xây dựng và việc sử dụng vật liệu che phủ bề mặt tường đất có thể ngăn sự thoát đồng vị khí Rn-220 từ tường ra ngoài môi trường không khí trong nhà.

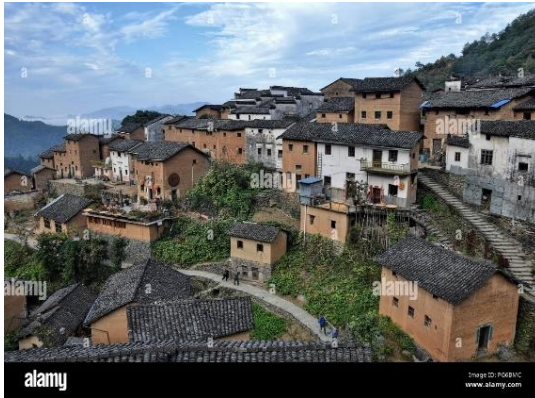
Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong nhà trình tường trong luận án thấp hơn trong nhà đất truyền thống ở Parkistan và Tehri Garhwal, Ấn Độ, và cao hơn so với nhà đất truyền thống ở Đông Phi và Nam Ấn Độ (Hình 3.4) [Kandari và Ramola, 2009; Sivakumar, 2010; Mahmood và cs., 2013; Lei và cs., 2015; Ramola và cs., 2016; Margaret và cs., 2019]. Các kiểu nhà đất đều có trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 nằm trong ngưỡng an toàn ($<100 \text{ Bq/m}^3$) của UNSCEAR đối với môi trường không khí trong nhà. Trong khi đó, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong nhà trình tường trong luận án chỉ thấp hơn so với nhà đất ở Đông Phi, nhưng cao hơn nhiều lần so với các nhà đất, gạch không nung khác ở Trung Quốc và Ấn Độ (Hình 3.4). Các kiểu nhà bùn đất ở một nơi có trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 tương đương nhóm nhà xây dựng bằng vật liệu thông thường trong luận án, ở Nam Ấn Độ $< 10 \text{ Bq/m}^3$ [Sivakumar, 2010]. ở Trung Quốc và Ấn Độ $< 50 \text{ Bq/m}^3$ [Lei và cs., 2015; Margaret và cs., 2019]. Tuy nhiên, trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong nhà bùn, đất ở Mrima Hill Kenya – Đông Phi $\sim 700 \text{ Bq/m}^3$ [Kandari và Ramola, 2009], cao gấp đôi trong nhà trình tường ở Bạch Đích. Sự khác nhau về nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà giữa các quốc gia cho cùng kiểu nhà được xây dựng từ bùn, đất, gạch không nung có thể do nhiều yếu tố (như kiến trúc nhà, tính chất vật liệu xây dựng, đặc điểm địa chất khu vực, ...). Nhà được xây dựng từ bùn, đất của Trung Quốc, Ấn Độ và Parkistan đều có điểm chung là có cửa chính cao, kiến trúc nhà thường có 2 tầng, nhiều cửa sổ, có sự lưu thông không khí tốt giữa môi trường trong và ngoài nhà (Hình 3.5a). Trong khi đó, nhà trình tường trong luận án và nhà bùn, đất ở Đông Phi đều chỉ có một cửa chính thấp, rất ít cửa sổ và cửa sổ thường rất nhỏ (Hình 3.5b), không gian trong nhà gần như kín hoàn toàn, ít có sự trao đổi không khí với môi trường bên ngoài. Có thể thấy, khí radon bị tích tụ và

tích lũy trong không khí nhà ở một phần do kiến trúc của ngôi nhà và vật liệu xây dựng nhà, trong đó khí radon trong vật liệu và trong các kiểu nhà được xây dựng từ vật liệu thông thường thấp hơn so với vật liệu tự nhiên (đất thổ nhưỡng và trầm tích deluvi) và nhà trình tường.

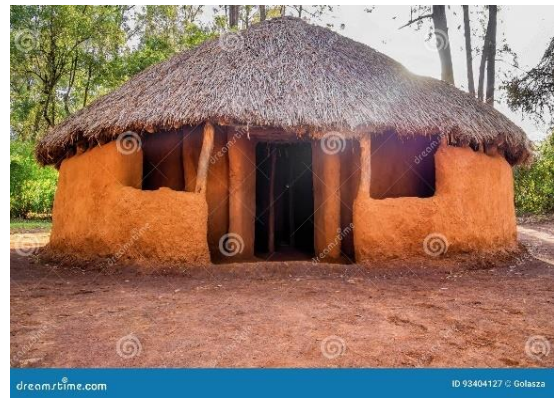


Hình 3. 4 Biểu đồ trung bình nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà ở trong các kiểu nhà được xây dựng từ bùn, đất, gạch không nung trên thế giới và trong luận án.

(1): Sivakumar, 2010; (2) Mahmood và cs., 2014; (3) Lei và cs., 2015; (4) Margaret và cs., 2019; (5) Kandari và Ramola, 2009.



a



b

Hình 3. 5 Nhà được xây dựng từ bùn, đất (a) ở Trung Quốc cao và nhiều cửa sổ lưu thông không khí, (b) ở Đông Phi thấp và không gian đóng kín

[Nguồn: <https://www.alamy.com/the-yangchan-tulou-the-chinese-rural-earthen-dwelling-in-anhui-province-in-china-image216499820.html>; <https://www.dreamstime.com/stock-photo-traditional-tribal-hut-kenyan-people-nairobi-kenya-bomas-east-africa-image93404127>]

3.1.3. Từ môi trường không khí ngoài trời khu vực nghiên cứu

Nồng độ các đồng vị khí radon ở môi trường không khí ngoài trời được xác định bằng phương pháp đo nhanh của thiết bị SARAD[®] RTM 2200 dọc theo các tuyến đường chính và một số điểm khu vực người dân lựa chọn canh tác và sinh sống qua ba huyện Quán Bạ (25 điểm), Yên Minh (114 điểm), Đồng Văn (129 điểm). Luận án lựa chọn tuyến đường chính để thực hiện khảo sát nồng độ khí radon ngoài trời do cơ sở hạ tầng sẵn có, dễ dàng và thuận tiện trong quá trình tiếp cận và khảo sát. Mặt khác, tuyến đường chính cũng là mặt cắt địa chất tương đối điển hình ở khu vực nên kết quả khảo sát có thể đánh giá sự phân bố khí radon hiệu quả đối với các hệ tầng khu vực nghiên cứu, có thể dễ dàng phát hiện các dị thường trong quá trình khảo sát. Kết quả khảo sát nồng độ khí radon trong môi trường không khí ngoài trời được biểu diễn tóm tắt trong Bảng 3.4 và Hình 3.6, số liệu chi tiết được thể hiện trong Phụ lục 1.

Trung bình nồng độ trung đồng vị khí Rn-222 ngoài trời đều $< 50 \text{ Bq/m}^3$, sắp xếp theo thứ tự giảm dần, cao nhất ở huyện Đồng Văn, Yên Minh, và thấp

nhất ở huyện Quán Bạ. Theo tuyến khảo sát, đồng vị khí Rn-222 thường xuất hiện dị thường dọc theo vị trí các đứt gãy. Các giá trị nồng độ đồng vị khí Rn-222 > 200 Bq/m³ xuất hiện ở các tuyến khảo sát thuộc huyện Đồng Văn và huyện Yên Minh. Tại tuyến khảo sát huyện Đồng Văn, nồng độ đồng vị khí Rn-222 cao nhất tập trung ở cánh phức nếp lồi Bắc Thái – Lang Hạ, dọc theo các đứt gãy hướng Tây Bắc – Đông Nam. Khu vực này có địa hình karst là chủ yếu, chứa nhiều đá vôi dập vỡ xen kẽ các lớp đá vôi mỏng kết hợp với độ thấm và độ rỗng cao của đá vôi, là môi trường thuận lợi đưa đồng vị khí Rn-222 từ dưới sâu đi lên trên mặt đất.

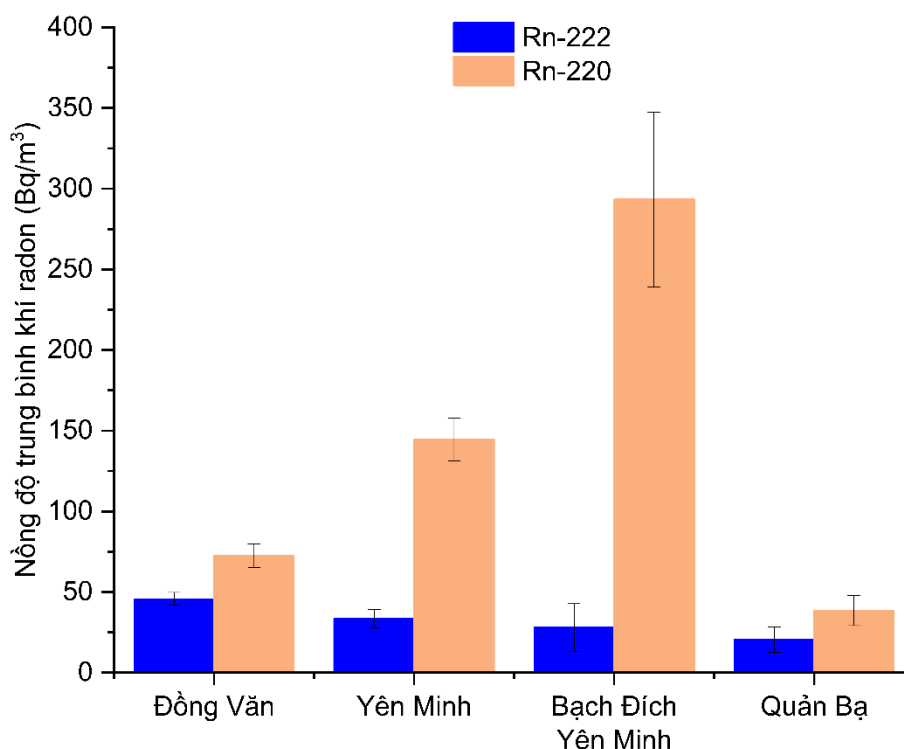
Bảng 3. 4 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m³) trong môi trường không khí ngoài trời khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu	Số điểm đo (n)	Rn-222		Rn-220	
		TB	STDEV	TB	STDEV
Đồng Văn	129	45,72	±4,02	72,47	±7,43
Yên Minh	114	33,55	±5,58	697,26	±96,68
Bạch Đích – Yên Minh	73	27,89	±14,91	293,40	±54,11
Quán Bạ	25	20,43	±7,85	38,55	±9,31

TB: Trung bình; STDEV: Độ lệch chuẩn

Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 theo tuyến khảo sát cũng biến đổi ở từng khu vực, cao nhất ở huyện Yên Minh (697,26 Bq/m³) và thấp nhất ở huyện Quán Bạ (38,55 Bq/m³). Các dị thường của đồng vị khí Rn-220 cũng xuất hiện dọc theo vị trí các đứt gãy, và có giá trị > 100 Bq/m³, và khu vực có hoạt động khai thác khoáng sản, như ở xã Mậu Duệ. Thêm vào đó, đồng vị khí Rn-220 có xu hướng tập trung cao ở các vùng trũng thấp và các hồ sụt, với giá trị > 200 Bq/m³. Tuyến khảo sát ở huyện Yên Minh nằm trên khu vực hoạt động của nhiều đứt gãy và các thành tạo địa chất chính gồm lục nguyên và carbonat xen kẽ nhau. Đồng vị

khí Rn-220 tập trung cao ở mặt cắt này có thể là do hàm lượng thori trong thành phần trầm tích lục nguyên.

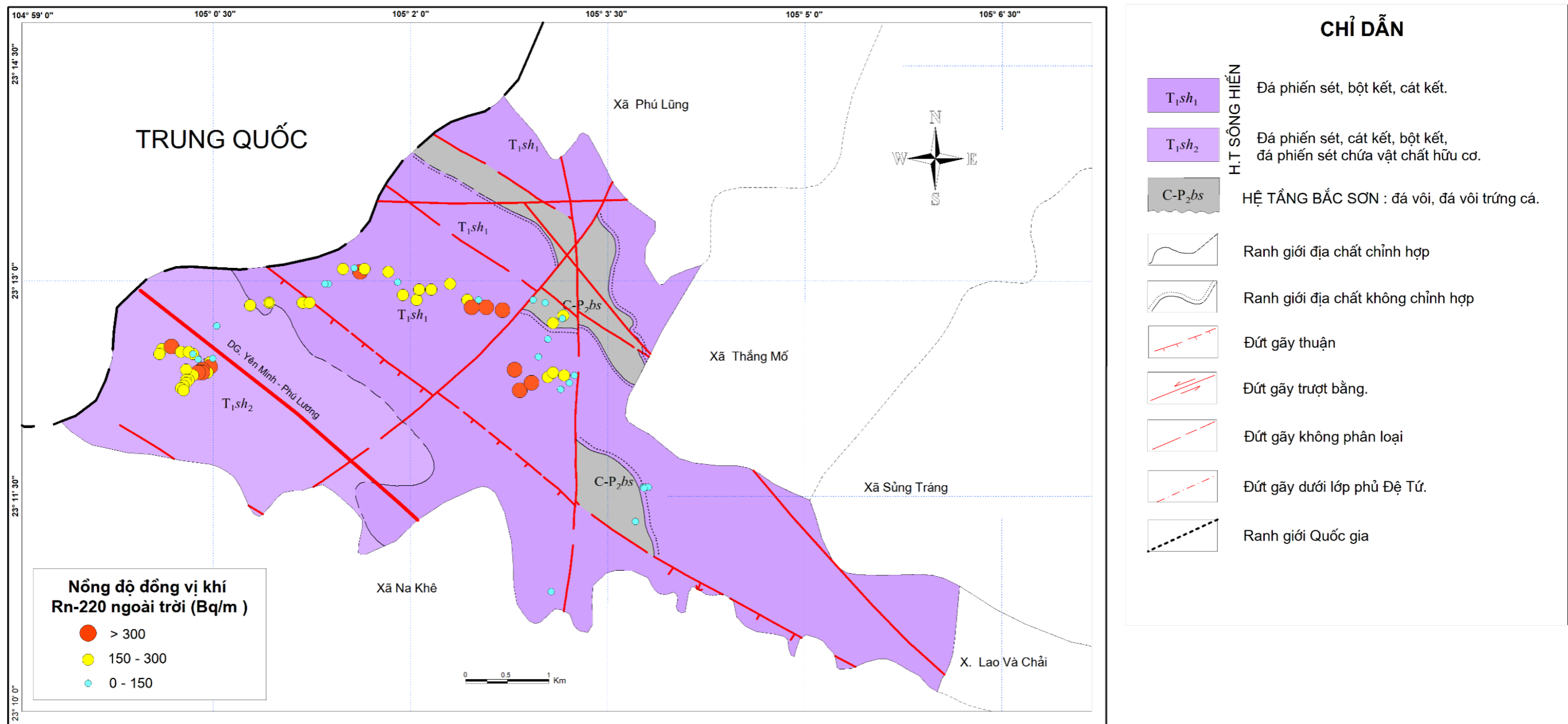


Hình 3. 6 Sơ đồ trung bình nồng độ khí radon ngoài trời khu vực nghiên cứu.

Tại xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, luận án đã thực hiện 73 điểm đo ngoài trời (Phụ lục 1). Khu vực xã Bạch Đích tại một số điểm khảo sát xuất hiện dị thường nồng độ đồng vị khí Rn-220, các điểm dị thường này đa phần nằm ở khu vực trên đứt gãy và ranh giới giữa các lớp đá trong các hệ tầng (Hình 3.7). Khu vực không khí ngoài trời có trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 và Rn-220 lần lượt là ~ 28 Bq/m³ và ~ 293 Bq/m³. Vị trí địa lý xã Bạch Đích nằm ngay trên đứt gãy chính Yên Minh – Phú Lương và nằm hoàn toàn trong hệ tầng Sông Hiến. Đặc điểm đá của hệ tầng Sông Hiến là đá phiến sét màu sẫm và có chứa thành phần đá phun trào axit, đây là hai loại đá có chứa hàm lượng nguyên tố mẹ urani và thori cao trong các đá tự nhiên [Đặng Trần Huyền, 2009]. Các nguyên tố urani và thori tạo thành khí radon trong quá trình phân rã phóng xạ trong đá gốc và đứt

gãy Yên Minh – Phú Lương cắt qua đá gốc mở đường dẫn cho khí radon đi lên trên bề mặt trái đất. Một phần khí radon sẽ đi vào các lỗ hổng trong lớp vỏ phong hóa (đất thổ nhưỡng và trầm tích deluvi), lưu trú hoặc hòa tan trong nước ngầm chứa trong các thấu kính cát sạn. Một phần khí radon phát tán vào môi trường không khí. Điều này giải thích nguyên nhân vì sao nồng độ khí radon trong môi trường không khí ngoài trời và vỏ phong hóa khu vực xã Bạch Đích cao hơn các khu vực khác.

Nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 trong khu vực xã Bạch Đích có xu hướng cao hơn so với một số điểm khảo sát khu vực Hà Nội, Tuyên Quang và Phú Thọ và trên thế giới [Čeliković và cs., 2022] (Bảng 3.5). Nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí ngoài trời trên thế giới thường $< 100 \text{ Bq/m}^3$, nhiều nơi thậm chí còn $< 50 \text{ Bq/m}^3$ (như Slovenia, Trung Quốc, Nhật Bản, Đức, ...) [Čeliković và cs., 2022]. Một số ít các khu vực có nồng độ trung bình năm $> 200 \text{ Bq/m}^3$, chẳng hạn như Cộng hòa Serbia [Čeliković và cs., 2022]. Nồng độ đồng vị khí Rn-222 ngoài trời thấp nhất trên thế giới phải kể tới Cộng hòa Malta (số liệu đo vào mùa hè) và Cộng hòa Ireland ($< 10 \text{ Bq/m}^3$) [Čeliković và cs., 2022]. Nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 ngoài trời khu vực xã Bạch Đích vẫn nằm trong mức khuyến cáo cho nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí ngoài trời mà UNSCEAR đưa ra (100 Bq/m^3) [UNSCEAR, 2000].



Hình 3. 7 Sơ đồ phân bố nồng độ đồng vị khí Rn-220 ngoài trời khu vực xã Bạch Đích [Nguồn: Bản đồ địa chất miền Bắc Việt Nam tỷ lệ 1:500.000, Trần Đức Lương và Nguyễn Xuân Bao, 1977].

Bảng 3. 5 Thống kê một số khảo sát nồng độ đồng vị khí Rn-222 ở môi trường không khí ngoài trời trên thế giới [Čeliković và cs., 2022] và ở Việt Nam (*trong luận án thực hiện khảo sát)

Thành phố, quốc gia	Số điểm đo	Mùa	Nồng độ (Bq/m ³)
Missouri, Mỹ	82	Hàng năm	11 – 110
Iowa, Mỹ	111	Hàng năm	7 – 55
Minesota, Mỹ	64	Hàng năm	4 – 55
Thổ Nhĩ Kỳ	4730	Mùa đông	19 – 63,5
		Mùa hè	7 – 28
Slovenia	60	Hàng năm	3,7 – 41
Trung Quốc	101	Hàng năm	3,6 – 23,9
Trung Quốc	165	Hàng năm	3 – 50
Cộng hòa Serbia	56	Hàng năm	< 244
Cộng hòa Ireland	18	Hàng năm	4,2 – 7,7
Nhật Bản	696	Hàng năm	1,8 – 35,3
Đức	173	Hàng năm	3 – 31
Cộng hòa Malta	3	Mùa hè	0,8 – 3,6
Cộng hòa Síp	12	Tháng 8	2 – 134
Đông Nam Á	20	3 tháng	5,3 – 17
Tây Ban Nha	25	Hàng năm	1,2 – 15,8
Phú Thọ, Việt Nam*	16	Tháng 3	14 - 43
Tuyên Quang, Việt Nam*	30	Tháng 3	0 – 114
Hà Nội, Việt Nam*	34	Tháng 3	14 – 29

Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong môi trường không khí ngoài trời ở xã Bạch Đích (~293 Bq/m³) cao hơn trung bình nồng độ đồng vị Rn-220 trong môi trường không khí ngoài trời (~ 10 Bq/m³) của UNSCEAR [2000] và cao

hơn môi trường không khí ngoài trời ở các tỉnh thành lân cận như Hà Nội, Tuyên Quang và Phú Thọ, tuy nhiên, vẫn thấp hơn nhiều so với một số nơi trên Thế giới như Trung Quốc (Dương Giang, Cam Túc) [Kudo và cs., 2015; Shang và cs., 2008] (Bảng 3.6).

Bảng 3. 6 Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 (Bq/m³) trong môi trường không khí ngoài trời trên Thế giới và ở Việt Nam.

STT	Thành phố, quốc gia	TB	Nguồn dữ liệu
1	Bulgaria	170	Dobromir và Dimitar, 2024
2	Cameroon	173	Bineng và cs., 2020
3	Canada	114	Chen và cs., 2012
4	Dương Giang (Trung Quốc)	1247	Kudo và cs., 2015
5	Cam Túc (Trung Quốc)	433	Shang và cs., 2008
6	Odisha (Ấn Độ)	123	Omori và cs., 2016
7	Ireland	22	Laughlin và cs., 2010
8	Macedonia	37	Stojanovska và cs., 2013
9	Mexico	82	Martinez và cs., 2004
10	Srpska	63	Curguz và cs., 2015
11	Kosovo	136	Gulan và cs., 2012
12	Serbia	116	Zunic và cs., 2017
13	Indonesia	139	Saputra và cs., 2020
14	Phú Thọ, Việt Nam	37(±0)	Kết quả luận án khảo sát
15	Tuyên Quang, Việt Nam	74(±56)	Kết quả luận án khảo sát
16	Hà Nội, Việt Nam	59 (±33)	Kết quả luận án khảo sát
17	Huyện Yên Minh	697 (±97)	Kết quả luận án khảo sát
18	Xã Bạch Đích	293 (±54)	Kết quả luận án khảo sát

TB: Trung bình

Nhìn chung, nền khí radon trong tự nhiên khu vực xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang là cao hơn so với các khu vực khác do đặc điểm khu vực địa chất khu vực hình thành nên. Nồng độ khí radon trong nhà trình tường được xây dựng ở xã Bạch Đích có thể chịu ảnh hưởng nồng độ cao do nền không khí ngoài trời gây ra.

3.2. Quá trình thoát khí radon trong nhà trình tường

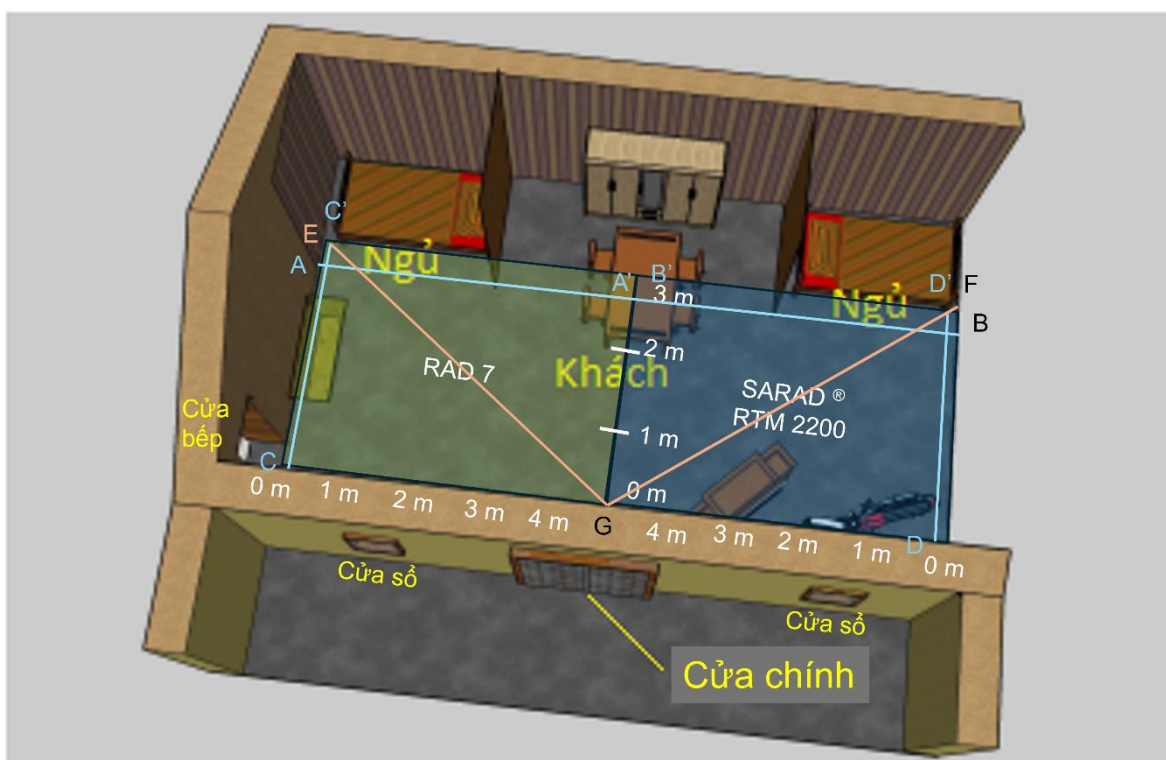
3.2.1. Sự phân bố nồng độ khí radon trong nhà trình tường

Sự phân bố nồng độ khí radon trong nhà được khảo sát tại một ngôi nhà trình tường của người dân tộc Nùng tại xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang. Ngôi nhà đã được xây dựng từ năm 1992 và đến thời điểm khảo sát, ngôi nhà vẫn được người dân sử dụng trong sinh hoạt hàng ngày. Thời gian thực hiện khảo sát vào hai mùa (tháng 7 tương ứng mùa mưa và tháng 1 tương ứng mùa khô), bằng hai thiết bị RAD7 và SARAD[®] RTM 2200. Các điểm đo được thiết kế theo mạng lưới trong nhà (Hình 2.8) và kết quả khảo sát nồng độ khí radon thể hiện trong Bảng 3.7 và Phụ lục 2.

Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 và Rn-220 trong môi trường không khí trong nhà, đo bằng thiết bị RAD7, trong mùa khô lần lượt là 42,52 ($\pm 16,03$) Bq/m³ và 455,73 ($\pm 77,21$) Bq/m³, trong mùa mưa lần lượt là 93,66 ($\pm 46,22$) Bq/m³ và 478,64 ($\pm 78,46$) Bq/m³. Giá trị nồng độ khí radon đo bằng thiết bị SARAD[®] RTM 2200, 78,14 ($\pm 6,31$) Bq/m³ cho đồng vị khí Rn-222 và 744,95 ($\pm 128,81$) Bq/m³ cho đồng vị khí Rn-220, có xu hướng cao hơn đo bằng thiết bị RAD7. Các kết quả đều cho thấy, nồng độ đồng vị khí radon trong mùa mưa có xu hướng cao hơn trong mùa khô. Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong không khí nhà trình tường đều < 100 Bq/m³ (nồng độ an toàn đối với đồng vị Rn-222), tuy nhiên trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 > 400 Bq/m³ (cao hơn rất nhiều trung bình nồng độ trong môi trường không khí 10 Bq/m³). Các kết quả về sự phân bố nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong nhà trình đã được công bố trong bài báo “²²⁰Rn

(thoron) geohazard in room air of earthen dwellings in Vietnam” [Duong Nguyen-Thuy và cs., 2019].

Để xây dựng được sự phân bố các đồng vị khí radon trong nhà trình tường, nghiên cứu khảo sát chi tiết nồng độ khí radon trong nhà trình tường theo từng mặt cắt khác nhau (Hình 3.8). AA' là mặt cắt từ tường đất ra giữa nhà bằng thiết bị RAD7, BB' là mặt cắt từ tường đất ra giữa nhà bằng thiết bị Sarad[®] RTM 2200. CC' là mặt cắt sát tường đất bằng thiết bị RAD7, DD' là mặt cắt sát tường đất bằng thiết bị Sarad[®] RTM 2200. EGF là mặt cắt xiên từ góc nhà đến cửa chính của cả 2 thiết bị.



Hình 3. 8 Mô hình nhà trình tường và các mặt cắt khảo sát.

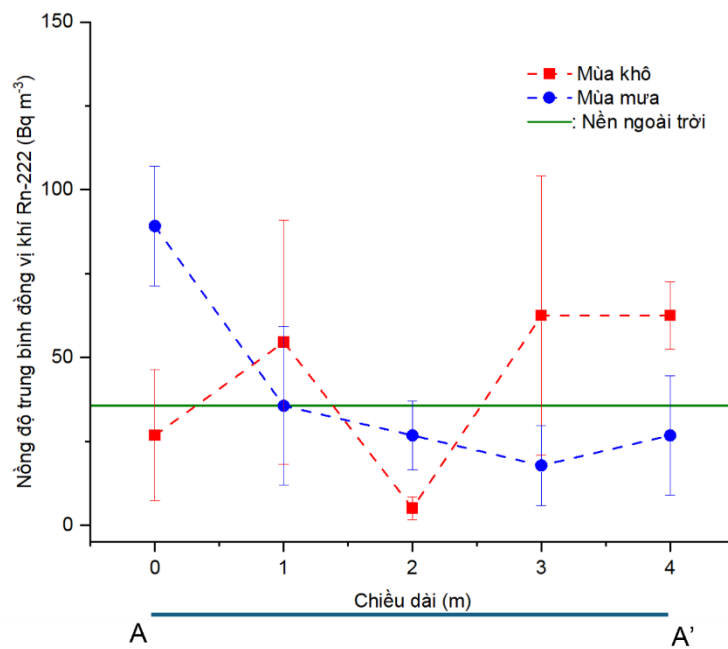
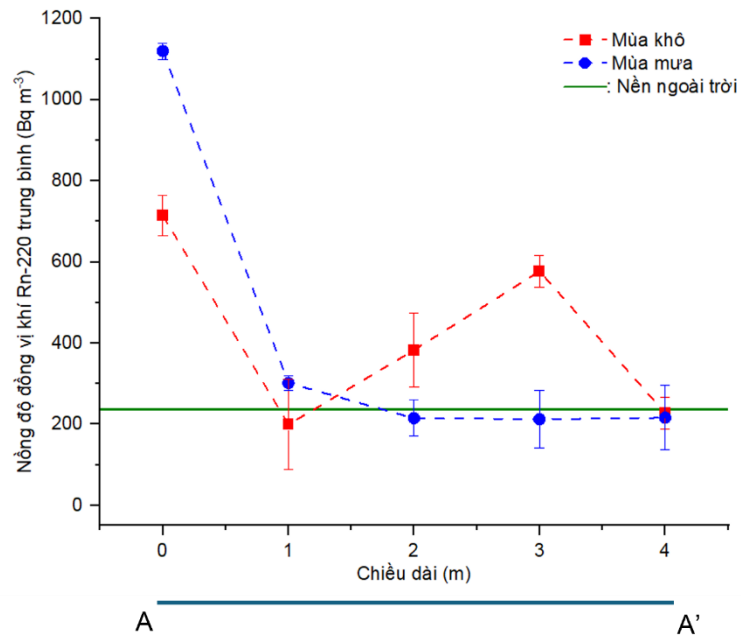
Tại mặt cắt AA', nồng độ khí radon ở khu vực gần tường đất có xu hướng cao hơn các vị trí khác. Xu hướng này nhìn thấy rõ nhất trong kết quả khảo sát vào mùa mưa và của đồng vị khí Rn-220. Nồng độ đồng vị khí Rn-222 có sự khác nhau giữa hai mùa (Hình 3.10). Mùa mưa, nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220) trong môi trường không khí nhà ở mặt cắt AA' đều có xu hướng đồng

nhất cao ở vị trí sát tường đất và giảm dần ra vị trí giữa nhà. Tuy nhiên, điều này không diễn ra ở mùa khô. Ở mùa khô, nồng độ khí radon từ tường đất đến giữa nhà không đồng nhất và tuyến tính. Các kết quả khảo sát nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà đều cao hơn nồng độ khí radon môi trường ngoài trời.

Bảng 3. 7 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m³) trong nhà trình tường

		Mùa khô		Mùa mưa	
Nhiệt độ trung bình (°C)		19 (±3)		28 (±4)	
		TB	STDEV	TB	STDEV
RAD7	Rn-222	42,52	±16,03	93,66	±46,22
	Rn-220	455,73	±77,21	478,64	±78,46
SARAD [®] RTM 2200	Rn-222	78,14	±6,31	NA	NA
	Rn-220	744,95	±128,81	NA	NA

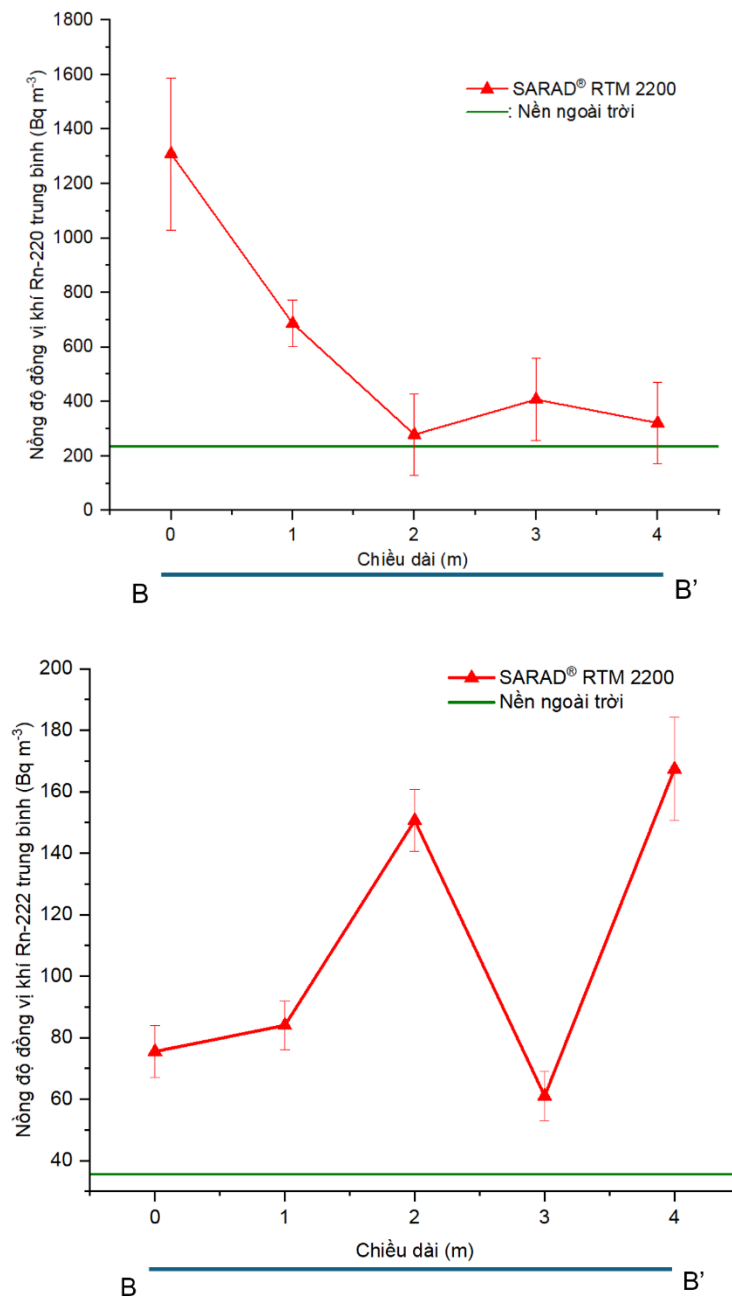
TB: Trung bình; STDEV: Độ lệch chuẩn; NA: Không đo



Hình 3. 9 Nồng độ khí radon theo mặt cắt AA'.

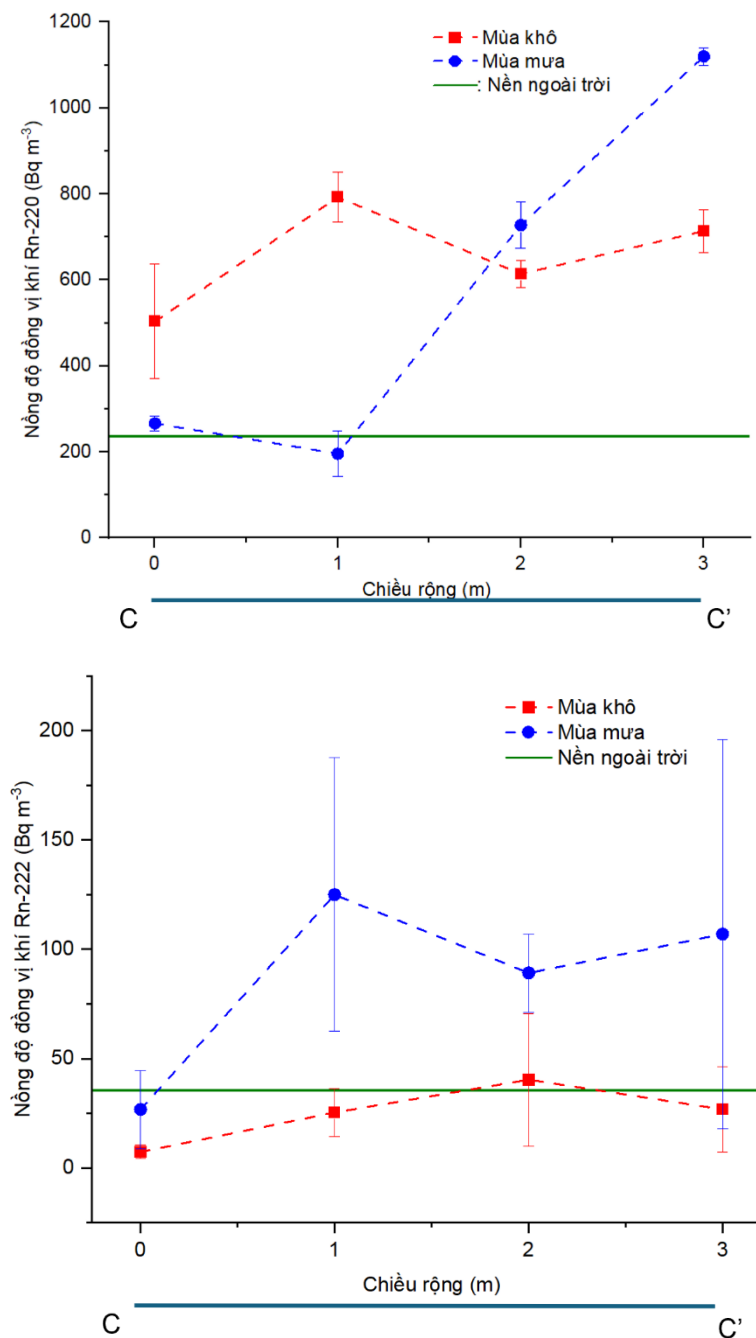
Tại mặt cắt BB' (Hình 3.10) đo bằng thiết bị SARAD[®] RTM 2200 vào mùa khô cho thấy nồng độ đồng vị khí Rn-220 cũng có xu hướng cao ở vị trí gần tường và giảm dần ở vị trí xa tường, giống xu hướng mùa mưa bên mặt cắt AA'. Như vậy, tường đất có thể là nguồn thoát khí radon trong môi trường không khí nhà ở. Đồng vị khí Rn-220 tập trung cao ở gần nguồn thoát khí (gần tường) và giảm dần

ở vị trí xa nguồn thoát khí (giữa nhà). Do đồng vị khí Rn-220 có chu kỳ bán rã ngắn, nên chúng khó có thể đi ra xa khỏi nguồn thoát khí. Các kết quả khảo sát nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà cũng cao hơn so với nồng độ nền ngoài trời.



Hình 3. 10. Biểu đồ nồng độ đồng vị khí radon theo mặt cắt BB'

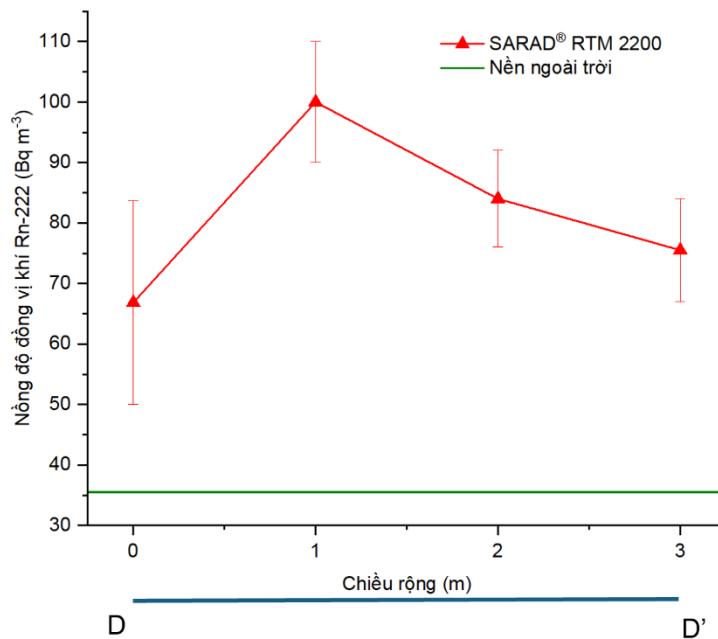
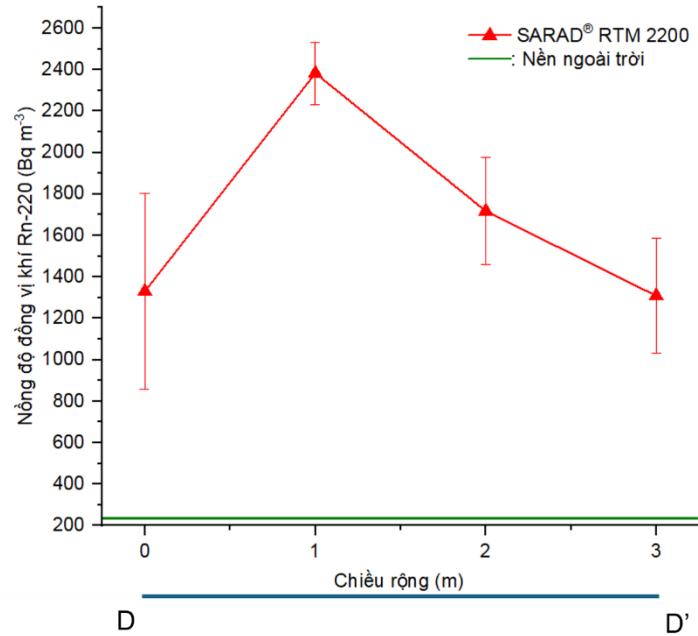
Tại mặt cắt CC' (Hình 3.11.) nồng độ đồng vị khí Rn-222 mùa mưa cao hơn mùa khô. Ở mùa khô, nồng độ đồng vị khí Rn-222 ở các vị trí có sự chênh lệch nhưng không nhiều, tăng cao nhất ở vị trí tường mặt sau đặt bếp nấu (~ 40 Bq/m³). Ở mùa mưa, nồng độ đồng vị khí Rn-222 tăng cao nhất ở vị trí gần cửa bếp (125 Bq/m³).



Hình 3. 11. Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt CC'.

Nồng độ đồng vị khí Rn-220 ở mặt cắt CC' vào mùa mưa có xu hướng ổn định hơn mùa khô. Ở vị trí sát 2 mặt tường, nồng độ đồng vị khí Rn-220 cao hơn ở vị trí cửa bếp. Nồng độ đồng vị khí Rn-220 có xu hướng tăng nhanh theo chiều CC' (từ cửa vào trong nhà). Đặc biệt, gần sát khu vực ngủ, nồng độ đồng vị khí Rn-220 đạt $\sim 1.200 \text{ Bq/m}^3$. Trái lại, vào mùa khô, nồng độ đồng vị khí Rn-220 ở mặt cắt này dao động từ $500 - 800 \text{ Bq/m}^3$.

Kết quả khảo sát mặt cắt DD' (Hình 3.12.) bằng thiết bị SARAD® RTM 2200 vào mùa khô cho thấy nồng độ khí radon có xu hướng tương tự nhau. Nồng độ đồng vị khí Rn-222 ở mặt cắt này dao động từ $65 - 100 \text{ Bq/m}^3$; nồng độ đồng vị khí Rn-220 dao động từ $1.300 - 2.400 \text{ Bq/m}^3$. Vị trí có nồng độ khí radon cao ở mặt cắt DD' là vị trí có tường có vết nứt to, gần cột nhà. Vết nứt này mở lối tạo kênh dẫn khí radon từ dưới sâu thoát vào môi trường không khí trong nhà. Vào mùa khô, nhiệt độ trong nhà cao hơn nhiệt độ ngoài trời, do vậy khí radon sau khi thoát vào môi trường không khí trong nhà theo cơ chế đối lưu và khuếch tán.

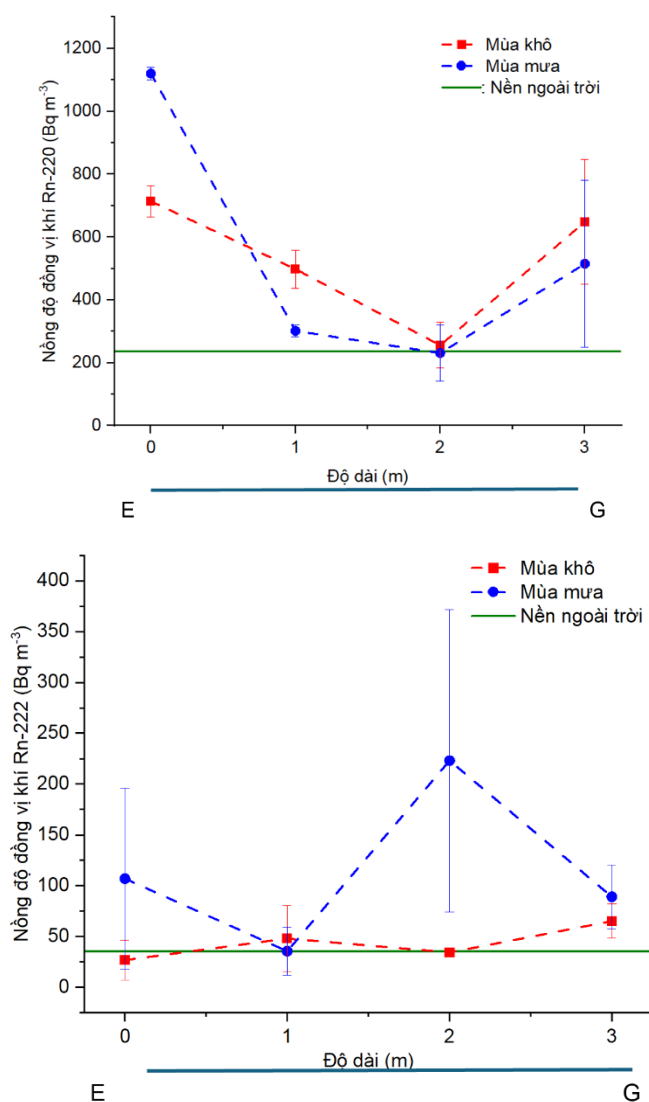


Hình 3. 12 Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt DD'.

Khảo sát mặt cắt EG và FG để thấy rõ được sự phân bố khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường. Mặt cắt EG cho kết quả nồng độ đồng vị khí Rn-222 mùa mưa cao hơn mùa khô (Hình 3.13). Mùa khô, nồng độ đồng vị khí Rn-222 ở các vị trí không chênh lệch nhiều. Mùa mưa, nồng độ đồng vị khí Rn-222 cao nhất ở vị trí gần giữa nhà, nơi vị trí có cột nhà bằng gỗ. Ở vị trí này, bề

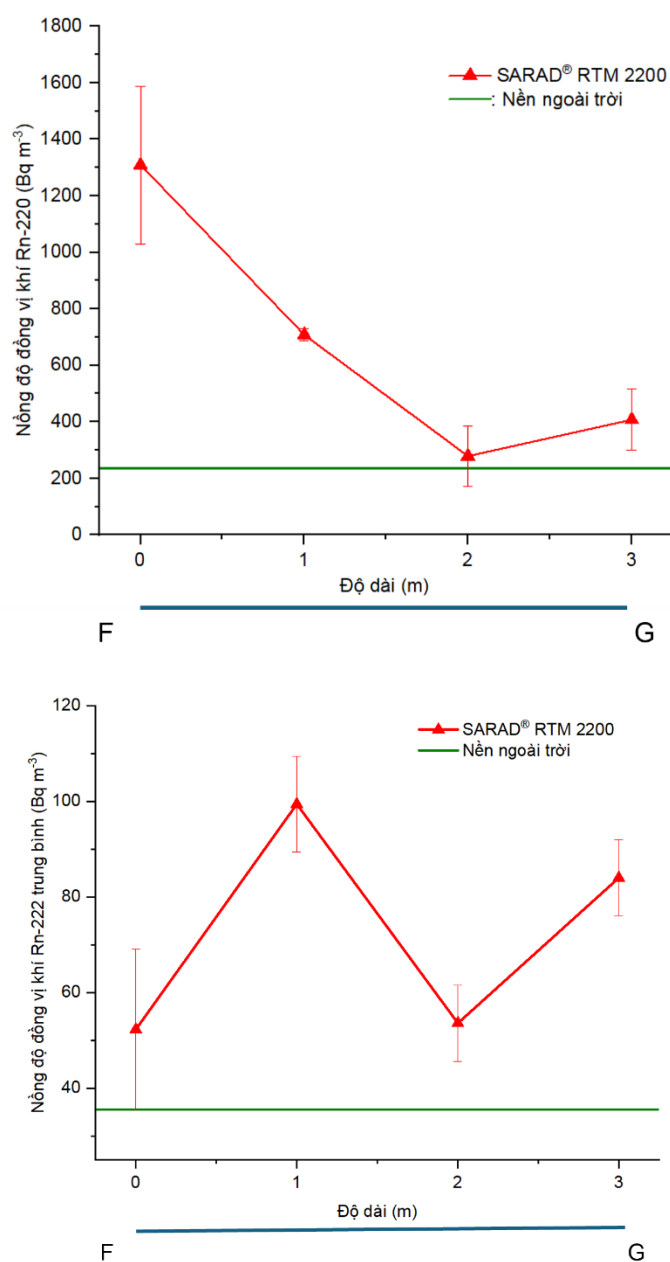
mặt ranh giới giữa cột gỗ và nền đất tạo các khe nứt cũng có thể là điều kiện để khí Rn-222 từ dưới nền đất đi lên vào môi trường không khí trong nhà.

Sự phân bố đồng vị khí Rn-220 cũng có xu hướng mùa mưa cao hơn mùa khô. Nồng độ đồng vị khí Rn-220 tập trung cao nhất ở khu vực sát tường (điểm E) và thấp dần ở vị trí giữa nhà, và cao trở lại ở điểm G. Vị trí khảo sát điểm G cũng có nồng độ đồng vị khí Rn-220 cao do sát tường, tuy nhiên đây là vị trí gần cửa và diện tích tường cũng ít hơn so với điểm E. Điều này một lần nữa chứng minh tường đất là nguồn thoát đồng vị khí Rn-220 và nồng độ của chúng tập trung cao ở diện tích bề mặt tường đất lớn.



Hình 3. 13. Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt EG.

Kết quả khảo sát mặt cắt FG (Hình 3.14) bằng thiết bị SARAD[®] RTM 2200 vào mùa khô cho thấy đồng vị khí Rn-222 phân bố không có sự đồng nhất và tuyến tính. Do chu kỳ bán rã của đồng vị khí Rn-222 dài nên chúng có thể đi xa nguồn thoát khí. Trái lại, đồng vị khí Rn-220 có chu kỳ bán rã ngắn nên khó đi xa nguồn thoát khí. Nồng độ đồng vị khí Rn-220 trung bình cao nhất ở điểm F, giảm dần đến giữa nhà và tăng tại điểm G (do vị trí này gần tường).



Hình 3. 14 Biểu đồ nồng độ khí radon theo mặt cắt FG.

Từ kết quả phân tích sự phân bố nồng độ khí radon theo các mặt cắt khác nhau trong nhà trình tường cho thấy khí radon có xu hướng tập trung cao ở gần vị trí tường đất và/hoặc nền đất và cao hơn trung bình nồng độ khí radon không khí ngoài trời. Sự phân bố đồng vị khí Rn-220 trong không khí trong nhà thể hiện rõ nguồn thoát khí radon trong nhà đến từ tường đất và/hoặc nền đất. Bên cạnh đó, vị trí nhà trình tường nghiên cứu nằm trong khu vực có đứt gãy và có chứa thành tạo đá có chứa hàm lượng nguyên tố mẹ lớn như đã phân tích ở mục 3.1. Có thể thấy, khí radon tập trung trong nhà trình tường cao hơn các kiểu nhà khác và có nguồn từ (1) môi trường không khí ngoài trời, và (2) đất sử dụng xây dựng nhà trình tường.

3.2.2. Tốc độ thoát khí radon trong nhà trình tường

Tốc độ thoát khí radon trong nhà trình tường được thực hiện khảo sát trên tường đất và nền đất bằng thiết bị SARAD® RTM 2200 vào tháng 1 (mùa khô). Kết quả tính toán tốc độ thoát khí radon của tường đất và nền đất được thể hiện dưới Bảng 3.8.

Bảng 3. 8. Tốc độ thoát khí radon (Bq/m²s) trong tường và nền nhà trình tường.

	Rn-222		Rn-220	
	Tốc độ	STDEV	Tốc độ	STDEV
Tường đất	$6,14 \cdot 10^{-5}$	$\pm 8,52 \cdot 10^{-6}$	4,48	$\pm 0,96$
Nền đất	$3,28 \cdot 10^{-5}$	$\pm 7,51 \cdot 10^{-6}$	0,54	$\pm 0,31$

STDEV: Độ lệch chuẩn

Tốc độ thoát khí đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 ở tường đất lần lượt là $6,14 \cdot 10^{-5}$ Bq/m²s và 4,48 Bq/m²s, ở nền đất lần lượt là $3,28 \cdot 10^{-5}$ Bq/m²s và 0,54 Bq/m²s. Tốc độ thoát khí radon ở tường đất cao hơn so với ở nền đất. Nền đất chỉ có một bề mặt tiếp xúc với không khí, khí radon từ nền đất đi vào môi trường không khí nhà ở theo các khe nứt trên nền đất và qua bề mặt của nền đất theo cơ chế khuếch tán [Bukhari và Shukla, 2017]. Môi trường khí dưới nền đất

gần như là ổn định và ít chịu tác động chi phối bên ngoài. Do đó, khí radon sinh ra dưới nền đất ngoài khuếch tán vào môi trường không khí nhà ở, chúng có thể bị tích tụ trong nền đất. Ngoài ra, do nền đất chịu ảnh hưởng của hoạt động đi lại của con người, bề mặt nền đất có xu hướng ngày càng được nén chặt. Do đó, lỗ hổng dưới nền đất ngày càng bị thu hẹp và mất dần, kéo theo khí radon từ dưới sâu khó có thể di chuyển theo chiều hướng đi lên bề mặt không khí.

Khác với nền đất, tường đất có 2 mặt tiếp xúc với môi trường không khí là (1) trong nhà và (2) ngoài trời. Do tường đất có 2 mặt tiếp xúc với môi trường không khí, nên dòng khí radon sinh ra trong tường đất có thể di chuyển theo nhiều hướng khác nhau, thoát vào môi trường không khí theo cả cơ chế khuếch tán và đối lưu. Sự khác nhau giữa nhiệt độ, áp suất giữa hai môi trường không khí trong nhà và ngoài trời cùng tác động lên tường đất làm tăng sự lưu thông dòng khí bên trong tường đất (bao gồm khí radon). Do đó, khí radon trong tường đất sinh ra có thể nhanh chóng thoát vào môi trường không khí, giúp tốc độ thoát khí nhanh hơn. Như vậy, tốc độ thoát khí radon từ tường đất cao hơn nền đất, đồng nghĩa nguồn thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà chủ yếu đến từ tường đất.

3.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến sự thoát khí radon trong nhà trình tường

3.3.1. Thành phần vật chất của đất làm nhà trình tường

Sự phân bố khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường không chỉ đến từ không khí ngoài trời mà còn đến từ vật liệu sử dụng làm nhà. Như đã phân tích ở mục 3.1, vật liệu sử dụng làm nhà trình tường là đất thổ nhưỡng, sản phẩm phong hóa các thành tạo địa chất khu vực và trầm tích deluvi. Đặc điểm thành phần vật chất (khoáng vật và hoá học) của đất làm nhà trình tường trong nghiên cứu được phân tích tương ứng bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) và huỳnh quang tia X (XRF) (Bảng 3.9 và Bảng 3.10).

Bảng 3. 9. Thành phần hóa học (% tl) có trong đất sử dụng làm nhà trình tường (xác định bằng phương pháp XRF).

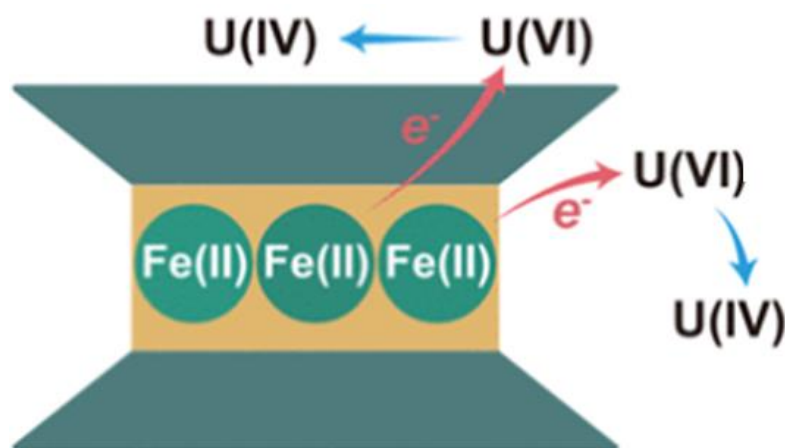
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄ -T	MnO	MgO
62,27	0,46	24,21	4,09	0,02	1,16
CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	OM
0,03	0,05	4,24	0,11	0,04	4,86

Bảng 3. 10. Thành phần khoáng vật (% tl) trong đất sử dụng làm nhà trình tường (xác định bằng phương pháp XRD).

Thạch anh	Muscovit	Microclin	Graphit	
36,29	18,47	8,04	5,04	
Dickit	Kaolinit	Chlorit	Illit	Smectit
1,1	4,64	2,90	1,15	17,15
Goethit	Gibbsit	Hematit	Ferrihydrit	
2,46	1,1	0,15	1,51	

Trải qua quá trình phong hóa, một số oxit trong đá mẹ bị hòa tan và rửa trôi, một số oxit không bị hòa tan được làm giàu trong sản phẩm phong hóa. Các thành tạo ở khu vực xã Bạch Đích chủ yếu là lục nguyên và carbonat, địa hình dốc nên trong quá trình rửa trôi và hòa tan các chất bazơ dẫn đến tích lũy sắt oxit và nhôm oxit [Nguyễn Văn Phổ, 2013]. Kết quả là hàm lượng sắt oxit và nhôm oxit cao trong đá mẹ gần như được giữ nguyên trong sản phẩm phong hóa. Sắt xuất hiện ở cả 2 trạng thái định hình và vô định hình trong thành phần đất do sự thay đổi và thay thế giữa Fe²⁺, Fe³⁺ và Al³⁺ liên kết với khoáng vật kaolinit, tạo kết tủa oxit sắt trên các khoáng vật sét (goethit, hematit) (Hình 3.15) [Sabine, 1989; Wang và cs., 2024]. Urani trong kim loại bị khử từ U⁶⁺ tạo phức thành U⁴⁺ hấp phụ lên khoáng vật ferrihydrit, goethit, hematit và smectit bằng các liên kết với oxit sắt (Hình 3.15) [Chabaux và cs., 2008; Duff và cs., 2002], góp phần làm tăng hàm lượng nguyên tố mẹ - urani có trong đất. Hàm lượng sắt tạo màu đỏ đặc trưng cho

đất sử dụng làm nhà trình tường tập trung ở các nhóm khoáng vật goethit, gibbsit và hematit. Ferrihydrit là nhóm oxit sắt có độ trật tự thấp, cấu trúc còn nhiều khuyết tật mặt và khuyết tật cạnh [Nguyễn Ngọc Minh và Nguyễn Quang Hải, 2018]. Các ion sắt trong ferrihydrit được phân bố ngẫu nhiên, khiến chúng dễ dàng hấp thụ, và/hoặc hấp phụ các ion OH^- và phân tử nước [Nguyễn Ngọc Minh và Nguyễn Quang Hải, 2018]. Quá trình chuyển hóa ferrihydrit thành goethit có thể xảy ra trong mẫu đất ở khu vực có áp lực của CO_2 cao, sự xuất hiện của HCO_3^- hoặc CO_3^{2-} làm tăng quá trình oxi hóa, tương ứng môi trường karst ở khu vực nghiên cứu [Nguyễn Ngọc Minh và Nguyễn Quang Hải, 2018]. Hàm lượng các khoáng vật sắt trong đất có liên quan chặt chẽ tới thành phần của đá mẹ, mức độ phong hóa và sự tích lũy trong quá trình hình thành đất. Các oxit sắt bị khử ở các địa hình cao, lượng Fe^{2+} hòa tan có thể di chuyển tới những vị trí thấp hơn và tái kết tinh thành các oxit sắt [Nguyễn Ngọc Minh và Nguyễn Quang Hải, 2018]. Quá trình oxi hóa – khử diễn ra trong quá trình phong hóa do sự cho và nhận electron giữa nhóm sắt, nhôm và nhóm urani, thori. Quá trình này hấp phụ và kết tủa các nguyên tố mẹ urani và thori lên các khoáng vật dạng lớp có chứa sắt. Do đó, hàm lượng các nguyên tố urani và thori trong sản phẩm phong hóa tỷ lệ thuận với hàm lượng oxit sắt và khoáng vật sét. Điều đó cũng đồng nghĩa oxit sắt góp phần vào quá trình hấp phụ tới đa các nguyên tố hình thành và giải phóng khí radon.



Hình 3. 15 Quá trình hấp phụ urani trong khoáng vật dạng lớp có chứa sắt [Wang và cs., 2024].

Khả năng thoát khí radon trong đất sử dụng làm nhà trình tường cao là sự kết hợp của cả hàm lượng oxit sắt, vật chất hữu cơ và các khoáng vật sét. Đất sử dụng làm nhà trình tường có hàm lượng sét cao, thành phần các khoáng vật sét chủ yếu là kaolinit, smectit, chlorit, illit, dickit, chiếm gần 1/3 tổng hàm lượng khoáng vật có trong mẫu đất (Bảng 3.10). Trong các khoáng vật sét có trong thành phần đất sử dụng làm nhà trình tường, khoáng vật smectit chiếm tỷ lệ lớn (~ 17,15 %) và đóng vai trò chủ đạo. Các khoáng vật sét thường có cấu trúc dạng lớp, phân bố xen kẽ nhau, ví dụ illit và smectit thường xếp lớp xen kẽ nhau trong các thành tạo giàu nhôm; smectit và kaolinit có thể xếp lớp kaolinit-smectit và ưu tiên hấp phụ các nhóm hydroxit nhôm vào lỗ hổng của chúng [Nguyễn Ngọc Minh và Nguyễn Quang Hải, 2018]. Ngoài ra, smectit là khoáng vật có độ trương nở tốt nhất trong các khoáng vật sét xuất hiện trong mẫu đất làm nhà trình tường, do đó có thể làm trương nở tối đa bề mặt hạt khoáng vật và làm tăng tính dẻo, độ kết dính của đất, đồng thời làm thay đổi môi trường di chuyển cho khí radon khi có sự thay đổi độ ẩm trong đất.

Ngoài oxit sắt, nguyên tố radium cũng hấp phụ trên bề mặt các hạt vật chất hữu cơ. Vật chất hữu cơ hình thành trong quá trình phong hóa giúp hấp phụ tối đa nguyên tố radi. Vật chất hữu cơ trong đất làm giảm độ dính của khoáng vật sét, tăng diện tích tiếp xúc bề mặt của các hạt vật chất, từ đó tăng độ thấm và độ xốp của đất. Mặt khác, vật chất hữu cơ thường có cấp hạt nhỏ nên diện tích tiếp xúc bề mặt lớn, nên radi phân bố trên bề mặt lớn [Sakoda và cs., 2010]. Đất sử dụng làm nhà trình tường có hàm lượng oxit sắt (~ 4%) và vật chất hữu cơ (~ 5%) giúp hấp phụ tối đa các nguyên tử mẹ urani, radi và thori. Do các nguyên tử này đều hấp phụ trên bề mặt, nên quá trình phân rã của chúng dễ dàng giải phóng khí radon [Danie và cs., 1999].

3.5.2. Các yếu tố khí hậu

Khí hậu là tổng hợp các điều kiện thời tiết (bao gồm nhiệt độ, độ ẩm, lượng mưa, áp suất, ...) ở một khu vực nhất định, đặc trưng bởi các thống kê dài hạn của

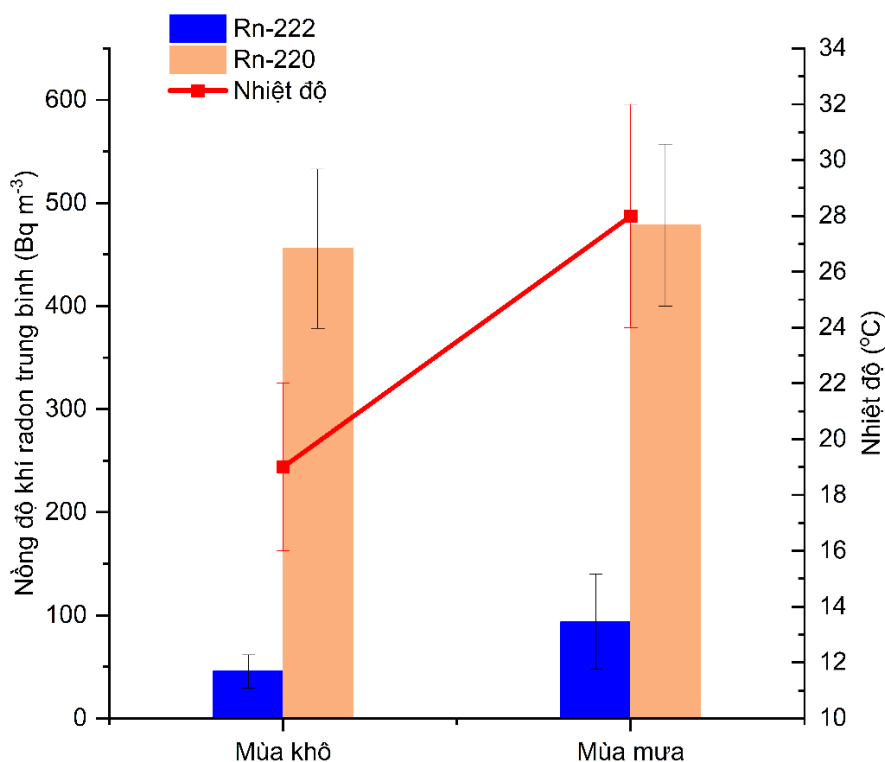
các yếu tố khí tượng tại khu vực đó [Điều 3, Luật Khí tượng thủy văn, 2015]. Khí hậu của khu vực nghiên cứu có thể chia thành 2 mùa là mùa mưa và mùa khô, tương ứng với nhiệt độ và độ ẩm không khí hai mùa khác nhau [Niên giám thống kê tỉnh Hà Giang, 2022], trong đó nhiệt độ và độ ẩm ngoài trời ở mùa mưa cao hơn mùa khô.

a. Nhiệt độ

Sự phân bố khí radon trong nhà trình tường theo các mặt cắt đã được phân bố chi tiết ở mục 3.2. Các phân tích đều cho thấy nồng độ trung bình khí radon trong nhà trình tường có xu hướng tỷ lệ thuận với nhiệt độ không khí ngoài trời. Khi nhiệt độ ngoài trời tăng, nồng độ trung bình khí radon trong nhà cũng có xu hướng tăng theo nhiệt độ (Hình 3.16). Nhà trình tường được biết đến có khả năng điều hòa không khí trong môi trường nhà ở. Không khí môi trường bên trong nhà mát vào mùa hè (tương ứng mùa mưa) và ấm vào mùa đông (tương ứng mùa khô). Điều này có nghĩa vào mùa hè, nhiệt độ không khí ngoài trời cao hơn nhiệt độ không khí trong nhà trình tường. Nhiệt độ không khí sẽ có xu hướng truyền từ bên ngoài vào bên trong nhà, tuy nhiên nhiệt độ trong tường đất không thể tăng theo kịp nhiệt độ không khí. Điều này tạo ra sự chênh lệch nhiệt độ giữa tường đất và môi trường không khí. Nhiệt độ môi trường không khí cao hơn trong tường đất làm cho bề mặt tường đất có xu hướng mất nước nhanh hơn nghĩa là làm cho các vật chất khí - gồm cả hơi nước và các đồng vị khí radon - trong tường đất có xu hướng bị kéo lên ranh giới tường và không khí) [Sakoda và cs., 2011; Akbari và cs., 2013]. Do đó, khí radon thoát ra ngoài môi trường nhanh hơn và có xu hướng làm tăng nồng độ khí radon.

Điều này xảy ra ngược lại vào mùa đông (tương ứng mùa khô), khi nhiệt độ không khí ngoài trời thấp hơn nhiệt độ không khí trong nhà. Không khí trong nhà có xu hướng đi lên trên theo hiệu ứng ống khói, tạo sự chênh lệch áp suất ở tầng dưới sát nền nhà [Jordan, 2024]. Do chênh lệch áp suất, khí radon và các dòng khí nói chung từ dưới nền nhà, móng nhà có xu hướng thoát ra ngoài môi trường

không khí. Hiệu ứng ống khói kéo theo dòng khí radon trong nhà thoát ra ngoài ngôi nhà qua lỗ thông hơi và/hoặc mái nhà [IAEA, 2013]. Như vậy, khí radon trong nhà sẽ được thoát ra ngoài theo hiệu ứng ống khói nên nồng độ khí radon trong nhà sẽ giảm dần. Những điều này giải thích vì sao nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà tỷ lệ thuận với nhiệt độ không khí ngoài trời.



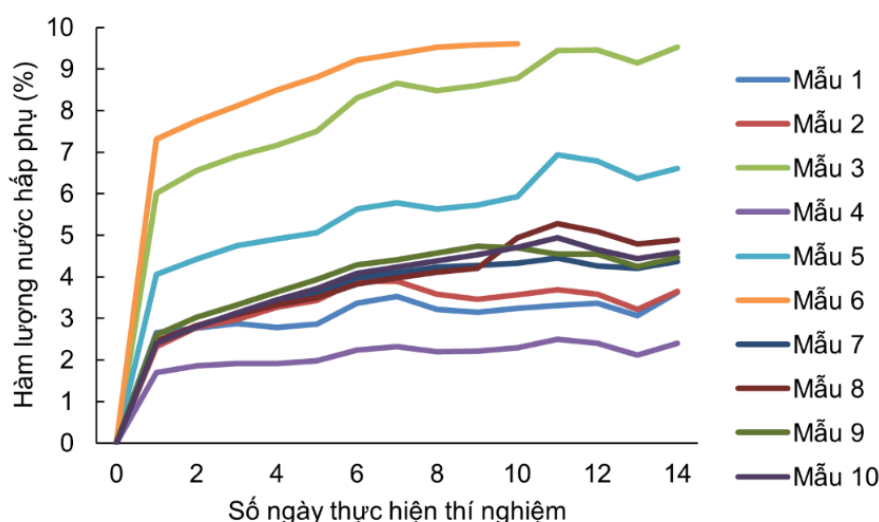
Hình 3. 16 Biểu đồ nhiệt độ và nồng độ trung bình khí radon trong nhà trình tường.

b. Độ ẩm

Theo như kết quả khảo sát, độ ẩm môi trường không khí ngoài trời tỷ lệ thuận với khả năng thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng nước đóng vai trò quan trọng trong việc thoát khí radon ở các vật liệu xốp [Bossew, 2003; Barillon và cs., 2005; Sakoda và cs., 2011]. Khả năng thoát khí radon tăng theo độ ẩm đến một giá trị cực đại sau đó giảm. Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của độ ẩm đến khả năng thoát khí radon trong luận án này đã được công bố trên tạp chí *Frontiers in Earth Science* năm 2021 [Nguyễn Thị Ánh Nguyễn và cs., 2021].

Nghiên cứu khả năng hấp phụ hơi nước trong không khí của tường đất nhà trình tường đã được thực hiện trong phòng thí nghiệm trên các mảnh vụn tường đất trong điều kiện bão hoà hơi nước theo thời gian. Các mảnh vụn tường đất được thu thập trong thời gian tương ứng mùa khô. Các mảnh vụn tường đất được sấy ở nhiệt độ 105 °C trong 24 giờ trước khi làm thí nghiệm để kiểm soát khả năng hấp phụ nước theo thời gian. Kết quả sấy khô các mảnh vụn tường đất cho thấy hàm lượng nước trung bình ~ 4,23 % ($\pm 1,12$ %), chứng tỏ rằng tường đất của nhà trình tường ở trạng thái ổn định.

Sau đó, các mảnh vụn tường đất được đưa vào môi trường kín luôn duy trì ở nhiệt độ 25 °C và độ ẩm 100 %. Sự thay đổi lượng nước hấp phụ của các mảnh tường đất theo ngày được thể hiện trong Hình 3.17. Các mảnh vụn tường đất nhà trình tường có thể hấp phụ từ 3 - 9 % (trung bình ~ 5%) nước từ hơi ẩm không khí bão hòa. Ngày đầu tiên, lượng nước hấp phụ trong các mảnh vụn tường đất diễn ra nhanh nhất. Hơi nước nhanh chóng được hấp phụ vào các không gian lỗ hổng trong các mảnh vụn tường đất. Với tốc độ thấm nhanh và hàm lượng nước hấp phụ cao chứng minh không gian lỗ hổng trong tường đất nhà trình tường khá tốt, có nhiều không gian lưu trữ chất lỏng và khí.



Hình 3. 17 Biểu đồ sự hấp phụ nước ở các mảnh tường trong nhà trình tường

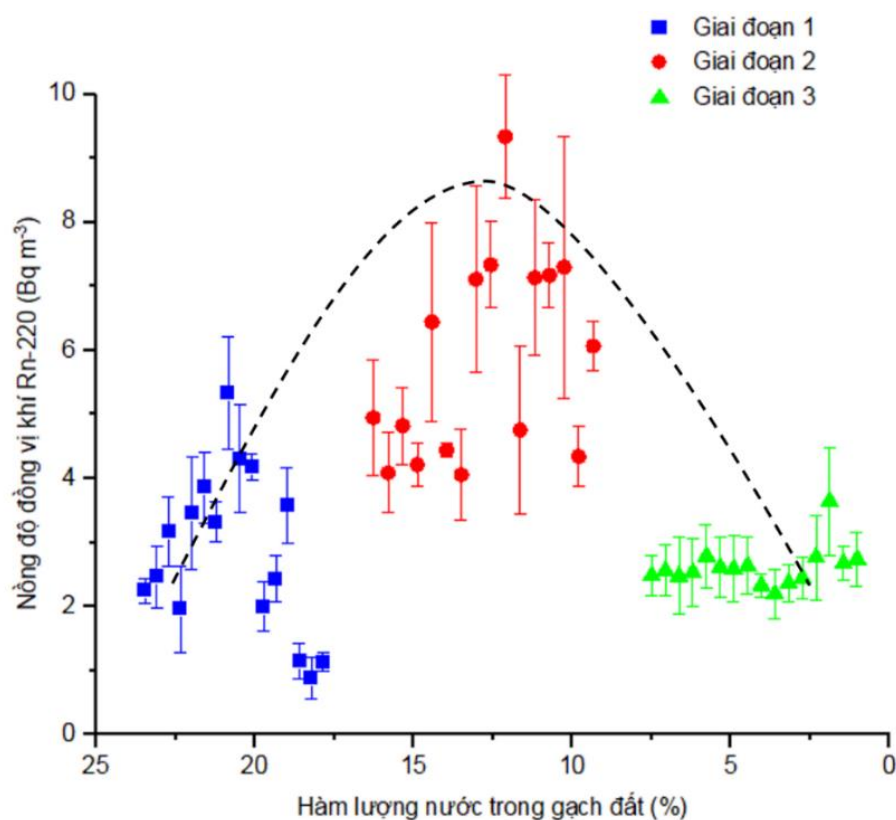
Quan sát tốc độ thoát khí radon và sự thay đổi độ ẩm bằng thí nghiệm mô hình gạch đất. Các viên gạch đất mô phỏng được thực hiện khảo sát khả năng thoát khí radon vào 3 giai đoạn khác nhau: giai đoạn 1 khi các mô hình vừa được hoàn thiện (có độ ẩm ~ 21%), giai đoạn 2 thực hiện khi các mô hình được để khô tự nhiên ngoài môi trường không khí cách giai đoạn 1 là 15 ngày (có độ ẩm ~ 10%), và giai đoạn 3 được thực hiện khi các mô hình được để khô tự nhiên cách giai đoạn 2 là 12 tháng (có độ ẩm ~ 3%). Kết quả khảo sát sự thoát khí radon từ các mô hình gạch đất tương ứng với các độ ẩm khác nhau được thể hiện cụ thể ở Bảng 3.11.

Bảng 3. 11. Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m³) thoát ra từ mô hình gạch đất mô phỏng tường đất nhà trình tường theo độ ẩm khác nhau (n = 16)

Giai đoạn	Hàm lượng nước (%)		
		Rn-222	Rn-220
Giai đoạn 1	21,5 (±1,5)	36,21 (±15,61)	1.098,82 (±572,50)
Giai đoạn 2	9,8 (±2,7)	79,97 (±25,02)	2.451,98 (±717,97)
Giai đoạn 3	2,6 (±1,3)	26,10 (±5,02)	995,89 (±143,92)

Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong 3 giai đoạn lần lượt là 36,21 (±15,61) Bq/m³; 79,97 (±25,02) Bq/m³ và 26,10 (±5,02) Bq/m³. Do chu kỳ bán rã của đồng vị Rn-222 dài (~ 3,8 ngày), nên chúng cần nhiều thời gian để nồng độ đạt trạng thái ổn định trong hộp khảo sát. Do đó, trong kết quả khảo sát, một số mô hình gạch đất cho kết quả nồng độ đồng vị khí Rn-222 ~ 0 Bq/m³. Trong khi đó, đồng vị khí Rn-220 có chu kỳ bán rã ngắn (~ 1 phút) nên thời gian để chúng đạt trạng thái ổn định trong hộp khảo sát ngắn. Do đó, kết quả khảo sát sự thoát khí radon liên quan đến độ ẩm của mô hình gạch đất được thể hiện rõ nhất ở đồng vị khí Rn-220.

Ở giai đoạn 1, khi các viên gạch vừa được chế tạo, chưa ổn định về cấu trúc và độ ẩm tương đối 21,5%, khoảng cách các giá trị nồng độ đồng vị khí Rn-220 giữa các viên gạch khá lớn (Hình 3.18). Nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-220 ở giai đoạn này $\sim 1.099 \text{ Bq/m}^3$. Ở giai đoạn 2 và 3, tương ứng độ ẩm lần lượt 9,8% và 2,6%, nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong hộp khảo sát trở nên ổn định hơn, khoảng cách giá trị nồng độ đồng vị khí Rn-220 giữa các viên gạch không nhiều. Trung bình nồng độ đồng vị khí Rn-220 có giá trị cao nhất ở giai đoạn 2 ($\sim 2.452 \text{ Bq/m}^3$), và có giá trị tương đương nhau ở giai đoạn 1 ($\sim 1099 \text{ Bq/m}^3$) và giai đoạn 3 ($\sim 996 \text{ Bq/m}^3$). Có thể thấy, đồng vị khí Rn-220 được giải phóng nhiều nhất ở giai đoạn 2, khi độ ẩm trong mô hình gạch đất trong khoảng 7 – 17 %. Hàm lượng nước trong các viên gạch giai đoạn 2 tương ứng với sự hấp phụ nước tối đa trong thí nghiệm hấp phụ nước của các mảnh vụn tường đất. Các thí nghiệm độ ẩm này tương ứng với tường đất ở mùa mưa, khi độ ẩm môi trường ngoài trời cao hơn độ ẩm trong nhà, tường phía ngoài nhà đã hấp phụ no nước, tạo lớp màng chắn giữ khí radon ở lại trong tường. Ở mặt tường phía trong nhà, lúc này độ ẩm sẽ có xu hướng tăng dần, các phân tử nước bắt đầu đi vào các chỗ trống giữa các hạt vật liệu thể chổ và đẩy khí radon ra ngoài môi trường không khí. Do mặt tường phía ngoài đã bão hòa nước, trạng thái năng lượng nghỉ của nước cao hơn không khí, nên khí radon sinh ra đi vào những vị trí chỗ trống di chuyển nhanh hơn trong môi trường nước. Do đó, khí radon phía mặt tường đất bên trong nhà sẽ có xu hướng thoát ra ngoài môi trường không khí trong nhà nhanh hơn. Trạng thái bão hòa ẩm của tường đất trong $\sim 8 - 10 \%$, tương ứng độ ẩm mà khí radon thoát ra ngoài môi trường không khí trong nhà nhanh nhất [Hosoda và cs., 2007; Yang và cs., 2019]. Các thí nghiệm khảo sát nồng độ khí radon trên các mô hình gạch đất có độ ẩm khác nhau chứng minh cho khả năng thoát khí radon trong nhà trình tường vào mùa mưa diễn ra nhanh và mạnh, dẫn đến nồng độ khí radon trong nhà trình tường vào mùa mưa cao hơn mùa khô.



Hình 3. 18 Biểu đồ khả năng thoát đồng vị khí Rn-220 tương ứng với hàm lượng nước trong mô hình gạch đất.

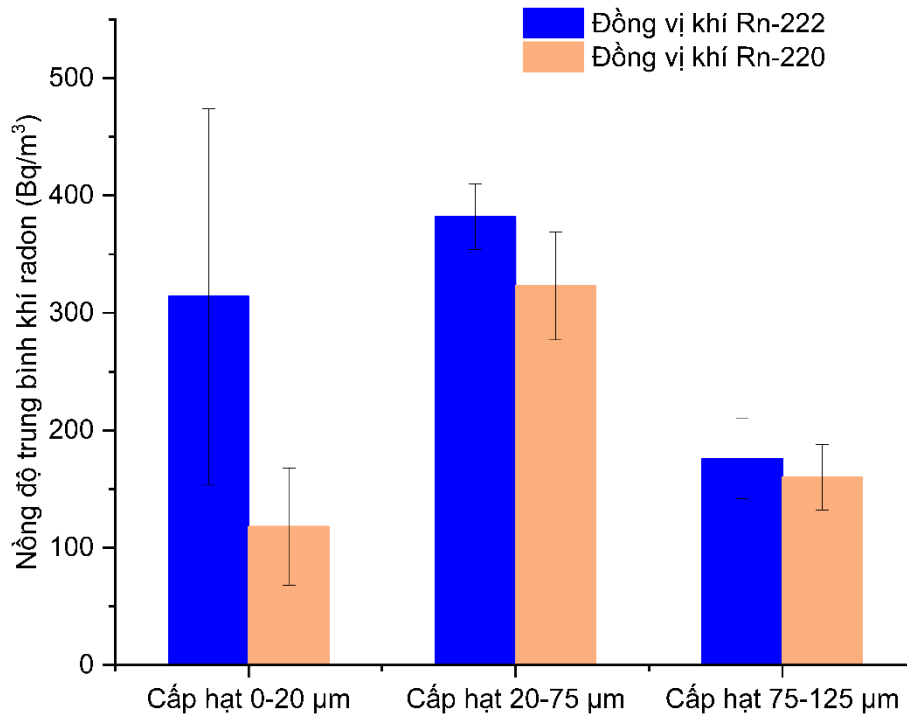
Tóm lại, khí hậu có ảnh hưởng đến sự thoát khí radon trong nhà trình tường. Nhiệt độ môi trường không khí ngoài trời tỷ lệ thuận với khả năng thoát khí radon từ tường đất vào môi trường không khí trong nhà ở. Khả năng thoát khí radon diễn ra nhanh và dễ dàng ở trong khoảng độ ẩm 7 – 17%.

3.5.3. Độ hạt và tỷ trọng

Đất làm nhà trình tường có thành phần cấp hạt > 63 μm (cát), 4 – 63 μm (bột), và < 4 μm (sét) lần lượt là 12,8 %, 36,9 % và 50,2 %. Trong đó, tổng cấp hạt bột và sét > 87 %. Khoảng cách giạt lùi của các đồng vị khí radon trong hạt vật liệu rắn dao động trong khoảng 20 μm – 70 μm [Jagadeesha và Narayana, 2018], tương ứng với cấp hạt bột. Trong quá trình thoát khí radon, các đồng vị có thể tồn tại ở một trong ba trạng thái: (1) các đồng vị nằm trong không gian lỗ trống giữa các hạt vật liệu, (2) các đồng vị đi vào cấu trúc của các hạt vật liệu liền kề

phụ thuộc vào năng lượng còn lại, (3) các nguyên tử ở lại ngay trong hạt vật liệu ban đầu [IAEA, 2013].

Kích thước khoảng trống ở các cấp hạt tỷ lệ thuận với kích thước của cấp hạt. Ở cấp hạt bột, khoảng cách giữa các lỗ trống nằm trong khoảng $\sim 2 \mu\text{m} - 50 \mu\text{m}$ [Hillel, 1998], tương ứng với khoảng cách giạt lùi các đồng vị khí radon khi được thành tạo, và do vậy khả năng thoát khí radon trong cấp hạt này là tốt nhất (Hình 3.19). Kết quả khảo sát khả năng thoát khí radon từ ba cấp hạt đất cho thấy khả năng thoát khí radon ở cấp hạt $20 \mu\text{m} - 75 \mu\text{m}$ cao hơn cả so với cấp hạt $< 20 \mu\text{m}$ và cấp hạt $> 75 \mu\text{m}$. Ở các cấp hạt $< 20 \mu\text{m}$ và $> 75 \mu\text{m}$, khoảng trống giữa các hạt đất có xu hướng nằm ngoài khoảng cách giạt lùi của các đồng vị khí radon khi thành tạo, do đó đồng vị khí radon được sinh ra trong quá trình phân rã có thể đi vào cấu trúc của các hạt vật liệu lân cận và/hoặc đi vào khoảng trống giữa các hạt [Sakoda và cs., 2011]. Khi chúng đi vào lỗ hổng giữa các hạt, chúng dễ dàng thoát ra ngoài môi trường không khí qua các vết nứt, còn các đồng vị đi vào bên trong cấu trúc của các hạt lân cận có thể di chuyển linh động trong cấu trúc hạt và tiếp tục quá trình phân rã. Các hạt có kích thước càng nhỏ có diện tích tiếp xúc bề mặt càng lớn, tạo điều kiện thuận lợi cho khí radon được giải phóng từ bề mặt vật liệu vào không khí. Kích thước hạt vật liệu lớn kéo theo diện tích tiếp xúc nhỏ hơn thể tích, làm giảm tốc độ thoát khí radon ra ngoài môi trường không khí.



Hình 3. 19 Biểu đồ trung bình nồng độ khí radon trong các viên gạch được làm từ các cấp hạt đất khác nhau.

Nghiên cứu mối quan hệ giữa tỷ trọng của vật liệu với sự thoát khí radon được thực hiện trên các mô hình gạch có cùng kích thước nhưng tỷ trọng khác nhau. Sự thay đổi tỷ trọng ảnh hưởng đến độ lỗ hổng trong mẫu gạch đất. Nồng độ khí radon thoát ra trong các mẫu gạch đất được thể hiện trong Bảng 3.12 và Hình 3.20.

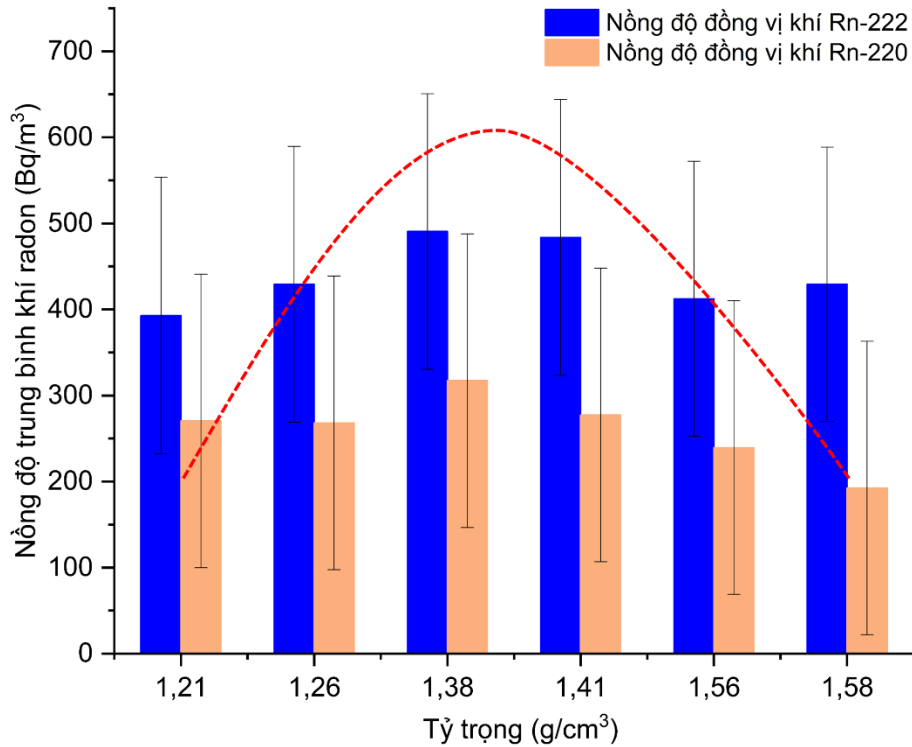
5 mẫu gạch được làm từ đất làm nhà trình tường có tỷ trọng dao động $\sim 1,21 \text{ g/cm}^3 - 1,58 \text{ g/cm}^3$. Nồng độ đồng vị khí Rn-222 trong các mẫu gạch dao động $\sim 14 \text{ Bq/m}^3 - 800 \text{ Bq/m}^3$, trung bình $\sim 400 \text{ Bq/m}^3$. Nồng độ đồng vị khí Rn-220 trong các mẫu gạch dao động $\sim 73 \text{ Bq/m}^3 - 1.300 \text{ Bq/m}^3$, trung bình $\sim 300 \text{ Bq/m}^3$. Nồng độ khí radon có xu hướng tăng dần từ tỷ trọng $1,21 \text{ g/cm}^3$ và đạt giá trị cao nhất ở tỷ trọng $\sim 1,38 \text{ g/cm}^3 - 1,41 \text{ g/cm}^3$ (Hình 3.20). Trong các mẫu gạch có tỷ trọng $> 1,41 \text{ g/cm}^3$, nồng độ khí radon lại có xu hướng giảm (Hình 3.20).

Bảng 3. 12 Trung bình nồng độ các đồng vị khí radon (Rn-222 và Rn-220, Bq/m³) theo tỷ trọng.

Tỷ trọng (g/cm ³)	Rn-222		Rn-220	
	TB	STDEV	TB	STDEV
1,21	392,76	±160,82	270,46	±170,56
1,26	429,21	±160,54	268,19	±170,61
1,38	490,64	±160,11	317,26	±170,66
1,41	483,68	±160,27	277,37	±170,66
1,56	412,30	±159,73	239,41	±170,65
1,58	429,35	±159,49	192,57	±170,65

TB: Trung bình; STDEV: Độ lệch chuẩn

Tỷ trọng của mỗi viên gạch tăng dần tương ứng với độ lỗ hổng trong mỗi viên gạch giảm dần. Sự thoát khí radon diễn ra lần lượt theo hai quá trình: hình thành khí radon (cơ chế giạt lùi α) và khuếch tán. Sau khi khí radon được hình thành có thể thoát vào lỗ hổng giữa các hạt, trong không gian chất lỏng hoặc ở lại trong hạt [Sakoda và cs., 2011]. Theo chiều tăng của tỷ trọng, độ lỗ hổng giữa các hạt sẽ giảm dần, mật độ giữa các hạt tăng dần làm thay đổi khả năng di chuyển và thoát khí radon ra ngoài môi trường không khí. Điều này tương ứng với việc mật độ radon thoát ra có xu hướng tăng dần khi tăng tỷ trọng trong các mẫu gạch từ ~ 1,21 g/cm³ – 1,41 g/cm³. Tuy nhiên, khi tỷ trọng mẫu gạch > 1,41 g/cm³, lúc này độ chặt sít của viên gạch lớn, lỗ hổng giảm tạo thành khối chất rắn, khí radon sinh ra sẽ bị giữ lại bên trong viên gạch và tiếp tục phân rã. Nồng độ khí radon từ các viên gạch này chủ yếu đến từ nguồn khí radon hình thành ở các hạt trên bề mặt [Sakoda và cs., 2011]. Do đó, các viên gạch có tỷ trọng > 1,41 g/cm³ có nồng độ khí radon giảm dần.



Hình 3. 20 Nồng độ khí radon theo tỷ trọng.

3.4. Tiểu kết

Khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường có nguồn từ đất làm nhà, là sản phẩm của vỏ phong hóa được làm giàu các nguyên tố mẹ (urani và thori), và từ không khí ngoài trời, được xem như nồng độ khí radon nền ở khu vực. Phân tích sự phân bố khí radon trong môi trường không khí trong nhà cho thấy, đồng vị khí Rn-222 có xu hướng tập trung cao ở khu vực kín và giảm ở khu vực có sự lưu thông không khí như cửa sổ, cửa bếp. Đồng vị khí Rn-220 có chu kỳ bán rã ngắn nên nồng độ của chúng tập trung cao gần nguồn thoát khí (khu vực sát tường) và giảm dần ở vị trí giữa nhà. Các yếu tố ảnh hưởng đến sự thoát khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường được biểu diễn theo sơ đồ khối Hình 3.21.



Hình 3. 21 Sơ đồ các yếu tố ảnh hưởng đến sự thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường

CHƯƠNG 4. ẢNH HƯỞNG KHÍ RADON ĐẾN SỨC KHOẺ CON NGƯỜI VÀ GIẢI PHÁP GIẢM THIỂU

4.1. Ảnh hưởng của khí radon đến sức khỏe con người

4.1.1. *Liều chiếu cho từng đối tượng sinh sống trong nhà trình tường*

Theo tổ chức UNSCEAR [1988], liều chiếu hiệu dụng trung bình mỗi năm đối với một người là 2,4 mSv, bao gồm từ cả nguồn phơi nhiễm tự nhiên và nhân tạo. Trong đó, liều chiếu đến từ bức xạ vũ trụ (0,39 mSv), liều chiếu ngoài đến từ bức xạ mặt đất (0,48 mSv), liều chiếu qua đường hô hấp (1,26 mSv), liều chiếu qua đường tiêu hóa (0,29 mSv) [UNSCEAR, 2000]. Liều chiếu ngoài đến từ bức xạ mặt đất phụ thuộc chủ yếu vào thành phần của đất và vật liệu xây dựng [UNSCEAR, 2000]. Liều chiếu qua đường hô hấp chủ yếu đến từ sự tích lũy của khí radon trong môi trường không khí nhà ở [UNSCEAR, 2000]. Vì vậy, để đánh giá nguy cơ phơi nhiễm cho người dân sinh sống trong nhà trình tường, luận án đánh giá tổng liều chiếu hiệu dụng bao gồm liều chiếu hiệu dụng bên ngoài và bên trong ở cả hai môi trường trong nhà và ngoài trời.

Dựa vào hiện trạng ở khu vực nghiên cứu về phong tục tập quán và điều kiện kinh tế, các hoạt động sinh hoạt thường ngày của người dân (như nấu ăn, ăn uống, ngủ nghỉ) đều diễn ra trong nhà trình tường. Ngoài ra, các ngày lễ tết trong khu vực cũng được diễn ra chủ yếu trong nhà trình tường. Trẻ em (6 – 15 tuổi) đi học cũng được nghỉ hè 3 tháng và thời gian sinh hoạt nghỉ hè cũng chủ yếu trong nhà trình tường.

Thời gian sinh hoạt của người dân trong nhà và ngoài trời ở nghiên cứu này được giả sử là như nhau trong một năm, và được phân bổ như sau: thời gian sinh hoạt chung của tất cả các độ tuổi sinh hoạt trong nhà (từ 6 giờ chiều hôm trước đến 6 giờ sáng hôm sau) là 12 giờ và thời gian ngoài trời là 12 giờ. Một số đối tượng, ở các độ tuổi khác nhau, sẽ có thêm thời gian sinh hoạt trong nhà khác nhau. Trẻ em (< 6 tuổi) thường ở nhà, hoặc được đi học tại các điểm trường của từng

thôn, cũng là công trình được xây dựng từ đất tại chỗ, tương tự như nhà trình tường. Thời gian tham gia lớp học của trẻ (từ 7 giờ sáng đến 11 giờ trưa), sau đó trẻ sẽ được đưa về nhà và tiếp tục sinh hoạt tại nhà. Giả sử thời gian trẻ em sinh hoạt trong môi trường nhà ở thêm 6 giờ, thời gian sinh hoạt ngoài trời là 6 giờ. Trẻ em (6 - 15 tuổi) được học bán trú tập trung tại các ngôi trường được xây dựng bằng các vật liệu phổ thông (xi măng, bê tông, gạch đỏ). Theo kết quả khảo sát ở chương 3, nồng độ khí radon trong môi trường ngoài trời và trong nhà được xây bằng các vật liệu phổ thông gần tương đương nhau. Luận án giả sử thời gian đi học của trẻ em (6 – 15 tuổi) tương ứng với thời gian sinh hoạt ngoài trời (12 giờ). Người trong độ tuổi lao động (16 – 60 tuổi) cũng có xu hướng đi làm từ sáng đến chiều quay trở về nhà. Người già (> 60 tuổi) thường nghỉ ngơi trong nhà là chủ yếu và phụ giúp các công việc vặt trong nhà. Thời gian người già sinh sống trong môi trường nhà ở thêm 6 giờ và sinh hoạt ngoài trời là 6 giờ. Từ phân tích trên, người dân sinh sống trong khu vực có thể chia thành hai nhóm đối tượng theo thời gian lưu trú trong nhà như trong Bảng 4.1.

Bảng 4. 1. Phân chia thời gian (giờ) trong nhà và ngoài trời phơi nhiễm đối với từng nhóm đối tượng cụ thể sinh sống trong nhà trình tường trong một năm

Nhóm	Đối tượng	Thời gian	
		Trong nhà	Ngoài trời
Nhóm 1	Trẻ em (< 6 tuổi),	18 giờ*365 ngày	6 giờ*365 ngày
	Người già (> 60 tuổi)	= 6.570	= 2.190
Nhóm 2	Đi học (6 – 15 tuổi),	12 giờ*365 ngày	12 giờ*365 ngày
	Lao động (16 – 60 tuổi)	= 4.380	= 4.380

a. *Liều chiếu hiệu dụng từ môi trường không khí ngoài trời*

Liều chiếu ngoài được tính toán dựa trên kết quả đo suất liều gamma ở độ cao 1 m, và liều chiếu trong được tính toán trên nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 trong môi trường không khí ngoài trời ở khu vực xã Bạch Đích, huyện

Yên Minh, tỉnh Hà Giang. Do chu kỳ bán rã của đồng vị khí Rn-220 ngắn nên chúng ít có thời gian di chuyển đi xa nguồn thoát khí; tỷ lệ thoát khí của đồng vị khí Rn-220 thấp hơn đồng vị khí Rn-222 và khó có thể ảnh hưởng đến môi trường không khí ngoài trời [UNSCEAR, 2000]. Vì vậy, kết quả tính toán liều hiệu dụng cho môi trường ngoài trời chỉ áp dụng cho đồng vị khí Rn-222 và được thể hiện trong Bảng 4.2 với nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 ngoài trời là 35,47 Bq/m³.

Kết quả liều chiếu hiệu dụng môi trường ngoài trời cho thấy tổng liều chiếu môi trường ngoài trời hàng năm cho các nhóm đối tượng < 1 mSv/năm. Liều chiếu hiệu dụng môi trường ngoài trời nhóm 1 là 0,43 mSv/năm và nhóm 2 là 0,87 mSv/năm. Tổng liều chiếu hiệu dụng môi trường ngoài trời của nhóm 1 thấp hơn tổng liều chiếu đến từ bức xạ mặt đất của UNSCEAR [2000] và khu vực Châu Âu [Cinelli và cs., 2019] là 0,48 mSv/năm. Tuy nhiên, tổng liều chiếu hiệu dụng môi trường ngoài trời của nhóm 2 vẫn cao hơn với tổng liều chiếu đến từ bức xạ mặt đất của UNSCEAR [2000] và khu vực Châu Âu [Cinelli và cs., 2019] là 0,48 mSv/năm.

Bảng 4. 2. Liều chiếu hiệu dụng (mSv/năm) từ môi trường không khí ngoài trời

Đối tượng	Thời gian (giờ)	Liều chiếu trong	Liều chiếu ngoài	Tổng liều chiếu
Nhóm 1	2.190	0,43	6,30*10 ⁻⁸	0,43
Nhóm 2	4.380	0,87	3,15*10 ⁻⁸	0,87

b. Liều chiếu hiệu dụng từ môi trường không khí trong nhà

Nhà trình tường được xây dựng trực tiếp từ đất địa phương, do đó liều chiếu ngoài được tính toán dựa trên kết quả phân tích hoạt độ phóng xạ của đất sử dụng làm nhà trình tường, liều chiếu trong được tính toán dựa trên kết quả khảo sát nồng độ trung bình khí radon trong nhà. Kết quả tính toán được thể hiện trong Bảng 4.3 với nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 và đồng vị khí Rn-220 trong nhà trình

tường lần lượt là 42,52 Bq/m³ và 455,73 Bq/m³, hoạt độ phóng xạ của đất sử dụng làm nhà trình tường (Ra-226, Th-232 và K-40 lần lượt là 52 Bq/kg, 70 Bq/kg và 260 Bq/kg).

Tổng liều chiếu hiệu dụng hàng năm trong môi trường không khí nhà trình tường cho các nhóm đối tượng chủ yếu từ liều chiếu trong của đồng vị khí Rn-220. Tổng liều chiếu trong cho nhóm 1 là 4,04 mSv/năm và cho nhóm 2 là 2,63 mSv/năm. Tổng liều chiếu trong trong nghiên cứu cao hơn tổng liều chiếu đến từ hô hấp (1,26 mSv/năm), và cao hơn tổng liều chiếu hiệu dụng trung bình (2,4 mSv/năm) của UNSCEAR [2000].

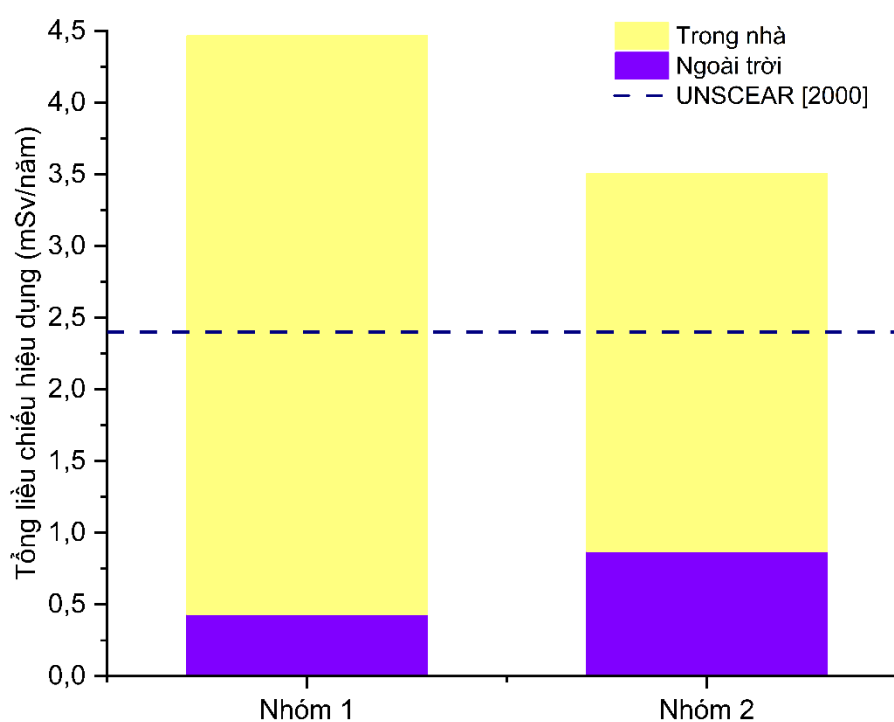
Bảng 4. 3. Liều chiếu hiệu dụng (mSv/năm) từ môi trường không khí nhà trình tường

Đối tượng	Thời gian (giờ)	Liều chiếu trong		Liều chiếu ngoài	Tổng liều chiếu
		Rn-222	Rn-220		
Nhóm 1	6.570	1,05	2,72	0,26	4,04
Nhóm 2	4.380	0,70	1,82	0,12	2,63

c. Đánh giá nguy cơ phơi nhiễm

Tổng liều chiếu hiệu dụng một năm trong các môi trường cho nhóm 1 là 4,47 mSv/năm và nhóm 2 là 3,50 mSv/năm (Hình 4.1). Liều chiếu hiệu dụng ở môi trường không khí ngoài trời chiếm ~ 26% tổng liều chiếu hiệu dụng một năm. Liều chiếu hiệu dụng mỗi năm đối với một người dân sinh sống trong khu vực nghiên cứu đến từ nguồn bức xạ trong nhà trình tường (chiếm ~ 74%). Tổng liều chiếu hiệu dụng hàng năm trong nghiên cứu đều cao hơn gấp nhiều lần so với liều chiếu hiệu dụng trung bình năm UNSCEAR [2000] đưa ra cho tất cả nguồn phơi nhiễm (2,4 mSv/năm) (Hình 4.1). Kết quả tính toán liều chiếu hiệu dụng trung bình năm trong nghiên cứu tỷ lệ thuận với thời gian lưu trú trong nhà trình tường. Điều này đồng nghĩa nhóm đối tượng nào có thời gian lưu trú trong nhà trình tường cao thì khả năng phơi nhiễm của nhóm đối tượng đó lớn hơn so với nhóm đối

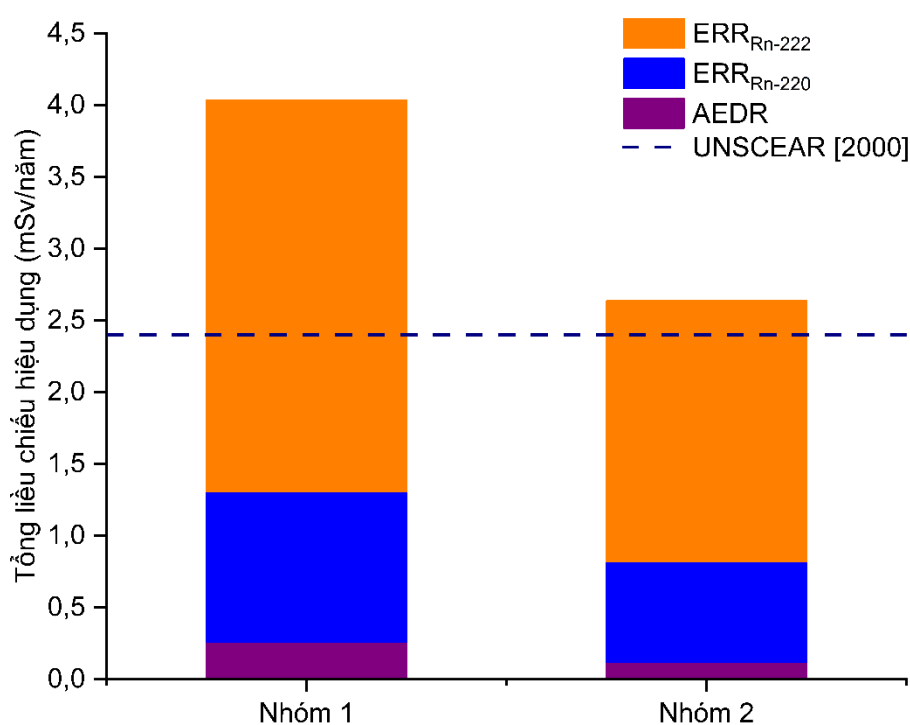
tượng còn lại. Theo thông tư 19/2012/TT-BKHCN ngày 8 tháng 11 năm 2012 Thông tư quy định về kiểm soát và bảo đảm an toàn bức xạ trong chiếu xạ nghề nghiệp và chiếu xạ công chúng, mức liều bức xạ phải thiết lập khu vực kiểm soát là ≥ 6 mSv/năm. Mức liều bức xạ trong khu vực luận án nghiên cứu vẫn nằm dưới mức liều bức xạ mà thông tư 19 đưa ra. Như vậy, khu vực người dân sinh sống trong nhà trình tường ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh vẫn chưa cần phải lập khu vực kiểm soát.



Hình 4. 1 Biểu đồ tổng liều chiếu hiệu dụng cho từng nhóm đối tượng, trong đó: UNSCEAR [2000] là tổng liều chiếu trung bình năm do UNSCEAR khuyến cáo.

Trong tổng liều chiếu đến từ môi trường không khí nhà trình tường, liều chiếu trong chiếm ~ 94% tổng liều chiếu (Hình 4.2). Trong tổng liều chiếu trong, liều chiếu đến từ đồng vị khí Rn-220 chiếm ~ 70% (Hình 4.2). Do chu kỳ bán rã của đồng vị khí Rn-220 ngắn (< 1 phút) nên chúng thường ít được nghiên cứu ở các nghiên cứu trước đây. Tuy nhiên, từ đầu thế kỷ XX, các nghiên cứu trong môi trường không khí các ngôi nhà được xây dựng từ bùn, đất và gạch không nung

phát hiện có nồng độ đồng vị khí Rn-220 cao bất thường. Đến nay, các nghiên cứu về đồng vị khí Rn-220 trong môi trường không khí nhà ở được tập trung nghiên cứu. Tuy nhiên, ở Việt Nam, các nghiên cứu về đồng vị khí Rn-220 trong môi trường không khí nhà ở vẫn còn rất hạn chế. Trong nghiên cứu này, lần đầu tiên nồng độ đồng vị khí Rn-220 được nghiên cứu chi tiết và liều chiếu hiệu dụng do đồng vị khí Rn-220 đóng góp chủ yếu trong tổng liều chiếu. Như vậy, đồng vị khí Rn-220 góp phần ảnh hưởng rất lớn đến sức khỏe con người.



Hình 4. 2 Biểu đồ tổng liều chiếu hiệu dụng trong môi trường không khí nhà trình tường cho từng nhóm đối tượng, trong đó: ERR_{Rn-222} là liều chiếu trong do đồng vị Rn-222; ERR_{Rn-220} là liều chiếu trong do đồng vị Rn-220; AEDR: là liều chiếu ngoài; UNSCEAR [2000] là tổng liều chiếu trung bình năm do UNSCEAR đưa ra.

4.1. 2. Nguy cơ rủi ro

Nguy cơ rủi ro được tính toán với giả sử tuổi thọ trung bình của người dân khu vực là 68,8 [Niên giám thống kê tỉnh Hà Giang, 2021], ước tính rủi ro trên mỗi đơn vị phơi nhiễm được thể hiện là số ca tử vong do ung thư phổi trên mỗi tháng làm việc, đối với người hút thuốc (bao gồm hút thuốc chủ động và bị động)

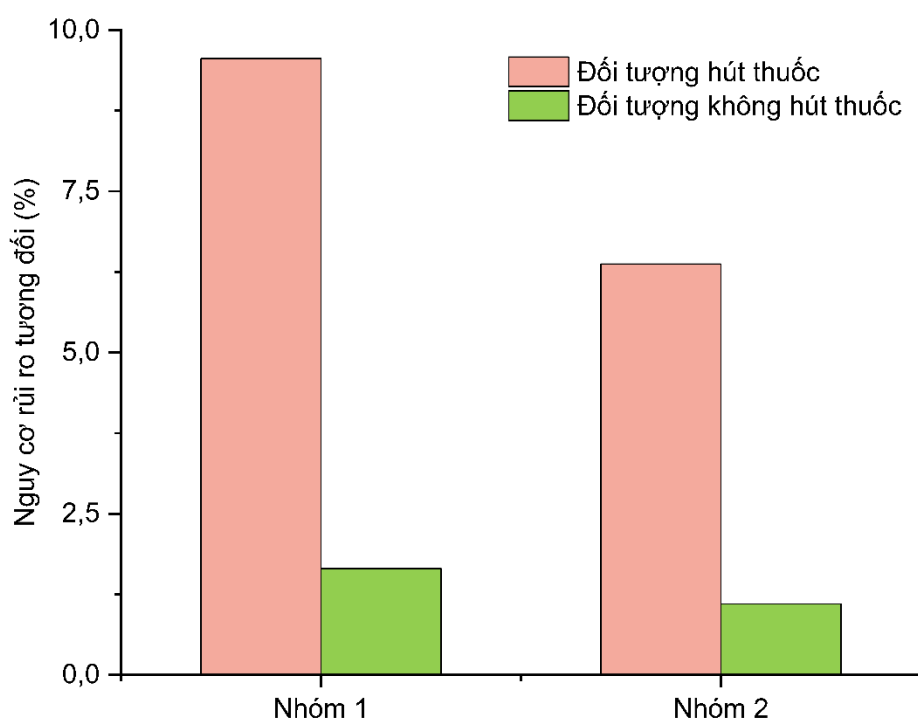
là $9,68 \cdot 10^{-4}$ (WLM) và đối với người không hút thuốc là $1,67 \cdot 10^{-4}$ (WLM) [EPA, 2003]. Ở khu vực xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang đa số các đối tượng nam giới ở độ tuổi vị thành niên có thói quen hút thuốc rất phổ biến. Như vậy, nhóm 1 hút thuốc do bị động và nhóm 2 hút thuốc chủ động. Kết quả tính toán nguy cơ rủi ro tương đối có thể bị ung thư phổi do tổng khí radon gây ra cho từng nhóm đối tượng được thể hiện trong Bảng 4.4 và Hình 4.3.

Trong các nguyên nhân gây ung thư phổi, khí radon là nguyên nhân đứng thứ 2 sau khói thuốc lá [EPA, 2003]. Điều này có nghĩa là đối với người không hút thuốc, nguy cơ rủi ro được tính dựa trên nguyên nhân gây ung thư phổi đến từ khí radon. Trong nhà trình tường, mặc dù nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-222 là $< 100 \text{ Bq/m}^3$ nhưng nồng độ trung bình đồng vị khí Rn-220 là $> 500 \text{ Bq/m}^3$, nguy cơ rủi ro của đồng vị khí Rn-220 chiếm $\sim 88\%$ trong tổng nguy cơ rủi ro mà khí radon gây ra cho đối tượng không hút thuốc. Nguy cơ rủi ro do khí radon gây ra cho đối tượng không hút thuốc của nhóm 1 là $\sim 1,65\%$ và nhóm 2 là $\sim 1,10\%$. Nguy cơ rủi ro của đối tượng hút thuốc của nhóm 1 và nhóm 2 lần lượt là $\sim 9,56\%$ và $\sim 6,73\%$. Kết quả cũng cho thấy nguy cơ rủi ro của đối tượng nhóm 1 lớn hơn đối tượng nhóm 2, tỷ lệ thuận với thời gian lưu trú trong nhà trình tường (Hình 4.3). Điều này cho thấy, người hút thuốc lá và có thời gian lưu trú trong nhà trình tường dài (nhóm 1) có nguy cơ rủi ro tương đối có thể bị ung thư phổi lên đến $\sim 10\%$.

Bảng 4. 4. Nguy cơ rủi ro tương đối có thể bị ung thư phổi do tổng khí radon gây ra trên từng đối tượng

Đối tượng	Nguy cơ rủi ro (%)	
	Nhóm 1	Nhóm 2
Hút thuốc	9,56	6,37
Không hút thuốc	1,65	1,10

Ở Việt Nam, các khuyến cáo an toàn cũng như tiêu chuẩn về nồng độ đối với đồng vị khí Rn-220 trong môi trường nhà ở chưa được đề cập cụ thể. Ảnh hưởng của khí radon và rủi ro nguy cơ ung thư phổi của những người tiếp xúc khí radon trong thời gian dài cũng chưa được nghiên cứu cụ thể ở Việt Nam. Ảnh hưởng của khí radon trong nhà trình tường và nguy cơ ung thư phổi của những người tiếp xúc trực tiếp trong thời gian dài cần được thực hiện nghiên cứu cụ thể.



Hình 4. 3 Biểu đồ nguy cơ rủi ro tương đối bị bệnh phổi do khí radon gây ra cho các nhóm đối tượng nghiên cứu.

4.2. Đề xuất một số giải pháp giảm thiểu rủi ro

Trước thực trạng người dân sinh sống trong nhà trình tường chịu tác động của tổng liều chiếu phóng xạ ở mức từ 3,50 – 4,47 mSv/năm so với 2,4 mSv/năm [UNSCEAR, 2000], cần thiết phải có giải pháp giảm thiểu rủi ro sức khỏe mà vẫn giữ được kiến trúc nhà trình tường. Để xác định được các giải pháp giảm thiểu, cần xác định rõ nguồn gốc và yếu tố ảnh hưởng đến khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường. Theo kết quả phân tích chi tiết ở chương 3, khí

radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường có nguồn gốc: (1) môi trường không khí ngoài trời, (2) lớp vỏ phong hóa và (3) vật liệu xây dựng. Khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường ảnh hưởng bởi các yếu tố: (1) thành phần vật chất của vật liệu sử dụng làm nhà, (2) thời tiết (nhiệt độ, độ ẩm), (3) tỷ trọng tường đất.

Xét từ yếu tố nguồn gốc, nguồn khí radon từ nền ngoài trời là yếu tố cố định khó có thể thay đổi. Yếu tố vỏ phong hóa và vật liệu xây dựng có liên quan trực tiếp đến quá trình thoát khí radon từ tường và nền đất của nhà trình tường. Như vậy, để giảm nồng độ khí radon trong nhà từ nguồn thoát, cần xem xét việc che phủ bề mặt tường và nền đất.

Xét từ các yếu tố ảnh hưởng, thành phần vật chất và thời tiết là hai yếu tố cố định mà con người không thể thay đổi. Yếu tố tỷ trọng tường đất là yếu tố mà con người có thể điều chỉnh. Theo như phân tích cụ thể ở chương 3, yếu tố tỷ trọng liên quan đến không gian lỗ hổng và độ chặt sít, quyết định đến khả năng di chuyển và khuếch tán của khí radon từ tường đất vào môi trường không khí trong nhà. Yếu tố này chỉ có thể áp dụng với nhà trình tường xây mới.

Như vậy, với thực trạng phân tích ở trên, luận án đưa ra một số giải pháp giảm thiểu như sau:

Ngăn chặn nguồn thoát khí radon: người dân có thể xem xét đến việc đổ một lớp bê tông dưới nền nhà; sử dụng giấy báo, giấy bìa hoặc bạt nhựa che phủ bề mặt tường đất.

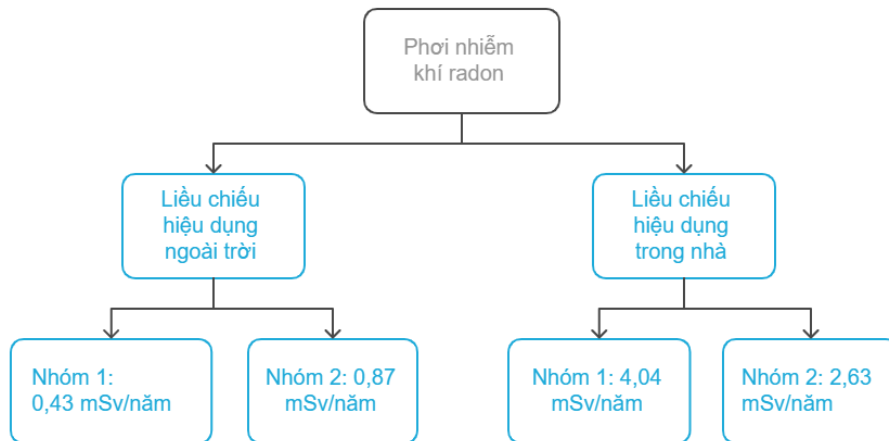
Làm giảm nồng độ khí radon tích tụ: tăng cường mở cửa chính, mở thêm cửa sổ và lắp đặt quạt thông gió nhằm tăng khả năng lưu thông không khí. Giường ngủ nên đặt gần cửa sổ và nơi thoáng, hạn chế ngủ trong buồng kín.

Giảm khả năng thoát khí radon dựa trên yếu tố tỷ trọng: trong quá trình xây dựng nhà trình tường, người xây dựng cần nén ép chặt từng lớp đất, càng đầm nén kỹ, tác động lực đủ lớn để nhằm tạo độ chặt sít, hạn chế lỗ hổng cho khí radon di

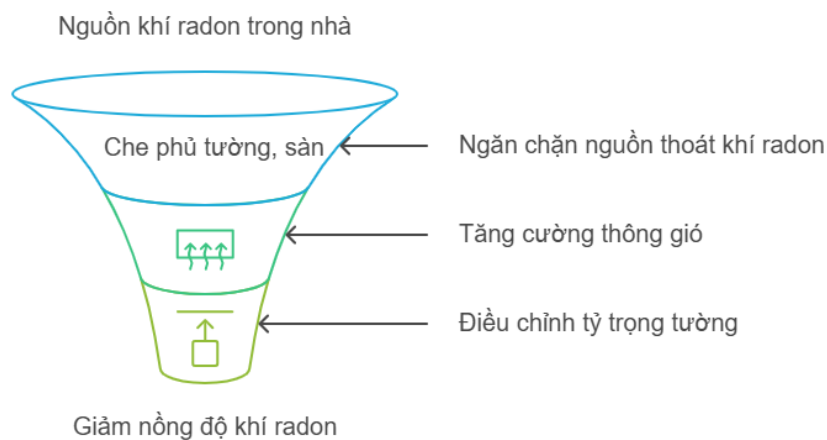
chuyển và khuếch tán. Bên cạnh đó, việc nén ép chặt tường đất cũng tăng cường độ vững chắc cho tường đất.

4.3. Tiểu kết

Người dân sinh sống trong nhà trình tường ở xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang bị phơi nhiễm khí radon được tổng hợp trong Hình 4.4 dưới đây. Nguy cơ rủi ro bị bệnh của người dân sinh sống trong nhà trình tường và hút thuốc là ~ 10%. Dựa trên các đặc điểm đã phân tích, luận án đã đưa ra một số giải pháp giảm thiểu rủi ro theo thứ tự ưu tiên như trong Hình 4.5.



Hình 4. 4 Sơ đồ phơi nhiễm khí radon của người dân sinh sống trong nhà trình tường khu vực xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang.



Hình 4. 5 Sơ đồ nguyên lý đưa ra giải pháp giảm thiểu khí radon trong nhà trình tường.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Trên cơ sở phân tích và luận giải sự thoát khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường, luận án đã đưa ra một số kết luận như sau:

(1) Nguồn gốc khí radon trong nhà trình tường: từ các thành tạo địa chất dưới sâu đi lên theo hệ thống các đứt gãy và từ đất làm nhà trình tường. Khí radon tập trung trong không khí ngoài trời ở khu vực xã Bạch Đích cao hơn các khu vực lân cận. Nồng độ khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường cao hơn so với các kiểu nhà hiện đại trong cùng khu vực.

(2) Khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường tập trung nồng độ cao ở khu vực kín, gần nền và tường đất, được xem như nguồn thoát khí chính trong nhà. Các đồng vị khí radon có tính tích lũy, tập trung nồng độ cao ở gần nguồn thoát khí, khu vực kín gió, ít có sự lưu thông không khí. Đồng vị khí Rn-220 có xu hướng giảm dần ở các vị trí xa nguồn thoát khí.

(3) Các yếu tố thời tiết và tính chất của đất làm nhà ảnh hưởng đến sự thoát khí radon vào môi trường không khí trong nhà. Nồng độ khí radon trong nhà tỷ lệ thuận với nhiệt độ, độ ẩm môi trường tự nhiên, tốc độ thoát khí radon tối đa khi độ ẩm trong tường và nền đất nằm trong khoảng từ 7 – 17 %. Cấp hạt của đất làm nhà trình tường (87% cấp hạt bột sét) phù hợp để các đồng vị khí radon lưu trú và khuếch tán. Đặc điểm thành phần gồm oxit sắt (> 4%) và tổ hợp các khoáng vật có cấu trúc lớp (> 50 %) là điều kiện để nguyên tố phóng xạ mẹ urani và thori được hấp phụ tối đa trên bề mặt khoáng vật sét, và thuận lợi để diễn ra quá trình phân rã phóng xạ hình thành các đồng vị khí radon.

(4) Người dân sinh sống trong nhà trình tường bị phơi nhiễm khí radon với liều chiếu hiệu dụng trung bình năm lên tới 5 mSv/năm, nguy cơ rủi ro bị bệnh đến 10%.

(5) Một số biện pháp đề xuất nhằm giảm thiểu nồng độ khí radon trong môi trường không khí trong nhà trình tường: mở thêm cửa sổ, lắp đặt quạt thông gió,

sử dụng các vật liệu che phủ tường và bề mặt nền đất, kê giường ngủ ở vị trí thông thoáng.

2. Kiến nghị

Trong khuôn khổ luận án, các kết quả nghiên cứu mới bước đầu xác định được nguồn thoát khí radon và một số yếu tố ảnh hưởng đến quá trình thoát khí radon trong môi trường không khí nhà trình tường xã Bạch Đích, huyện Yên Minh. Liệu chiếu hiệu dụng và nguy cơ rủi ro bị bệnh cũng mới dừng lại ở việc đánh giá trên số liệu tính toán. Do đó, cần có nghiên cứu chuyên sâu hơn và mở rộng hơn trong khu vực cao nguyên đá Đồng Văn. Đây là di sản văn hóa được đưa vào bảo tồn, do đó cần có nghiên cứu về dữ liệu y tế và sức khỏe để đánh giá cụ thể hơn nữa khả năng phơi nhiễm khí radon đến từ môi trường không khí nhà trình tường.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Nguyệt Thị Ánh Nguyễn, Dương Nguyễn-Thùy, Hương Nguyễn-Văn, Nam Nguyễn-Hải and Arndt Schimmelmänn, 2021. Radioactive thoron ^{220}Rn exhalation from unfired mud building material into room air of earthen dwellings. *Frontiers in Earth Science* 9:629241, ISI, Q3, IF 2.4.
2. Hương Nguyễn-Văn, Dương Nguyễn-Thùy, Nguyệt Thị Ánh Nguyễn, Thomas Streil, Jan P. Schimmelmänn, Kelsey E. Doiron, Thái Nguyễn-Đình, Hồng Nguyễn-Thị, Arndt Schimmelmänn, 2020. Excessive radon-based radiation in indoor air caused by soil building materials in traditional homes on Đồng Văn karst plateau, northern Vietnam. *Chemosphere*, Vol. 257, Oct. 2020, 127119, ISI, Q1, IF 7.7.
3. Nguyen Thuy Duong, Nguyen Anh Nguyet, Nguyen Van Huong, Jan Schimmelmänn, Nguyen Dinh Thai, Arndt Schimmelmänn, 2020. Radon Concentrations and their Controlling Factors in Mud-built Houses in Dong Van Plateau Karst Geopark, Ha Giang Province. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 36, No.1, (2020), pp. 1-10.
4. Dương Nguyễn-Thùy, Hương Nguyễn-Văn, Thomas Streil, Nguyệt Thị Ánh Nguyễn, Minh Ngọc Schimmelmänn, and Arndt Schimmelmänn, 2019. α -radiation from home building materials likely affecting human health in Northern Vietnam. 15th International Conference on Gas Geochemistry-ICGG15, 5th October 2019, ISSN 1590-2595.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu Tiếng Việt

1. Lê Duy Bách, 2016. Bách Khoa thư địa chất, B-D, mục Đứt gãy Việt Nam, pp. 763
2. Nguyễn Thùy Dương, Nguyễn Văn Hương, Arndt Schimmelmänn, Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, Đặng Thị Phương Thảo, Tạ Hòa Phương, 2016. *Đặc điểm nồng độ radon trong môi trường hang động karst khu vực Cao nguyên đá Đồng Văn*. Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường, tập 32, số 2S, trang 187 – 197.
3. Lê Thị Mỹ Hào, Phạm Đức Thọ, Hoàng Trọng Quý, Phạm Ngọc Sơn, 2020. *Đặc điểm đất trồng bậc hạ đại vùng cao nguyên đá Đồng Văn – tỉnh Hà Giang*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam. Số 11 (120)/2020.
4. Trần Trọng Huệ, Trần Văn Dương, Đinh Văn Toàn, Lê Thị Nghinh, Vũ Cao Minh, Nguyễn Văn Phổ, Phạm Tích Xuân, Lâm Thúy Hoàn, Nguyễn Xuân Huyền, Phan Đông Pha, Vũ Văn Chinh, Bùi Văn Thơm, 2004. Đề tài độc lập cấp nhà nước – Nghiên cứu đánh giá tổng hợp các loại hình tai biến địa chất trên lãnh thổ Việt Nam và các giải pháp phòng tránh.
5. Ngô Quang Huy, 2004. An toàn bức xạ ion hóa. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
6. Đặng Trần Huyền, 2009. Địa chất và tài nguyên Việt Nam, phần II – Địa tầng, chương 5 – Liên dãy Permi thượng – Jura trung, dãy Permi thượng – Trias hạ, bể Sông Hiến, pp. 89.
7. Nguyễn Văn Hương, Nguyễn Thùy Dương, Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, Phạm Nữ Quỳnh Nhi, Đặng Thị Phương Thảo, Trần Văn Phong, Nguyễn Ngọc Anh, 2016. *Kiến tạo Kainozoi khu vực Cao nguyên đá Đồng Văn qua phân tích hệ thống các hang động karst*. Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường, tập 32, số 2S, trang 45 – 58.

8. Trần Đức Lương và Nguyễn Xuân Bao, 1977. Bản đồ địa chất miền Bắc Việt Nam tỷ lệ 1: 500.000.
9. Nguyễn Ngọc Minh và Nguyễn Quang Hải, 2018. Khoáng vật học thổ nhưỡng. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội.
10. Đỗ Thị Yến Ngọc, Trần Tân Văn, Đoàn Thế Anh, Hoàng Xuân Đức, Phạm Minh Hải, 2022. *Đặc điểm cấu trúc – kiến tạo và hệ thống hang động khu vực Công viên địa chất toàn cầu UNESCO Cao nguyên đá Đồng Văn*. Kết quả nghiên cứu khoa học và ứng dụng Công nghệ, chuyên đề III, tháng 9 năm 2022, tạp chí Môi trường.
11. Niên giám thống kê huyện Yên Minh, 2022. Cục thống kê Hà Giang, chi cục thống kê Yên Minh. Thư viện quốc gia Việt Nam.
12. Niên giám thống kê tỉnh Hà Giang, 2022. Cục thống kê Hà Giang. Thư viện quốc gia Việt Nam.
13. Nguyễn Văn Phô, 2013. Phong hóa nhiệt đới ẩm. Bộ sách chuyên khảo Tài nguyên thiên nhiên và môi trường Việt Nam. Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ.
14. Phạm Xuân Phương, Nguyễn Văn Lạng, Phạm Xuân Thủy, Trần Đức Thanh, 2017. Lịch sử Đảng bộ xã Bạch Đích 1945 – 2015, chương một, pp. 5 – 15.
15. Tạ Hòa Phương, Nguyễn Văn Vượng, Đoàn Nhật Trường, Đặng Văn Bào, 2010. Báo cáo Nghiên cứu điều kiện tự nhiên vùng cao nguyên đá Đồng Văn - Mèo Vạc phục vụ xây dựng công viên địa chất (Geopark), Đề tài NCKH. QG.08.12, Đại học Quốc gia Hà Nội.
16. Đặng Thị Phương Thảo, Nguyễn Thùy Dương, Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, Nguyễn Văn Hương, Schimmelmanna, 2016. *Hiện trạng môi trường phóng xạ khu vực huyện Đồng Văn, tỉnh Hà Giang*. VNU Journal of Science – Earth and Environmental Sciences Vol. 32, No. 2S, 2016.
17. TCVN 7889:2008, 2008. Tiêu chuẩn Việt Nam về nồng độ khí radon tự nhiên trong nhà - mức quy định và yêu cầu chung về phương pháp đo.

18. TCVN 9415:2012, 2012. Tiêu chuẩn quốc gia về Điều tra, đánh giá địa chất môi trường - Phương pháp xác định liều tương đương.
19. TCVN 9416:2012, 2012. Tiêu chuẩn Việt Nam về Điều tra địa chất môi trường dùng khí phóng xạ.
20. TCVN – Các Tiêu chuẩn Việt Nam, 2001. Ban hành kèm theo Quyết định số 09/2001/QĐ-BKHCNMT ngày 10 tháng 5 năm 2001 của Bộ trưởng Bộ Khoa học Công nghệ và Môi trường.
21. TT19/2012/BKHCN, 2012. Thông tư 19 ngày 8 tháng 11 năm 2012 Thông tư quy định về kiểm soát và bảo đảm an toàn bức xạ trong chiếu xạ nghề nghiệp và chiếu xạ công chúng, Bộ Khoa học và Công nghệ.
22. Đoàn Nhật Trường, 2009. Địa chất và tài nguyên Việt Nam, phần II – Địa tầng, chương 4 – Liên dãy Devon – Permi trung, dãy Carbon hạ, Visé – Permi trung, bể Đông Bắc Bộ, pp. 80.
23. Nguyễn Thành Vạn, 2009. Địa chất và tài nguyên Việt Nam, phần II – Địa tầng, chương 7 – Vỏ phong hóa, các kiểu vỏ phong hóa, pp. 161-164.

Tài liệu Tiếng Anh

1. Adam D. Switzer and Jeremy Pile, 2015. *Grain size analysis*. Handbook of Sea-Level Research, First Edition, Chapter 22, Part 2: Laboratory techniques, Published by John Wiley & Sons, Ltd.
2. Agnieszka P., 2017. *Thorium and uranium in the rock raw materials used for the production of building materials*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 245, 022033.
3. Ahmed N.K., 2005. *Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena City, Upper Egypt*. Journal of Environmental Radioactivity, 83, pp. 91 – 99.
4. Ali A. Ridha and Hawraa K. Ayyed, 2018. *Using wall paints as a barrier to radon gas emission*. Journal of Physical Studies, Vol. 22, No. 1, 1201, 5 pages.

5. Allaby Michael, A Dictionary of Earth Sciences (3ed.), 2008. Oxford dictionary of Earth Sciences.
6. Allard Th. and Calas G., 2009. *Review article: Radiation effects on clay mineral properties*. *Applies clay science* 43, pp. 143 – 149.
7. Andersson P., Wasserburg G., Chen J., Papanastassiou D., Ingri J., 1995. *The importance of colloids for uranium isotopes ^{238}U - ^{234}U and ^{232}Th - ^{230}Th in the Baltic Sea and in river water*. *Earth Planet Sci Lett* 130, pp. 217 – 234.
8. Anil Kumar and Alok Kumar Singh, 2016. *Assesment of indoor radon, thoron and their progeny levels in residential houses of Hardoi, Uttar Pradesh, (India)*. *Green Chemistry & Technology Letters*, Vol. 2, No.2, pp. 62 – 67.
9. Aydinalp C. and FitzPatrick E. A., 2009. *Pedogenesis and characteristics of the Terra rossas developed on different physiographic position and their classification*. *Agrociencia*, Vol. 43, No.2, pp. 97 – 105.
10. Barillon, R., Özgümüş, A., Chambaudet, A., 2005. *Direct recoil radon emanation from crystalline phase. Influence of moisture content*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, pp. 2735 – 2744.
11. Baskaran Mark, 2011. *Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a Review*. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 102, Issue 5, pp. 500 – 513.
12. Baskaran Mark, 2016. *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. Springer Geochemistry. Springer.
13. Bauchinger M., Schmid E., Braselmann H., Kulka U., 1994. *Chromosome-aberrations in peripheral lymphocytes from occupants of houses with elevated indoor radon concentrations*. *Mutation Research – Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, Vol. 310, pp. 135 – 142.
14. Benà E., Ciotoli G., Ruggiero L., Coletti C., Bossew P., Massironi M., Mazzoli C., Mair V., Morelli C., Galgaro A., Morozzi P., Tositti L. and Sassi R., 2022.

- Evaluation of tectonically enhanced radon in fault zones by quantification of the radon activity index.* Scientific Reports, Vol. 12, No. 21586.
15. Bineng, G.S., Saïdou, S.T., Hosoda, M., Siaka, Y.F., Issa, H., Suzuki, T., Kudo, H., Bouba, O., 2020. *The importance of direct progeny measurements for correct estimation of effective dose due to radon and thoron.* Front. Public Health, 8, 17.
 16. Bossew, P., 2003. *The radon emanation power of building materials, soils and rocks.* Appl. Radiat. Isot. 59, pp. 389 – 392.
 17. Bruenner S., Cichon D., Eurin G., Gómez P. H., Jörg F., Undagoitia T. M., Simgen H., and Rupp N., 2021. *Radon daughter removal from PTFE surfaces and its application in liquid xenon detectors.* The European Physical Journal C, Regular Article - Experimental Physics., Vol. 81, No. 343.
 18. Bui Dac Dung, Trinh Van Giap, Tibor Kovacs, Tran Ngoc Toan, Le Dinh Cuong, Tran Khanh Minh, Nguyen Huu Quyet, Nguyen Van Khanh, 2014. *Estimation of radon and thoron caused dose at extraction and processing sites of mineral sand mining area in Vietnam (HA TINH province).* J Radioanal Nucl Chem 299, pp. 1943 – 1948.
 19. Bui Dac Dung, Trinh Van Giap, Tibor Kovacs, Tran Ngoc Toan, Le Dinh Cuong, Tran Khanh Minh, Nguyen Huu Quyet, Nguyen Van Khanh, 2013. *Parallel radon and thoron measurements in mineral sand mining area of Ha Tinh province.* Nuclear Science and Technology, 3(4), pp. 49 – 55.
 20. Bui Van Loat, Leuangtakoun Somsavath, Le Quoc Viet, Tien Thanh Kim, Bui Minh Hue, Tran Dinh Trong, Vu Anh Duc, Duong Van Hao, 2023. *Natural radionuclides and radiological hazard assessment of building materials in North Vietnam.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 333, pp. 2577 – 2586.

21. Bukhari M. and Shukla Dr.A., 2017. *Outgassing rate of different materials and its measurement methods*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 8, Issue 4, pp. 295 – 299.
22. Bulut H. A. and Remzi Şahin, 2024. *Radon, Concrete, Buildings and Human Health—A Review Study*. Buildings, Vol. 14, No.2.
23. Čeliković Igor, Pantelić Gordana, Vukanac Ivana, Krneta Nikolić Jelena, Živanović Miloš, Cinelli Giorgia, Gruber Valeria, Baumann Sebastian, Luis Santiago Quindos Poncela và Rabago Daniel, 2022. *Review Outdoor Radon as a Tool to Estimate Radon Priority Areas - A Literature Overview*. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 662.
24. Cevik, U., Kara, A., Celik, N., Karabidak, M., and Celik, A., 2011. *Radon survey and exposure assessment in Karaca and Çal Caves, Turkey*. Water Air Soil Pollut. 214, pp. 461 – 469.
25. Chauhan, R.P., 2011. *Radon exhalation rates from stone and soil samples of Aravali hills in India*. International Journal of radiation research, 9(1), pp. 57 – 61.
26. Chege M., Hashim N., Nyambura C., Mustapha A., Hosada M., Tokonami S., 2019. *Radon and Thoron; Radioactive Gases Lurking in Earthen Houses in Rural Kenya*. Review article, Front. Public Health, Sec. Radiation and Health, Vol. 7.
27. Chen J., Rahman N.M. and Atiya I.A., 2010. *Radon exhalation from building materials for decorative use*. J Environ Radioact., 101(4):317-22.
28. Chen, J., Moir, D., Sorimachi, A., Janik, M., Tokonami, S., 2012. *Determination of thoron equilibrium factor from simultaneous long-term thoron and its progeny measurements*. Radiat. Prot. Dosim., 149, pp. 155 – 158.

29. Choubey V.M. and Ramola R.C., 1997. *Correlation between Geology and Radon Levels in Groundwater, Soil and Indoor Air in Bhilangana Valley, Garhwal Himalaya, India*. Environmental Geology, 32, pp. 258 – 262.
30. Cinelli G., Decort M., Tollefsen T., 2019. European Atlas of Natural Radiation. Publications Office of the European Union.
31. Cinelli, G., De Cort, M., Tollefsen, T., et.al., 2019. Radon – Chapter 5, Publication Office of the European Union, ISBN: 978-9276082583.
32. Cole, J., Green, M.H.L., Bridges, B.A., Waugh, A.P.W., Beare, D.M., Henshaw, D., Last, R., Liu, Y.F., Cortopassi, G., 1996. *Lack of evidence for an association between the frequency of mutants or translocations in circulating lymphocytes and exposure to radon gas in the home*. Radiation Research 145, pp. 61 – 69.
33. Cuezva S., Fernandez-Cortes A., Benavente D., Serrano-Ortiz P., Kowalski A.S., Sanchez-Moral S., 2011. *Short-term CO₂(g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: Role of the surface soil layer*. Atmospheric Environment, 45 (7), pp. 1418 – 1427.
34. Curguz Z., Stojanovska Z., Zunic Z.S., Kolaz P., Ishikawa T., Omori Y., Mishra R., Sapra B.K., Vaupotic J., Ujic, P. et al., 2015. *Lon-term measurements of radon, thoron and their airborne progeny in 25 schools in Republic of Srpska*. J. Environ. Radioact., 148, pp. 163 – 169.
35. Dang Duc Nhan, Carvalho P. Fernando, Nguyen Thi Thu Ha, Nguyen Quang Long, Dao Dinh Thuan, Heloisa Fonseca, 2012. *Radon (²²²Rn) concentration in indoor air near the coal mining area of Nui Beo, North of Vietnam*. Journal of Environmental Radioactivity 110, pp. 98 – 103.
36. Dobromir Pressyanov and Dimitar Dimitrov, 2024. *Pilot Survey of Outdoor Radon and Thoron Levels in Bulgaria Using an Innovative DVD-Based Method*. Atmosphere, 15(9).

37. Duong Nguyen-Thuy, Huong Nguyen-Van, Jan P. Schimmelmann, Nguyet Thi Anh Nguyen, Kelsey Doiron, Arndt Schimmelmann, 2019. *²²⁰Rn (thoron) geohazard in room air of earthen dwellings in Vietnam*. *Geofluids*, Vol. 2019, Article ID 7202616, 11 pages.
38. Durn Goran, 2003. *Terra Rossa in the Mediterranean Region: Parent Materials, Composition and Origin*. *Geologia Croatica*, Vol. 56, No.1, pp. 83 – 100.
39. Durrige, 2023. RAD7 Manual, Durrige Company.
40. Edsfeldt Cecilia, 2001. *The radium distribution in some Swedish soils and its effect on radon emanation*. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden.
41. EPA, 2003. EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency Washington, DC 20460.
42. EPA, 2022. Health Risk of Radon. Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency Washington, DC 20460.
43. Etiope G. and Martinelli G., 2002. *Migration of carrier and trace gases in the geosphere: An overview*. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, Vol. 129, No. 3 – 4, pp. 185 – 204.
44. Gabdo H. T., Ramli A. T., Saleh M. A., Garba N. N. and Sanusi M., 2016. *Natural radioactivity measurements in Pahang State, Malaysia*. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 52 (3), pp. 298 – 308.
45. Gregorič A., Zidanšek A., Vaupotič J., 2011. *Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature*. *Nat Hazard Earth Sys*, Vol. 11, pp. 1523 – 1528.
46. Gulan, L., Milic, G., Bossew, P., Omori, Y., Ishikawa, T., Mishra, R., Mayya, Y.S., Stojanovska, Z., Nikezic, D., Vuckovic, B., et al., 2012. *Field experience on indoor radon, thoron, their progenies with solid-state detectors in a survey*

- of Kosovo and Metohija (Balkan region)*. Radiat. Prot. Dosim. 2012, 152, pp. 189 – 197.
47. Gunn J., 2003. Radon in caves. In Gunn J (Ed.): Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn (Taylor & Francis Books, Inc.), London, UK, pp. 617 – 619.
48. Guo Q., Shimo, M., Ikebe, Y. and Minato S., 1992. *The Study of Thoron and Radon Progeny Concentrations in Dwellings in Japan*. Radiation Protection Dosimetry, 45, pp. 357 – 359.
49. Haerudin N., Wahyudi W., Suryanto W., 2013. *Radon and Thoron analysis of soil gas survey case study of Rajabasa geothermal field*. AIP Conf. Proc. 1554, 218.
50. Haghani M., Mortazavi S.M.J., Faghihi R., Mehdizadeh S., Moradgholi J., Darvish L., Fathi-Pour E., Ansari L., Ghanbar-pour M.R., 2013. *Nanomaterial containing wall paints can increase radon concentration in houses located in radon prone areas*. J Biomed Phys Eng Vol.3, No. 3, pp. 105 – 108.
51. Han G., Liu C., Wang Z., Zhang H., 1999. *Hydrogeochemical Characteristics of U in the Karst River, Guizhou, China*. Geology-Geochemistry, Vol. 27, pp. 66 – 71 (In Chinese).
52. Haynes W.M., Bruno T.J. and Lide D.R., 2015. CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press.
53. Hewamanna R., Sumithrarachchi C.S., Mahawatte P., Nanayakkara H.L.C. and Ratnayake H.C., 2001. *Natural Radioactivity and Gamma Dose from Sri Lankan Clay Bricks Used in Building Construction*. Applied Radiation and Isotopes, Vol. 54, pp. 365 – 369.
54. Hillel, D., 1998. Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press, Waltham.
55. Hoang Thi Minh Thao, Tran Thi Hien, Dao Duy Anh, Pham Thi Nga, 2017. *Mineralogical characteristics of graphite ore from Bao Ha deposit, Lao Cai*

- Province and proposing a wise use.* Vietnam Journal of Earth Sciences, Vol. 39, No. 4, pp. 324 – 336.
56. Horiba Instruments, 2019. A guide to particle size analysis. USA.
57. Howard M.P. and Thomas F.G., 1984. *Radon in the Environment.* Advances in Radiation Biology, Vol. 11, pp. 391 – 428.
58. Huynh Nguyen Phong Thu, Nguyen Van Thang, Truong Thi Hong Loan, Nguyen Van Dong, Le Cong Hao, 2019. *Natural radioactivity and radon emanation coefficient in the soil of Ninh Son region, Vietnam.* Applied Geochemistry 104, pp. 176 – 183.
59. Huynh Nguyen Phong Thu, Nguyen Van Thang, Vu Ngoc Ba, Nguyen Van Dong, Le Cong Hao. Soil radon gas in some soil types in the rainy season in Ho Chi Minh City, Vietnam. Journal of Environmental Radioactivity 193 – 194, pp. 27 – 35.
60. IAEA – International Atomic Energy Agency, 2004. Radiation, people and the environment. International Atomic Energy Agency Vienna International Centre PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria.
61. IAEA – International Atomic Energy Agency, 2013. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series, No. 33. International Atomic Energy Agency Vienna International Centre PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria.
62. IAEA – International Atomic Energy Agency, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment.
63. ICRP - International Commission On Radiological Protection, 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 3 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25 (1).

64. ICRP - International Commission On Radiological Protection, 2018. Summary of ICRP Recommendations on Radon. ICRP ref 4836-9756-8598.
65. Jagadeesha, B. G. and Narayana, Y., 2018. *Effect of Grain Size on Radon Exhalation Rate in the Soils of Hassan District of Southern India*. Radiochemistry, 2018, Vol. 60, No. 3, pp. 328 – 333.
66. Jodlowski P., 2006. *Self-absorption correction in gamma-ray spectrometry of environmental samples-an overview of methods and correction values obtained for the selected geometries*. Nukleonika 51, 21–25.
67. Jordan Stiles, 2024. *When are radon levels highest? Residential Protect environmental*. Resource Library, The Green Scene.
68. Kandari M.S. and Ramola R.C., 2009. *Analysis of seasonal variation of indoor radon concentration in Tehri Garhwal, Northern India*. Indian Journal of Physics., Vol. 83, pp. 1019 – 1023.
69. Kanokkan T., Jan G., Tripop B., Noodchanath K., Apinun T., 2015. *Radon concentration measurements in secondary schools, Surat Thani Province, Southern Thailand*. Conference of the International Journal of Arts & Sciences, 08(01), pp. 31 – 40.
70. Kudo H., Tokonami S., Omori Y., Ishikawa T., Iwaoka K., Sahoo S.K., Akata N., Hosoda M., Pornnumpa C., Sun Q., 2015. *Comparative dosimetry for radon and thoron in high background radiation areas in China*. Radiat. Prot. Dosim. 2015, 167, pp. 155 – 159.
71. Laughlin M.J.P., Murray M., Currivan L., Pollard D., Smith V., Tokonami S., Sorimachi A., Janik M., 2010. *Thoron and its airborne progeny in Irish dwellings*. In Proceedings of the Third European IRPA Congress, Helsinki, Finland, 14 – 18 June 2010; pp. 2607 – 2612.
72. Le Khanh Phon, Bui Dac Dung, Nguyen Dinh Chau, Tibor Kovacs, Nguyen Van Nam, Duong Van Hao, Nguyen Thai Son, Vu Thi Minh Luan, 2015. *Estimation of effective dose rates caused by radon and thoron for inhabitants*

- living in rare earth field in northwestern Vietnam (Lai Chau province)*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 306(1), pp. 309 – 316.
73. Le Nhu Sieu, Nguyen Thanh Binh, Truong Y, Nguyen Trong Ngo, Nguyen Thi Linh, Nguyen Van Phuc, Nguyen Dinh Tung, Nguyen Kim Thanh, Tran Dinh Khoa, 2011. *Natural Radioactivity in Commonly Building Materials Used in Vietnam*. WM2011 Conference, February 27 - March 3, 2011, Phoenix, AZ.
74. Le Quang Vuong, Huynh Dinh Chuong, Lam Duy Nhat, Hoang Duc Tam, Tran Thien Thanh, Vu Tuan Minh, Le Dunh Hung, Phan Long Ho, Chau Van Tao, 2023. *Assessing radiation hazards associated with natural radioactivity in building materials in Ho Chi Minh city, Vietnam*. Nuclear Technology & Radiation Protection, Vol. 38, No. 1, pp. 30 – 38.
75. Le Viet Huy, Soo Dong Suk, Nguyen An Son, Tran Huu Duy, 2018. *Measurement of Indoor Radon Concentration in Dalat area*. Science and Technology Development Journal 21(2), pp. 71 – 76.
76. Lei Z., Qiuju G., Shanqiang W., 2015. *Dosimetric evaluation of thoron exposure in the three typical rural indoor environments of China*. J Radioanal Nucl Chem (2015) 303, pp. 1565 – 1568.
77. Li S., Feng Z., Tang Z., 2012. *The preliminary study on enrichment behavior of uranium in soil profiles under the karst environment*. J Univ South China (Sci Technol) 26, pp. 1 – 7 (In Chinese).
78. Lindholm C., Mäkeläinen I., Paile W., Koivistoinen A., Salomaa S., 1999. *Domestic radon exposure and the frequency of stable or unstable chromosomal aberrations in lymphocytes*. Int J Radiat Biol, 75(8):921-8.
79. Mahmood Arif, Tufail M., Iqbal M. A., 2013. *Measurement of radon concentration and exhalation rate in some mud houses of district Lahore, Pakistan*. Indoor and Built Environment, pp. 1 – 11.
80. Margaret C., Nadir H., Catherine N., Amidu M., Masahiro H., Shinji T., 2019. *Radon and Thoron; Radioactive Gases Lurking in Earthen Houses in Rural*

- Kenya*. Review article, *Front. Public Health*, Sec. Radiation and Health, Volume 7.
81. Martinez, T., Navarrete, M., Gonzalez, P., Ramirez, A., 2004. *Variation in indoor thoron levels in Mexico City dwellings*. *Radiat. Prot. Dosim.* 2004, 111, pp. 111 – 113.
 82. Meisenberg Oliver, Mishea Rosaline, Joshi Manish, Gierl Stefanie, Rout Rajeswari, Guo Lu, Agarwal Tarun, Kanse Sandeep, Irlinger Josef, Sapra K. Balvinder, Tschiersch Jochen, 2017. *Radon and thoron inhalation doses in dwellings with earthen architecture: Comparison of measurement methods*. *Sci Total Environ.*, Vol. 579, pp. 1855 – 1862.
 83. Melgunov M.S., V.M. Gavshin, F.V. Sukhorukov, I.A. Kalugin, V.A. Bobrov, J. Klerkx., 2003. *Anomalies of radioactivity on the southern bank of the Ysyk-Kul Lake (Kyrgyzstan)*. *Chemistry for Sustainable Development*, Issue 6, pp. 859 – 870.
 84. Miklyaev, P.S., Petrova, T.B., 2011. *Studies of Radon Emanation from Clays*. *Water Resources*, Vol. 38, No. 7, pp. 868 – 875, ISSN 00978078.
 85. Murphy R., Lenhart J., Honeyman B., 1999. *The sorption of thorium (IV) and uranium (VI) to hematite in the presence of natural organic matter*. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* , Vol. 157, pp. 47 – 62.
 86. Mustafa Al-Zoughool and Daniel Krewski, 2009. *Health effects of radon: A review of the literature*. *Int. J. Radiat. Biol.*, Vol. 85, No. 1, pp. 57 – 69.
 87. Narula, A.K., Goyal, S.K., Saini, S., Chauhan, R.P., Chakarvarti, S.K., 2009. *Calculation of radon diffusion coefficient and diffusion length for different building construction materials*. *Indian Journal of Physics.*, Vol. 83, pp.1171 – 1175.
 88. Neal Fredrick, 2016. *Geographic Variation of Radon Gas Concentrations in Relationship to Housing Characteristics in Dekalb County, Georgia*. Master thesis.

89. Nguyen Thi Anh Nguyet, Nguyen Thuy Duong, Arndt Schimmelmann, Nguyen Van Huong, 2018. *Human exposure to radon radiation geohazard in Rong Cave, Dong Van Karst Plateau Geopark, Vietnam*. Vietnam Journal of Earth Sciences, Vol. 40, No. 2, pp. 117 – 125.
90. Nguyệt Thị Ánh Nguyễn, Dương Nguyễn-Thùy, Hương Nguyễn-Văn, Nam Nguyễn-Hải and Arndt Schimmelmann. *Radioactive thoron ^{220}Rn exhalation from unfired mud building material into room air of earthen dwellings*. Frontiers in Earth Science 9:629241.
91. Norafatin K., Amran Ab. M., Redzuwan Y., Muhammad S. Y., 2014. *Radiological risk of building materials using homemade airtight radon chamber*. AIP Conf. Proc. 1584, pp. 207 – 210.
92. Omori Y., Prasad G., Sorimachi A., Sahoo S.K., Ishikawa T., Sagar D.V., Ramola R.C., Tokonami S., 2016. *Long-term measurements of residential radon, thoron, and thoron progeny concentrations around the Chhatrapur placer deposit, a high background radiation area in Odisha, India*. J. Environ. Radioact. 2016, 162, pp. 371 – 378.
93. Palmer M., Edmond J., 1993. *Uranium in river water*. Geochim Cosmochimi Ac 57:4947 – 4955.
94. Pham Tich Xuan, Nguyen Anh Duong, Vu Van Chinh, Pham Thanh Dang, Nguyen Xuan Qua, Nguyen Van Pho, 2020. *Soil Gas Radon Measurement for Identifying Active Faults in Thua Thien Hue (Vietnam)*. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2020, 8, pp. 44 – 64.
95. Pham Tich Xuan, Nguyen Van Pho, Vu Van Chinh, Pham Thanh Dang, Nguyen Thi Lien, Doan Thu Tra, Hoang Tuyet Nga, Bui Van Quynh, Nguyen Van Luan, Nguyen Xuan Qua, 2017. *Study on active tectonic faults using soil radon gas method in Viet Nam*. Vietnam Journal of Earth Sciences, 39(1), pp. 27 – 46.

96. Popit A., and Vaupotič J., 2002. *Indoor Radon Concentrations in Relation to Geology in Slovenia*. Environmental Geology, 42, pp. 330 – 337.
97. Porcelli D. and Swarzenski P., 2003. *The behavior of U- and Th-series nuclides in groundwater*. Rev Mineral Geochem 52, pp. 317 – 361.
98. Qian X., Li X., Li J., 1988. *Investigation of background values of 28 elements in river water from Dongting leak system*. Sci Geogr Sin 8, pp. 79 – 86 (In Chinese)
99. Qiang M., Bing-jie Z., Zhi-gang F., Xiao-long W., Rong C., Pei-shan L., Chong H., 2023. *Geochemical behaviors of uranium and thorium during weathering and pedogenesis of carbonate rock: constraint from their speciation*. Environmental Science and Pollution Research, 30, pp. 95348 – 95366.
100. Rafat M.A., 2015. *A study of radon emitted from building materials using solid state nuclear track detectors*. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8(4), pp. 516 – 522.
101. Ramachandran T.V., 2010. *Environmental thoron (^{220}Rn): A review*. Iran. J. Radiat. Res., Vol. 8, No. 3, pp. 129 – 147.
102. Ramola, R.C., Prasad Mukesh, Kandari Tushar, Pant Preeti, Bossew Peter, Mishra Rosaline, Tokonami S., 2016. *Dose estimation derived from the exposure to radon, thoron and their progeny in the indoor environment*. Sci Rep. 2016; 6: 31061.
103. Ryu J., Lee K., Chang H., Cheong C., 2009. *Uranium isotopes as a tracer of sources of dissolved solutes in the Han River, South Korea*. Chem Geol 258, pp. 354 – 361.
104. Sabine G., 1989. *Interaction of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: A review*. Commun. In soil sci. Plant anal., 20(11412), pp. 1181 – 1207.

105. Sakoda, A., Ishimori, Y., Hanamoto, K., Kataoka, T., Kawabe, A., and Yamaoka, K., 2010. *Experimental and modeling studies of grain size and moisture content effects on radon emanation*. Radiat. Meas. 45, pp. 204 – 210.
106. Sakoda, A., Ishimori, Y., Yamaoka, K., 2011. *Review: A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash*. Applied Radiation and Isotopes, Volume 69, Issue 10.
107. Saputra, M.A., Nugraha, E.D., Purwanti, T., Arifianto, R., Laksmana, R.I., Hutabarat, R.P., Hosoda, M., Tokonami, S., 2020. *Exposures from radon, thoron, and thoron progeny in high background radiation area in Takandeang, Mamuju, Indonesia*. Nukleonika 2020, 65, pp. 89 – 94.
108. SARAD GmbH, 2015. Handbuch Software dVision.
109. SARAD GmbH, 2021. Manual Thoron Scout, Radon-/Thoron-measurement equipment.
110. Sehrani M.S., Boudaqpour S., Mirmohammadi M., Hajizadeh A., 2019. *Radon Gas Concentration Measurement and Assessment of Health Risk in Tehran, Iran*. Amirkabir Journal of Civil Engineering, vol 51, No.1, pp. 39 – 42.
111. Shang, B., Tschiersch, J., Cui, H., Xia, Y., 2008. *Radon survey in dwellings of Gansu, China: The influence of thoron and an attempt for correction*. Radiat. Environ. Biophys. 2008, 47, pp. 367 – 373
112. Sivakumar R., 2016. *A study on indoor radiation dose, radon, thoron and progenies concentrations in a hilly area*. Environmental Earth Sciences, 75(11).
113. Sivakumar S., 2010. *A study on radon and thoron progeny levels in dwellings in South India*. Iran. J. Radiat. Res., 2010; 8 (3), pp. 149 – 154.
114. Stephanie C.L., David F., Chris S., Eugene M., 2016. *Factors underlying persistently high radon levels in a house located in a karst limestone region of*

- Ireland – lessons learned about remediation*. NUKLEONIKA 2016; 61(3), pp. 327 – 332.
115. Stojanovska Z., Bossew P., Tokonami S., Zunic Z.S., Bochicchio F., Boev B., Ristova M., Januseski J., 2013. *National survey of indoor thoron concentration in FYR of Macedonia (continental Europe – Balkan region)*. Radiation Measurements, Vol. 49, pp. 57 – 66.
116. Strong John Donovan, 1938. *Procedures in experimental physics*. Publisher Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
117. Sukanya, S., Jacob Noble, Sabu Joseph, 2022. *Application of radon (^{222}Rn) as an environmental tracer in hydrogeological and geological investigations: An overview*. Chemosphere, Vol. 303, Part 3, 135141.
118. Sun C., Wang S., Liu X., Feng Z., 2002. *Geochemical characteristics and formation mechanism of rock-soil interface in limestone weathering crust at Huaxi Guizhou province*. Acta Mineral Sin 22, pp. 126 – 132 (In Chinese).
119. Szabó, K.Z., Jordan, G., Horváth, A., Szabó, C., 2013. *Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series*. Journal of environmental radioactivity 124, pp. 74 – 83.
120. Thao Hoang-Minh, Joörn Kasbohm, Lan Nguyen-Thanh, Pham Thi Nga, Le Thi Lai, Nguyen Thuy Duong, Nguyen Duc Thanh, Nguyen Thi Minh Thuyet, Dao Duy Anh, Roland Pusch, Sven Knutsson and Rafael Ferreiro Mañhlmann, 2019. *Use of TEM-EDX for structural formula identification of clay minerals: a case study of Di Linh bentonite, Vietnam*. Journal of Applied Crystallography, 52(1), pp. 133 – 147.
121. The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2006. Report, Volume II, Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York, NY: United Nations (2009).

122. Tran Thanh Hai, Dang Van Bat, Ngo Kim Chi, Hoang Dinh Que, Nguyen Minh Quyen, 2013. *Structural controls on the occurrence and morphology of karstified assemblages in northeastern Vietnam: a regional perspective*. Environ. Earth Sci. 70 (2), pp. 511 – 520.
123. Trung Nguyen-Quang, Minh Bui-Quang, Minh Truong-Ngoc, 2021. *Rapid Identification of Geographical Origin of Commercial Soybean Marketed in Vietnam by ICP-MS*. Journal of Analytical Methods in Chemistry Vol. 2021, Article ID 5583860, 9 pages.
124. Ufer K., Stanjek H., Roth G., Dohrmann R., Kleeberg R., Kaufhold S., 2008. *Quantitative Phase Analysis of Bentonites by the Rietveld Method*. Clays Clay Miner. 56, pp. 272 – 282.
125. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 1982. *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects*. New York, NY: United Nations.
126. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2000. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. New York, NY: United Nations.
127. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2009. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. New York, NY: United Nations.
128. V.M. Gavshin, M.S. Melgunov, F.V. Sukhorukov, V.A. Bobrov, I.A. Kalugin and J. Klerkx. *Disequilibrium between uranium and its progeny in the Lake Issyk-Kul system (Kyrgyzstan) under a combined effect of natural and manmade processes*. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, Vol. 83, Issue 1, pp. 61 – 74.
129. Vaupotič J., Barišić D., Kobal I., Lulić S., 2007. *Radioactivity and radon potential of the terra rossa soil*. Radiat Meas 42, pp. 290 – 297.

130. Wang S., Chen Y., Pan Z., Liu J., Ding Y., Wang Y., Liu D., Wu S., Hu D., Li R., Xia Q., Zhang L., Ding H., 2024. *Effects of EDTA and Bicarbonate on U(VI) Reduction by Reduced Nontronite*. Environmental Science & Technology, Vol. 58, Issue 52.
131. Wang S., Ji H., Ouyang Z., Zhou D., Zhen L., Li T., 1999. *Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock*. Sci China (Ser D) 42, pp. 572 – 581.
132. WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, World Health Organization, pp. 1 – 9.
133. Yamamoto S., Kato K., Fujita N., Yamashita M., Nishimoto T., Kameyama H., Abe S., 2018. *Detection of alpha radionuclides in air from patients during Ra-223 alpha radionuclide therapy*. Scientific Reports 8:10976.
134. Zhou C., Feng Z., Lv J., 2013. *Geochemical research on enrichment behavior of thorium in limestone soil profiles*. J Univ South China (Sci Technol) Vol. 27, pp. 32 – 38 (In Chinese)
135. Zhou W., Lida T., Moriizumi J., Aoyagi T., Takahashi I., 2001. *Simulation of the Concentrations and Distributions of Indoor Radon and Thoron*. Radiation Protection Dosimetry, Vol.93, No.4, pp. 357 – 68.
136. Zunic, Z.S., Stojanovska, Z., Veselinovic, N., Mishra, R., Yarmoshenko, V., Sapra, B.K., Ishikawa, T., Omori, Y., Curguz, Z., Bossew, P., et al., 2017. *Indoor radon, thoron and their progeny concentrations in high thoron rural Serbia environments*. Radiat. Prot. Dosim. 2017, 177, pp. 36 – 39.

Tài liệu theo đường link

1. <http://www.world-nuclear.org>
2. <https://grantforsyth.blogspot.com/2011/05/togo-earthen-castles.html>
3. <https://hagiang.gov.vn/>
4. <https://juta.co.uk/juta-news/what-is-radon/>

5. <https://timesofindia.indiatimes.com/city/thiruvananthapuram/mud-houses-are-the-new-fad-in-the-capital/articleshow/64116032.cms>
6. <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/effects/therapies.html#:~:text=In%20a%20radon%20treatment%2C%20radioactive,mainly%20used%20for%20rheumatic%20diseases>

PHỤ LỤC

1. Phụ lục 1

Kết quả khảo sát nồng độ khí radon trong môi trường không khí ngoài trời khu vực nghiên cứu. Trong đó các ký hiệu: QB: Quán Bạ, ĐV: Đồng Văn, YM: Yên Minh, BD: Bạch Đích.

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
QB1	23,0583	104,9965	15,00	0,00
QB2	23,0581	104,9961	0,00	36,93
QB3	23,0583	104,9966	0,00	0,00
QB4	23,0638	104,9969	0,00	0,00
QB5	23,0643	105,0025	0,00	0,00
QB6	23,0567	105,0256	29,54	73,86
QB7	23,0727	105,0341	59,08	0,00
QB8	23,1051	105,0326	0,00	0,00
QB9	23,1425	105,0257	0,00	0,00
QB10	23,1458	105,0253	0,00	73,86
QB11	23,1121	105,0313	0,00	36,93
QB12	23,0726	105,0342	0,00	0,00
QB13	23,0573	105,0260	0,00	36,93
QB14	23,0641	105,0029	0,00	0,00
QB15	23,0658	104,9994	0,00	18,00
QB16	23,1032	105,0336	0,00	171,75
QB17	23,0653	105,0330	0,00	85,87
QB18	23,0532	105,0257	0,00	85,87
QB19	23,0562	105,0183	100,44	0,00
QB20	23,0582	104,9966	100,44	85,87
QB21	23,0449	104,9926	133,91	0,00
QB22	23,0602	104,9945	0,00	85,87

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
QB23	23,0619	104,9936	0,00	86,16
QB24	23,0469	104,9929	0,00	85,87
QB25	22,9964	104,9421	66,96	0,00
YM1	23,1632	105,0307	0,00	0,00
YM2	23,1784	105,0411	29,54	0,00
YM3	23,1720	105,0543	59,08	36,93
YM4	23,1593	105,0705	0,00	36,93
YM5	23,1449	105,0846	118,17	0,00
YM6	23,1223	105,0948	0,00	0,00
YM7	23,1230	105,1232	59,08	36,93
YM8	23,1178	105,1440	59,08	0,00
YM9	23,1177	105,1444	0,00	295,42
YM10	23,1176	105,1444	59,08	292,00
YM11	23,1177	105,1444	0,00	166,00
YM12	23,1177	105,1445	0,00	62,00
YM13	23,1177	105,1443	0,00	74,00
YM14	23,1181	105,1440	0,00	74,00
YM15	23,1281	105,1662	59,08	74,00
YM16	23,1212	105,1320	0,00	0,00
YM17	23,1223	105,1101	0,00	36,93
YM18	23,1216	105,0926	103,00	0,00
YM19	23,1216	105,0926	0,00	0,00
YM20	23,1217	105,0899	0,00	36,93
YM21	23,1428	105,0851	0,00	73,86
YM22	23,1595	105,0708	147,71	0,00
YM23	23,1745	105,0523	0,00	0,00

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
YM24	23,1757	105,0372	0,00	36,93
YM25	23,1567	105,0274	0,00	36,93
YM26	23,0944	105,2531	33,48	0,00
YM27	23,0800	105,2556	66,96	0,00
YM28	23,0692	105,2460	33,48	0,00
YM29	23,0728	105,2267	33,48	0,00
YM30	23,0871	105,2129	0,00	257,62
YM31	23,1192	105,1390	33,59	0,00
YM32	23,1235	105,1230	0,00	85,87
YM33	23,1654	105,0603	33,48	85,87
YM34	23,1804	105,0490	0,00	85,87
YM35	23,1851	105,0504	33,48	85,87
YM36	23,1926	105,0602	33,48	0,00
YM37	23,1963	105,0611	33,48	0,00
YM38	23,1963	105,0614	33,48	85,87
YM39	23,1963	105,0617	100,44	0,00
YM40	23,2147	105,0518	33,48	0,00
YM41	23,2147	105,0518	0,00	171,75
YM42	23,2161	105,0497	100,44	0,00
YM43	23,2163	105,0408	33,48	85,87
YM44	23,2181	105,0389	33,48	0,00
YM45	23,2183	105,0325	33,48	0,00
YM46	23,2198	105,0274	33,48	0,00
YM47	23,2181	105,0240	33,48	0,00
YM48	23,2068	105,0515	100,44	0,00
YM49	23,1962	105,0612	100,44	0,00

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
YM50	23,1646	105,0319	66,96	0,00
YM51	23,1425	105,0257	0,00	36,93
YM52	23,1784	105,0411	0,00	36,93
YM53	23,1449	105,0846	0,00	36,93
YM54	23,1223	105,0948	0,00	36,93
YM55	23,1177	105,1445	0,00	36,93
ĐV1	23,1479	105,1796	0,00	37,00
ĐV2	23,1716	105,1937	0,00	126,00
ĐV3	23,2063	105,1949	0,00	37,00
ĐV4	23,2233	105,1984	0,00	37,00
ĐV5	23,2271	105,2018	0,00	93,00
ĐV6	23,2315	105,2100	59,08	37,00
ĐV7	23,2490	105,2367	29,54	37,00
ĐV8	23,2570	105,2623	29,54	135,00
ĐV9	23,2573	105,2932	29,54	74,00
ĐV10	23,2719	105,3227	29,54	148,00
ĐV11	23,2771	105,3499	0,00	74,00
ĐV12	23,2762	105,3357	29,54	0,00
ĐV13	23,2717	105,3216	59,08	0,00
ĐV14	23,2707	105,3190	45,00	0,00
ĐV15	23,2248	105,2444	59,00	0,00
ĐV16	23,2160	105,2410	118,00	0,00
ĐV17	23,2131	105,2383	89,00	0,00
ĐV18	23,2118	105,2368	74,00	0,00
ĐV19	23,2117	105,2361	98,00	0,00
ĐV20	23,2137	105,2385	74,00	0,00

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
ĐV21	23,2712	105,3200	59,00	0,00
ĐV22	23,2831	105,3238	30,00	0,00
ĐV23	23,3062	105,3048	89,00	0,00
ĐV24	23,2879	105,3118	89,00	0,00
ĐV25	23,2712	105,3200	59,00	0,00
ĐV26	23,2831	105,3238	30,00	0,00
ĐV27	23,3062	105,3048	89,00	0,00
ĐV28	23,2879	105,3118	89,00	0,00
ĐV29	23,2878	105,3132	74,00	443,87
ĐV30	23,2896	105,3126	74,00	36,93
ĐV31	23,2865	105,3127	89,00	147,71
ĐV32	23,2793	105,3346	118,00	147,71
ĐV33	23,2699	105,3366	30,00	295,42
ĐV34	23,2709	105,3347	74,00	332,00
ĐV35	23,2717	105,3367	89,00	148,00
ĐV36	23,2697	105,3375	30,00	129,00
ĐV37	23,2753	105,3428	59,00	37,00
ĐV38	23,2790	105,3611	59,00	37,00
ĐV39	23,2797	105,3610	207,00	111,00
ĐV40	23,2804	105,3631	222,00	111,00
ĐV41	23,2799	105,3602	148,00	0,00
ĐV42	23,2587	105,3017	89,00	73,86
ĐV43	23,2287	105,2059	59,00	0,00
ĐV44	23,2260	105,2031	59,00	36,93
ĐV45	23,1316	105,2778	33,48	0,00
ĐV46	23,1042	105,2557	33,48	0,00

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
ĐV47	23,1479	105,1796	0,00	73,86
ĐV48	23,2315	105,2100	0,00	36,93
ĐV49	23,2490	105,2367	0,00	36,93
ĐV50	23,2719	105,3227	0,00	36,93
ĐV51	23,2160	105,2410	71,97	36,93
ĐV52	23,2131	105,2383	57,58	73,86
ĐV53	23,2119	105,2369	14,39	0,00
ĐV54	23,2118	105,2369	14,39	73,86
ĐV55	23,2118	105,2368	71,97	0,00
ĐV56	23,2117	105,2361	100,76	36,93
ĐV57	23,2117	105,2361	143,95	73,86
ĐV58	23,2116	105,2361	187,13	73,86
ĐV59	23,2116	105,2361	187,13	110,78
ĐV60	23,2119	105,2368	129,55	36,93
ĐV61	23,2136	105,2386	115,16	221,57
ĐV62	23,2137	105,2386	115,16	110,78
ĐV63	23,2137	105,2385	143,95	184,64
ĐV64	23,2138	105,2387	71,97	0,00
ĐV65	23,2139	105,2388	43,18	36,93
ĐV66	23,2139	105,2388	57,58	0,00
ĐV67	23,2139	105,2388	43,18	73,86
ĐV68	23,2141	105,2391	28,79	0,00
ĐV69	23,2160	105,2411	0,00	36,93
ĐV70	23,2253	105,2388	43,26	0,00
ĐV71	23,2573	105,2503	43,18	36,93
ĐV72	23,2670	105,3147	0,00	36,93

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
ĐV73	23,2709	105,3193	0,00	110,78
ĐV74	23,2708	105,3189	0,00	221,57
ĐV75	23,2707	105,3191	0,00	110,78
ĐV76	23,2709	105,3192	0,00	36,93
ĐV77	23,2710	105,3193	0,00	184,64
ĐV78	23,2712	105,3196	43,18	147,71
ĐV79	23,2712	105,3200	28,79	73,86
ĐV80	23,2831	105,3238	14,39	0,00
ĐV81	23,3062	105,3048	57,58	0,00
ĐV82	23,2879	105,3118	71,97	36,93
ĐV83	23,2868	105,3127	0,00	36,93
ĐV84	23,2878	105,3132	43,18	147,71
ĐV85	23,2878	105,3132	57,58	184,64
ĐV86	23,2878	105,3132	0,00	258,49
ĐV87	23,2881	105,3130	0,00	73,86
ĐV88	23,2882	105,3131	0,00	0,00
ĐV89	23,2884	105,3131	0,00	73,86
ĐV90	23,2888	105,3129	14,39	0,00
ĐV91	23,2888	105,3129	0,00	0,00
ĐV92	23,2888	105,3129	43,18	73,86
ĐV93	23,2896	105,3128	43,18	0,00
ĐV94	23,2897	105,3130	43,18	147,71
ĐV95	23,2894	105,3129	0,00	73,86
ĐV96	23,2892	105,3127	14,39	184,64
ĐV97	23,2896	105,3126	14,39	73,86
ĐV98	23,2895	105,3129	43,18	73,86

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
ĐV99	23,2895	105,3128	14,39	0,00
ĐV100	23,2900	105,3128	28,79	0,00
ĐV101	23,2901	105,3127	28,79	0,00
ĐV102	23,2901	105,3127	0,00	73,86
ĐV103	23,2897	105,3128	43,18	110,78
ĐV104	23,2893	105,3129	28,79	36,93
ĐV105	23,2871	105,3129	43,18	147,71
ĐV106	23,2860	105,3144	14,39	0,00
ĐV107	23,2846	105,3174	0,00	73,86
ĐV108	23,2793	105,3346	57,58	73,86
ĐV109	23,2707	105,3394	0,00	443,87
ĐV110	23,2699	105,3366	28,79	36,93
ĐV111	23,2709	105,3347	57,58	147,71
ĐV112	23,2708	105,3346	14,42	36,99
ĐV113	23,2710	105,3346	28,79	36,93
ĐV114	23,2710	105,3347	14,39	36,93
ĐV115	23,2710	105,3348	43,18	73,86
ĐV116	23,2708	105,3352	14,39	147,71
ĐV117	23,2708	105,3352	43,18	147,71
ĐV118	23,2708	105,3352	43,18	73,86
ĐV119	23,2708	105,3355	43,18	73,86
ĐV120	23,2717	105,3367	57,58	36,93
ĐV121	23,2717	105,3367	28,79	147,71
ĐV122	23,2717	105,3368	0,00	73,86
ĐV123	23,2718	105,3368	0,00	36,93
ĐV124	23,2714	105,3364	28,79	36,93

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
ĐV125	23,2705	105,3356	0,00	110,78
ĐV126	23,2697	105,3375	14,39	147,71
ĐV127	23,2715	105,3393	0,00	295,42
ĐV128	23,2753	105,3428	43,18	0,00
ĐV129	23,2778	105,3544	14,39	0,00
BD 1	23,2101	105,0109	0,00	85,87
BD 2	23,2111	105,0050	133,91	214,68
BD 3	23,2106	105,0047	0,00	257,62
BD 4	23,2114	105,0061	83,70	386,43
BD 5	23,2108	105,0072	0,00	214,68
BD 6	23,2108	105,0081	0,00	257,62
BD 7	23,2100	105,0092	0,00	128,81
BD 8	23,2106	105,0086	0,00	85,87
BD 9	23,2103	105,0094	0,00	686,99
BD 10	23,2100	105,0100	117,17	558,18
BD 11	23,2097	105,0106	0,00	214,68
BD 12	23,2092	105,0106	0,00	429,37
BD 13	23,2086	105,0103	0,00	2790,90
BD 14	23,2089	105,0097	0,00	3177,33
BD 15	23,2086	105,0097	0,00	3649,64
BD 16	23,2086	105,0092	0,00	3263,20
BD 17	23,2083	105,0086	0,00	1846,29
BD 18	23,2089	105,0078	0,00	2232,72
BD 19	23,2078	105,0081	184,13	1932,16
BD 20	23,2078	105,0078	0,00	2404,47
BD 21	23,2075	105,0078	0,00	2662,09

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
BD 22	23,2072	105,0075	0,00	2833,83
BD 23	23,2069	105,0072	184,13	2533,28
BD 24	23,2067	105,0075	234,35	2404,47
BD 25	23,2067	105,0075	234,35	2361,53
BD 26	23,2106	105,0086	0,00	1760,41
BD 27	23,2136	105,0114	0,00	1118,22
BD 28	23,2158	105,0153	184,13	2490,34
BD 29	23,2161	105,0175	100,44	1803,35
BD 30	23,2161	105,0214	0,00	2103,91
BD 31	23,2161	105,0222	0,00	2275,65
BD 32	23,2181	105,0244	0,00	1245,17
BD 33	23,2197	105,0261	0,00	2318,59
BD 34	23,2194	105,0281	0,00	3005,58
BD 35	23,2197	105,0286	251,09	2619,15
BD 36	23,2194	105,0314	0,00	1502,79
BD 37	23,2169	105,0331	0,00	2232,72
BD 38	23,2164	105,0347	0,00	1846,29
BD 39	23,2175	105,0350	0,00	2146,84
BD 40	23,2175	105,0364	0,00	1975,10
BD 41	23,2181	105,0386	0,00	2790,90
BD 42	23,2164	105,0406	0,00	2662,09
BD 43	23,2156	105,0411	0,00	343,50
BD 44	23,2164	105,0419	0,00	42,94
BD 45	23,2156	105,0428	0,00	343,50
BD 46	23,2153	105,0447	0,00	300,56
BD 47	23,2164	105,0483	217,97	0,00

Ký hiệu	Vĩ độ	Kinh độ	Đồng vị khí	
			Rn-222 (Bq m ⁻³)	Rn-220 (Bq m ⁻³)
BD 48	23,2144	105,0517	0,00	43,01
BD 49	23,2139	105,0506	0,00	171,75
BD 50	23,2122	105,0500	167,39	42,94
BD 51	23,2103	105,0489	0,00	42,94
BD 52	23,2089	105,0461	0,00	387,08
BD 53	23,2067	105,0467	0,00	472,31
BD 54	23,2075	105,0481	0,00	472,31
BD 55	23,2081	105,0500	0,00	172,03
BD 56	23,2086	105,0506	0,00	257,62
BD 57	23,2083	105,0519	0,00	171,75
BD 58	23,2083	105,0531	0,00	128,81
BD 59	23,2075	105,0525	0,00	85,87
BD 60	23,2161	105,0497	100,44	0,00
BD 61	23,2163	105,0408	33,48	85,87
BD 62	23,2181	105,0389	33,48	0,00
BD 63	23,2183	105,0325	33,48	0,00
BD 64	23,2198	105,0274	33,48	0,00
BD 65	23,2181	105,0240	33,48	0,00
BD 66	23,2068	105,0515	100,44	0,00
BD 67	23,1962	105,0612	100,44	0,00
BD 68	23,1646	105,0319	66,96	0,00
BD 69	23,1425	105,0257	0,00	36,93
BD 70	23,1784	105,0411	0,00	36,93
BD 71	23,1449	105,0846	0,00	36,93
BD 72	23,1223	105,0948	0,00	36,93
BD 73	23,1177	105,1445	0,00	36,93

2. Phụ lục 2

Kết quả khảo sát chi tiết nồng độ khí radon trong nhà trình tường.

a. Đồng vị khí Rn-222

Mùa khô

RAD7

		C1	Sai số	C2	Sai số	C3	Sai số	C4	Sai số	C5	Sai số
Sát tường		Giường ngủ									
	R4	26,82	±19,59	54,50	±36,33	5,05	±3,37	62,50	±41,67	62,50	±10,10
	R3	40,33	±24,20	48,05	±32,55	47,03	±28,43	53,50	±37,70	5,05	±5,05
	R2	25,34	±10,89	79,35	±0,95	34,40	±0,80	10,40	±10,40	95,50	±9,50
	R1	7,35	±3,15	60,75	±11,45	20,90	±13,93	65,15	±16,65	45,90	±3,80

SARAD® RTM 2200

		R1	Sai số	R2	Sai số	R3	Sai số	R4	Sai số	R5	Sai số
Sát tường		Giường ngủ									
	S4	75,50	±8,50	84,00	±8,00	150,65	±10,00	61,02	±8,00	167,39	±16,80
	S3	84,00	±8,00	75,50	±8,50	53,59	±8,00	35,77	±0,00	54,41	±0,00
	S2	100,00	±10,00	83,59	±33,59	100,44	±8,50	99,41	±10,00	53,16	±0,00
	S1	66,85	±16,85	75,35	±8,35	67,00	±16,72	22,84	±0,00	52,28	16,85

Mùa mưa

RAD7

		C1	Sai số	C2	Sai số	C3	Sai số	C4	Sai số	C5	Sai số
Sát tường		Giường ngủ									
	R4	106,90	±89,10	89,00	±89,00	115,45	±26,55	107,00	±71,33	79,80	±44,20
	R3	89,15	±17,85	35,55	±23,70	26,68	±17,78	17,80	±11,87	22,28	±14,85
	R2	125,00	±62,50	23,70	±17,78	223,00	±148,67	26,75	±10,31	124,50	±42,71
	R1	26,75	±17,83	241,00	±84,43	214,50	±77,89	89,15	±31,45	89,15	±24,65

b. Đồng vị khí Rn-220

Mùa khô

RAD7

		C1	Sai số	C2	Sai số	C3	Sai số	C4	Sai số	C5	Sai số
Sát tường		Giường ngủ									
	R4	714,00	±49,79	199,5	±111,72	383	±92,00	577	±39,00	227,5	±38,50
	R3	614,00	±30,81	498	±61,00	256	±73,00	423	±12,00	464,5	±128,50
	R2	793,00	±58,39	208,5	±2,50	127,5	±54,50	386,5	±112,50	349	±17,00
	R1	503,67	±133,04	627	±95,00	620	±35,00	648,5	±198,50	494,5	±201,50

SARAD® RTM 2200

		C1	Sai số	C2	Sai số	C3	Sai số	C4	Sai số	C5	Sai số
Sát tường		Giường ngủ									
	S4	1.309,57	±279,09	686,99	±85,87	279,09	±150,28	407,90	±150,28	322,03	±150,28
	S3	1.717,48	±257,62	708,46	±21,47	257,62	±42,94	493,77	±107,34	279,09	±21,47
	S2	2.383,00	±150,28	579,65	±21,47	279,09	±107,34	300,56	±42,94	665,52	±64,41
	S1	1.331,04	±472,31	644,05	±42,94	1.180,76	±279,09	665,52	±21,47	407,90	±107,34

Mùa mưa

RAD7

		C1	Sai số	C2	Sai số	C3	Sai số	C4	Sai số	C5	Sai số
		Giường ngủ									
Sát tường	R4	1.120,00	±20,00	230,70	±195,30	176,90	±85,03	231,00	±89,00	230,50	±88,50
	R3	727,50	±53,50	301,50	±18,50	215,00	±44,50	212,50	±70,50	216,00	±79,45
	R2	196,00	±53,00	201,00	±31,18	231,00	±89,00	248,00	±36,00	213,00	±35,00
	R1	266,50	±17,50	1.050,75	±16,25	2.475,00	±15,00	515,00	±266,00	515,00	±266,00

