

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.35:614.876

УРОВНИ ЭКСХАЛЯЦИИ РАДОНА НА ЗАПАДНОМ СКЛОНЕ ГОРЫ БЕШТАУ, КАВКАЗСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ

© 2018 г. П. С. Микляев^{1,2,*}, Т. Б. Петрова^{3,**}, А. М. Маренный^{2,***}, Н. А. Нефедов²,
Т. В. Остапчук^{4,****}, Д. В. Щитов⁵, П. А. Сидякин^{5,*****}, М. А. Мурзабеков⁵

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр.2, Москва, 101000 Россия

²Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России,
Шукинская ул., 40, Москва, 123182 Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический ф-т, кафедра радиохимии,
Ленинские горы, д. 1, стр. 3, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

⁴Центр гигиены и эпидемиологии №101 ФМБА России,
ул. Ленина, 26, г. Лермонтов, Ставропольский край, 357340 Россия

⁵Северо-Кавказский федеральный университет, филиал в г. Пятигорске,
инженерный ф-т, кафедра строительства; ул. Ермолова, 46а, г. Пятигорск,
Ставропольский край, 357500 Россия

*E-mail: peterm7@inbox.ru

**E-mail: tbp111@inbox.ru

***E-mail: amarennyu@yandex.ru

****E-mail: cge101@fmbamail.ru

*****E-mail: sidyakin_74@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2018 г.

Исследования уровней эксхалиции радона в районе горы Бештау были проведены с целью определения фоновых показателей радиационной обстановки, характерных для данной территории в природных условиях в наименьшей степени затронутых деятельностью горнодобывающего предприятия НПО “Алмаз”. Установлено, что плотность потока радона с поверхности почв и горных пород у подножия горы и в нижней пологой части склона составляет в среднем 295 мБк/м²с, а в верхней части массива, сложенной магматическими породами, в среднем 1438 мБк/м²с. Высокие уровни эксхалиции радона связаны с повышенным содержанием радионуклидов уранового ряда в почвах и горных породах исследуемой территории, особенно в бештаунитах, слагающих верхнюю часть массива. Кроме того, обнаружена локальная, но очень мощная радоновая аномалия. Плотность потока радона в аномальной зоне достигает 15 000 мБк/м²с, что обуславливает аномально высокие концентрации радона в атмосферном воздухе (≥ 4000 Бк/м³). Аномальные уровни эксхалиции радона могут быть объяснены конвективным переносом радона из недр горы.

Ключевые слова: радон, объемная активность радона, плотность потока радона, удельная активность радионуклидов, радоновая аномалия

DOI: 10.1134/S0869780318040063

ВВЕДЕНИЕ

Масштабные исследования последних двух десятилетий позволили достоверно установить линейный рост заболеваемости раком легкого с увеличением концентрации радона и его продуктов распада в жилых и общественных помещениях [2, 12, 21]. Одной из профилактических мер является снижение доз облучения населения радоном в помещениях, для чего, в том числе, проводятся исследования, нацеленные на выявление и картирование зон повышенного радонового риска [3, 11, 14, 20]. В настоящее время внимание иссле-

дователей сосредоточено на геологических аспектах картирования радонового риска, т.е. на изучении условий выделения радона из геологической среды, а также на разработке методологии крупномасштабного картирования зон повышенной эксхалиции радона [20]. Большое внимание уделяется также исследованиям эксхалиции радона с поверхности урановых хвостохранилищ и отвалов, как одного из радиационно-опасных факторов. Известно, что выделение радона с поверхности урановых отвалов достигает высоких значений (до 20 000 мБк/м²с), а концентрации радона в

атмосферном воздухе на открытой местности могут многократно превышать допустимые уровни для помещений [17, 18].

Агломерация Кавказских Минеральных Вод (КМВ) – один из наиболее радоноопасных регионов России, характеризуется повышенной природной радиоактивностью горных пород, наличием системы глубинных разломов, разгрузкой радиоактивных, в том числе радоновых вод. Как природные, так и техногенные факторы обуславливают, в частности, экстремально высокие концентрации радона в домах населенных пунктов, окружающих горный массив Бештау – г. Лермонтов, г. Пятигорск, пос. Иноземцево [9].

С 1949 г. в районе горы Бештау началась разработка месторождений урановых руд, в период 1954–1989 гг. вблизи г. Лермонтов работало предприятие по добыче и переработке урановой руды НПО “Алмаз” [4]. В настоящее время на территории рудника проводятся реабилитационные мероприятия. На начальном этапе работ по реабилитации необходимо проведение исследований уровней эксхалляции радона с поверхности хвостохранилищ, отвалов, рудников, а также концентрации радона в атмосферном воздухе и в помещениях зданий, расположенных на территориях, потенциально подверженных воздействию уранового производства [8]. Для оценки вклада техногенной составляющей в дозу облучения населения необходимо знать фоновые уровни радиационных факторов, характерные для данной территории в природных неизмененных условиях. В этой связи авторами были проведены исследования условий эксхалляции радона в районе западного склона горы Бештау, обращенного в сторону г. Лермонтова, как наименее подверженного техногенному воздействию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

На рис. 1 показана схема расположения района исследований. С геологической точки зрения группа магматических гор–“лакколитов” (Бештау, Машук, Бык, Верблюды и др.) является преобладающим структурным элементом территории Кавказских Минеральных Вод, определяющим ее геологические, гидрогеологические, геохимические и геоэкологические особенности. Гора Бештау – самое значительное по размерам и наиболее сложное по строению структурное магматическое образование в данном районе.

Абсолютная отметка основной вершины составляет 1401 м. В рельефе склонов Бештау четко выделяется пологая нижняя (или пьедестальная) и крутая верхняя части, граница между которыми проходит на абсолютных отметках 820–880 м (рис. 2). Верхнюю часть горы образует массив

бештаунитов – кислых субвулканических пород специфического состава, близкого к трахилипаритам. Бештаугорский интрузив представляет собой весьма сложное образование, состоящее из нескольких крупных магматических тел, каждое из которых дополнительно прорвано дайкообразными и телескопными телами. В целом это магматическое образование можно классифицировать как магматический диапир – пигмолит. Для этой части горы характерны значительная крутизна склонов и глубокий эрозионный срез.

Пьедестальная часть склонов сложена толщей осадочных отложений – майкопских глин, перекрытых обвальным-осыпным шлейфом, мощность которого меняется от первых сантиметров (местами полностью отсутствует) в верхней части пьедестала до 10 м и более у подножия. Шлейф представляет собой рыхлую массу с многочисленными обломками магматических пород разного размера от мелкого гравия до крупных глыб.

Массив Бештау рассечен сложной системой разломов и трещин. Выделяется Главный разлом меридионального простирания, а также система разломов и трещинных зон северо-восточного простирания, к которой приурочены жильные урановые руды бештаугорского месторождения [4, 7, 10].

Результаты предыдущих исследований в районе горы Бештау свидетельствуют о высокой радиоактивности пород, слагающих данный массив, а также о повышенном содержании радионуклидов уранового ряда в грунтовых, трещинно-жильных и шахтных водах. В ходе разведки и эксплуатации уранового месторождения в недрах горы было пройдено большое количество разведочных, эксплуатационных и технических штолен без последующей закладки шахтного пространства. В настоящее время устья штолен в большинстве случаев засыпаны или забетонированы. Система горных выработок располагается в основном в юго-западной и южной части горы и представляет собой 13 горизонтов (уровней) штолен и штреков, соединенных двумя вертикальными шахтами. Нижний горизонт пройден практически у подножия горы на абсолютной отметке 720 м, а самый верхний горизонт расположен на отметках более 1200 м. Подземные воды в шахтном пространстве сдренированы полностью до горизонта 720 м и разгружаются на поверхность через штольни нижнего горизонта №32 и №16, оставшиеся не засыпанными для возможности проведения контрольных измерений [1, 10].

В приповерхностной части массива развиты пресные грунтовые воды, разгружающиеся в виде многочисленных родников на склонах горы. В зонах трещиноватости магматического массива развиты радоновые подземные воды, формирующиеся за счет эманирования радия, оседающего

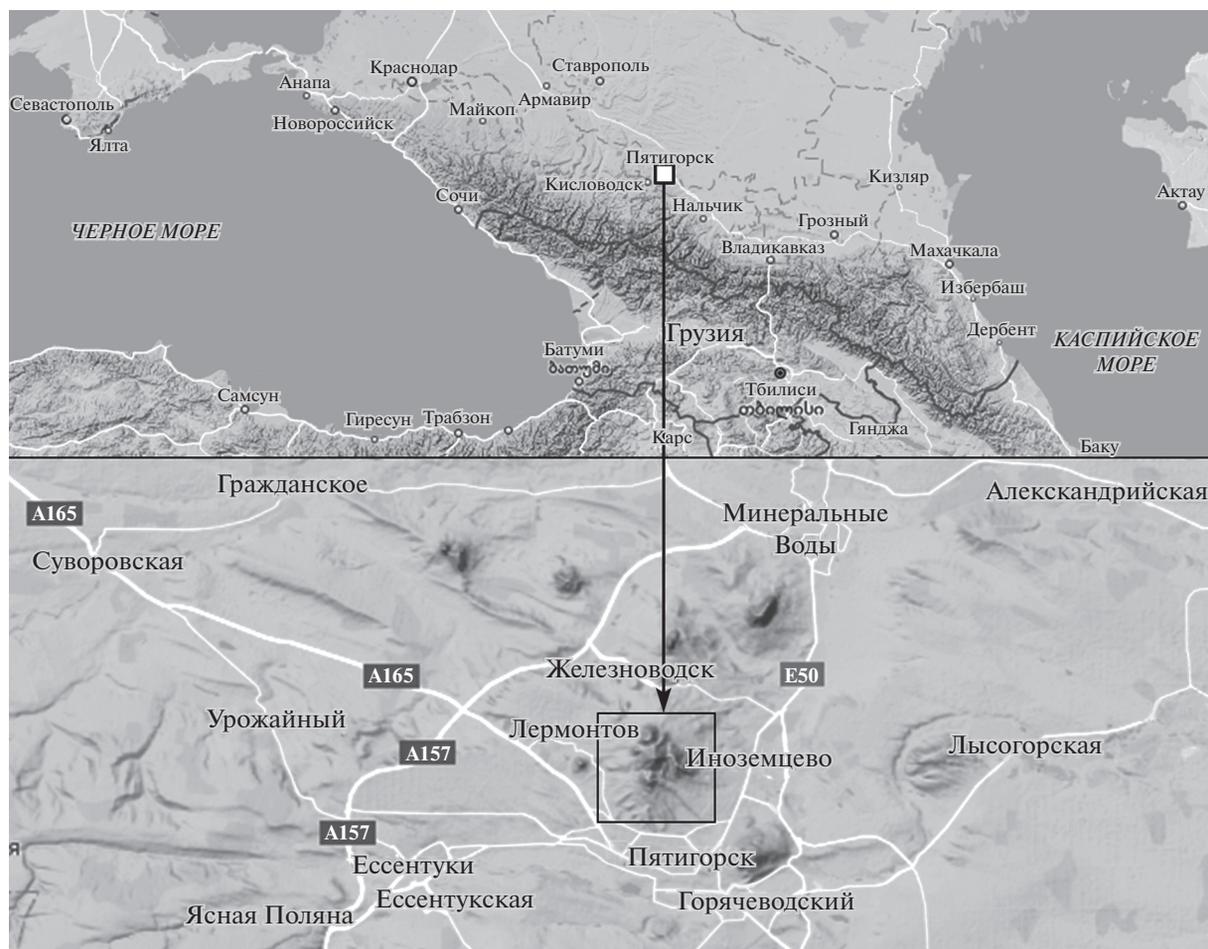


Рис. 1. Схема расположения района исследований.

на стенках водопроницаемых трещин в ураноносных зонах. Шахтные воды, разгружающиеся на дневную поверхность через незасыпанные штольни, характеризуются повышенными концентрациями урана и некоторых микроэлементов. Наиболее широкий спектр радиоактивных элементов, содержание которых превышает предельно допустимые концентрации в сотни раз, характерен для шахтных вод, разгружающихся через штольню № 16, а также некоторые родники в юго-западной части массива [10]. Как следствие, наиболее загрязненной природными радионуклидами в результате деятельности рудника является южная и юго-западная часть горы, в том числе территория, прилегающая к штольне № 16. Значения удельной активности урана и радия в донных отложениях у входа в штольню достигают 216 000 Бк/кг и более 1000 Бк/кг, соответственно, что позволяет классифицировать их как радиоактивные отходы [1].

Западный склон горы в меньшей степени был подвержен техногенному воздействию в ходе разработки рудника. Здесь расположены устья двух

периферических штолен №39 и №40 (горизонт с абсолютными отметками 850 м), также у подножия западного склона находится устье незасыпанной шт. №32. Основное влияние рудника на экосистему западного склона Бештау состояло в изменении уровней и режима подземных вод, а также в некотором изменении их химического состава [10]. Таким образом, анализ данных позволяет считать западный склон горы Бештау фоновым для данной местности.

Объем, виды, методы и средства измерений

Полевые исследования на западном склоне горы Бештау проводились в июне 2017 г. Были выполнены измерения по маршруту вдоль кольцевой бештаугорской дороги, проходящей примерно по границе между верхней и пьедестальной частью горы от восточной окраины г. Лермонтов до Монастырского озера. Схема расположения точек измерения представлена на рис. 3.

В каждой точке проводились измерения плотности потока радона с поверхности грунта, мощ-



Рис. 2. Вид на массив Бештау со стороны г. Лермонтова. В центре – основная вершина Бештау, несколько ниже Лохматый Курган, слева – Малый Бештау, справа – Два Брата. Хорошо видна верхняя часть массива с крутыми склонами и нижняя – пьедестальная пологая часть склона.

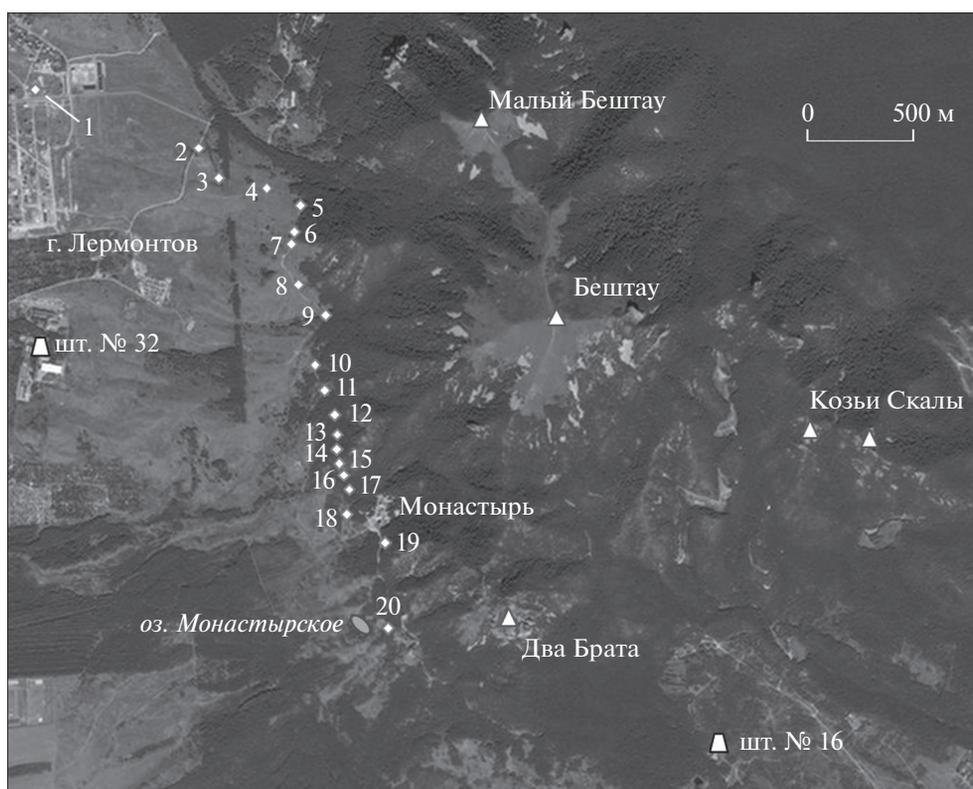


Рис. 3. Схема расположения точек измерения на горе Бештау.

ности AMBIENTНОГО эквивалента дозы γ -излучения, объемной активности и эквивалентной равновесной объемной активности радона в атмосферном воздухе. По ходу маршрута были отобраны пробы коренных пород – магматических образований (бештауниты) и осадочных от-

ложений (глины, мергели), слагающих эту часть Бештау в местах их выхода на дневную поверхность и пробы почвы. Всего отобрано 12 проб с последующим определением удельной активности радионуклидов γ -спектрометрическим методом в лабораторных условиях.

Определения мощности дозы γ -излучения были выполнены на высоте 0.1 м от поверхности почвы дозиметром гамма-излучения ДКГ-07 “Дрозд” с погрешностью около 15% (2σ). Измерения ОА и ЭРОА радона в атмосферном воздухе проводили с помощью радиометра радона аэрозольного РАА-3-01 “Альфа-АЭРО”. Прибор устанавливали на поверхность почвы или горной породы, время прокачки воздуха через фильтр составляло не менее 5 мин. Для измерений ППР использовали приборы измерительного комплекса мониторинга радона “Камера-01”. Накопительные камеры устанавливали на поверхность грунта в подготовленные лунки (рис. 4). Время экспонирования камер составляло от 4 до 8 час. Активность угля из накопительных камер была определена по дочерним продуктам распада радона на бета-радиометре комплекса “Камера” с погрешностью не более 20% (2σ).

Измерения удельной активности радионуклидов в пробах почв и горных пород проводили методом γ -спектрометрии с использованием комплексов “РАДЭК” и “Прогресс”, оснащенных сцинтилляционными детекторами NaI(Tl). Погрешность измерений удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в пробах почвы не превышала 30% (2σ). Минимальная измеряемая удельная активность составляла (Бк/кг): для ^{226}Ra – 8, для ^{232}Th – 5, для ^{40}K – 50. Сличение результатов измерений удельной активности радионуклидов в одинаковых пробах почвы, выполненное разными спектрометрами, показало хорошую сходимости в пределах погрешности измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты оценки фоновых значений показателей радонового риска

В табл. 1 приведены результаты измерений плотности потока радона (ППР) с поверхности грунтов, а также объемной активности (ОА) и эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в атмосферном воздухе, удельной активности радионуклидов в пробах почвы и горных пород, мощности амбиентного эквивалента дозы (МЭД) гамма-излучения.

По результатам проведенных измерений установлено, что в верхней части массива, сложенной магматическими породами – бештаунитами, эксхалация радона обладает резко повышенными значениями по сравнению с аналогичными показателями в нижней части массива, сложенной преимущественно майкопскими глинами и перекрытой осыпным шлейфом. Почвы, характерные для верхней части склона Бештау, минеральную часть которых составляют продукты разрушения бештаунита, имеют удельную активность радия-226 в диапазоне 120–160 Бк/кг, а значения эф-



Рис. 4. Накопительная камера НК-32 для измерения плотности потока радона, установленная в подготовленную лунку.

фективной удельной активности естественных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$) составляют 490–625 Бк/кг. В бештаунитах удельная активность радия достигает еще больших значений от 151 до 280 Бк/кг. Значения ППР с поверхности почвы, содержащей продукты разрушения бештаунита, лежат в интервале от 337 до 1670 мБк/м²с. С поверхности выветрелого бештаунитового массива в местах его естественных обнажений (т.7, т.12 и т.15 на рис. 3) значения ППР находятся в диапазоне 2750–3370 мБк/м²с. Среднее значение ППР в верхней части склона г. Бештау без учета радоновой аномалии составило 1438 мБк/м²с.

В пьедестальной части склона радиоактивность почв и коренных пород несколько ниже. Значение удельной активности ^{226}Ra в майкопских глинах (т.1), составило 182 ± 34 Бк/кг, в черных жирных почвах, покрывающих нижнюю пьедестальную часть склона, значения удельной активности радия составили 50–70 Бк/кг. Значения ППР в нижней части склона лежат в интервале от 136 до 419 мБк/м²с, в среднем 295 мБк/м²с.

В граничной зоне (т.6 и т.8) между магматическими породами основного массива Бештау и осадочными отложениями пьедестальной части присутствуют локальные обнажения мергелей (т.6). Как и большинство карбонатных пород, мергели характеризуются низкой радиоактивностью. Удельная активность радия-226 в мергеле, обнажающемся в выемке кольцевой дороги в т. 6, составила 44 ± 10 Бк/кг, ППР в т.6 и т.8 составили 58 ± 11 и 75 ± 14 мБк/м²с соответственно. Таким образом, выходам карбонатных пород соответствуют наименьшие значения удельной активности радия-226 и ППР.

Обобщение результатов измерений ППР и других радиационных характеристик почв и горных пород, слагающих западный склон горы Бештау, представлено в табл. 2. Диапазон значений характеристик, приведенный в таблице, целесо-

Таблица 1. Значения показателей радиационной обстановки (гора Бештау)

№ точки	Радон в атмосферном воздухе, Бк/м ³		Плотность потока радона, мБк/м ² с	Удельная активность радионуклидов в почвах и горных породах, Бк/кг			МЭД, мкЗв/ч	Примечания
	ОА ± Δ	ЭРОА ± Δ		ППР ± Δ	²²⁶ Ra ± Δ	²³² Th ± Δ		
1	8 ± 7	6 ± 5	419 ± 64	182 ± 34	60 ± 15	1066 ± 180	0.21	глина
2	<27	<7	398 ± 61	—	—	—	0.27	почва
3	9 ± 8	3 ± 3	226 ± 35	57 ± 10	88 ± 10	745 ± 81	0.28	почва
4	<24	<5	136 ± 22	62 ± 18	104 ± 23	790 ± 136	0.21	почва
5	4 ± 3	2 ± 2	573 ± 87	—	—	—	0.20	почва
6	<6	<6	58 ± 11	44 ± 10	<12	85 ± 30	0.12	мергель
7	3 ± 3	2 ± 2	3370 ± 500	280 ± 50	272 ± 50	1725 ± 457	0.42	бештаунит
8	<5	<5	75 ± 14	—	—	—	0.18	почва
9	<17	<6	485 ± 74	—	—	—	0.31	почва
10	—	—	843 ± 120	120 ± 30	220 ± 25	980 ± 99	0.31	почва
11	<13	<10	783 ± 120	—	—	—	0.30	почва
12	9 ± 7	12 ± 10	3360 ± 500	214 ± 13	179 ± 18	979 ± 93	0.38	бештаунит
13	<18	<6	972 ± 140	—	—	—	0.32	почва
14	4062 ± 1800	99 ± 30	15000 ± 2300	156 ± 32	251 ± 42	1586 ± 393	0.45	почва
15	10 ± 5	11 ± 5	2750 ± 390	203 ± 38	151 ± 15	1538 ± 210	0.50	бештаунит
16	62 ± 29	8 ± 4	1210 ± 180	160 ± 34	169 ± 23	1221 ± 190	0.49	почва
17	—	—	1670 ± 215	—	—	—	0.40	почва
18	—	—	897 ± 140	—	—	—	0.27	почва
19	11 ± 6	9 ± 5	337 ± 51	151 ± 24	196 ± 20	1231 ± 140	0.43	почва
20	6 ± 5	5 ± 5	—	102 ± 17	71 ± 9	488 ± 69	0.29	почва

Таблица 2. Обобщенные фоновые показатели радиационной обстановки на западном склоне горы Бештау

Объект	Плотность потока радона, мБк/м ² с	Объемная активность радона в воздухе, Бк/м ³	Удельная активность радия-226, Бк/кг	Эффективная удельная активность радионуклидов, Бк/кг	МЭД гамма-излучения, мкЗв/ч
Верхняя часть склона *	$\frac{1438 (1104)**}{337-3370}$	от 3 до 62	$\frac{183 (53)}{120-280}$	$\frac{570 (107)}{490-789}$	$\frac{0.37 (0.09)}{0.20-0.50}$
Пьедестальная часть склона	$\frac{295 (137)}{136-419}$	от 6 до <27	$\frac{100 (71)}{57-182}$	$\frac{287 (61)}{238-356}$	$\frac{0.24 (0.04)}{0.21-0.28}$
Выходы мергелей	58–75	<6	44	67	0.12–0.18

* за исключением радоновой аномалии

** в числителе – среднее значение (стандартное отклонение), в знаменателе – диапазон.

образно считать фоновым для данной территории. На территории Бештау наблюдаются достаточно высокие фоновые значения радиационных показателей по сравнению со значениями, характерными для других территорий России.

Характеризуя условия эксхалляции радона в пределах горного массива Бештау, можно сделать вывод, что на большей части исследуемого профиля ППР в целом коррелирует с удельной активностью радия в приповерхностном субстрате,

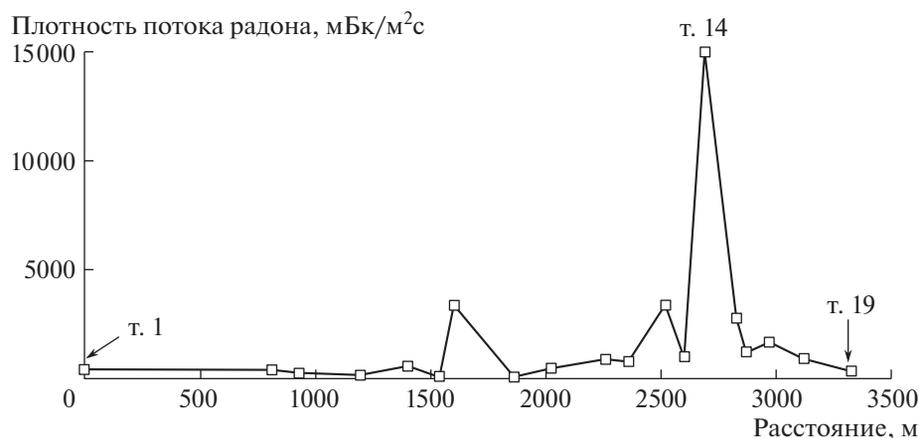


Рис. 5. Результаты измерения плотности потока радона по профилю вдоль западного склона горы Бештау (по Бештаугорской кольцевой дороге).

т.е., эксхалляция радона определяется в основном эманированием горных пород и почв.

Радоновая аномалия на Бештау

В верхней части склона горы Бештау, примерно в 500 м севернее монастыря (абс. высота 849 м), была обнаружена аномальная зона — значение ОА радона в **атмосферном воздухе** превышало 4000 Бк/м^3 (т.14). В остальных точках профиля значения ОА радона в атмосферном воздухе составляли от <8 до $62 \pm 29 \text{ Бк/м}^3$. Концентрация радона в открытом воздухе в аномальной точке более чем в 400 раз превышала усредненные среднемировые значения. Аномалия приурочена к зоне временной разгрузки подземных вод. В районе аномалии для почв характерна повышенная проницаемость, почва очень рыхлая, влажная, теплая. Вода высачивалась из склона над дорогой, образуя лужи в дорожных колеях. В районе аномальной точки измерения ОА и ЭРОА радона выполнялись дважды. В первый раз измерения проводили 14.06.2017 г. непосредственно на обочине дороги. Было зафиксировано значение ОА радона в атмосферном воздухе $1500 \pm 640 \text{ Бк/м}^3$ (ЭРОА радона составило $40 \pm 15 \text{ Бк/м}^3$). Повторное измерение было проведено 18.06.2017 г. на 1,5 м выше обочины в месте наибольшего высачивания подземных вод. Объемная активность радона составила $4062 \pm 1800 \text{ Бк/м}^3$ (ЭРОА радона — $99 \pm 30 \text{ Бк/м}^3$).

Результаты измерений плотности потока радона по профилю представлены на рис. 5. Значения ППР в аномальной точке (т.14) достигают $15000 \pm 2300 \text{ мБк/м}^2\text{с}$, что в 10 раз превышает фоновый уровень, определенный для верхней части склона Бештау.

Для уточнения результатов, полученных в аномальной точке (т.14), вдоль дороги были проведены дополнительные измерения ППР с поверхности грунта по короткому профилю, включающему 5 точек измерения в окрестности т.14, расположенных на расстоянии 7–12 м друг от друга. Общая длина профиля составила 50 м. Значения плотности потока радона по профилю приведены в табл. 3. Нумерация дополнительных точек идет с юга на север (со стороны монастыря по направлению к г. Лермонтов). Измерения показали, что зона аномальной разгрузки радона, где значения плотности потока радона в 10 раз превышают местный фон, узко локализована в районе точек 14 и 14-2, расстояние между которыми составляет 7 м. Общая ширина аномальной зоны не превышает 30 м и совпадает с зоной разгрузки подземных вод.

В остальных точках дополнительного профиля ППР в целом соответствует фоновым значениям, характерным для склонов горы Бештау. Удельная активность радия в почве в районе аномалии составила $156 \pm 32 \text{ Бк/кг}$. Это значение характерно для серых лесных почв верхней части западного склона горы Бештау. Значения МЭД гамма-излу-

Таблица 3. Плотность потока радона в аномальной зоне (гора Бештау)

№ точки	Расстояние от аномалии (т.14), м	МЭД гамма-излучения, мкЗв/ч	Плотность потока радона, мБк/м ² с
т.14-1	27	0.34	1150 ± 171
т.14-2	7	0.40	12700 ± 1900
т.14	0	0.45	15000 ± 2300
т.14-3	12	0.37	747 ± 110
т.14-4	23	0.36	3900 ± 550

чения – 45 мкЗв/ч. Следует отметить, что в аномальной точке при измерении МЭД гамма-излучения дозиметр “Дрозд” через каждые 2–3 мин сбрасывал набор и начинал измерения заново, подавая при этом короткий звуковой сигнал, что повторялось и 14.06.2017 г., и 18.06.2017 г. Такие автоматические запуски измерений происходят при изменении МЭД, превышающем статистический разброс, как это указано в инструкции к дозиметру. Отсюда следует, что в аномальной зоне поле гамма-излучения крайне неоднородно, что может быть связано с неравномерной разгрузкой радона.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По литературным источникам известно достаточно много природных радоновых аномалий, не связанных с урановым производством. Эти аномалии характеризуются хоть и не столь значительными, как приведенные нами, но относительно высокими значениями ППР с поверхности грунта и концентрации радона в грунтовом газе, превышающими местный фон в 10 и более раз. В основном такие зоны были выявлены в ходе исследований геологических аспектов оценки радонового риска, а также в ходе геодинимического мониторинга [5, 6, 15, 16, 19, 22]. Аномалии фиксируются в основном в горных районах, но также встречаются и на равнинах, например, на территории Москвы [5]. Это обычно пространственно узко локализованные участки, в которых радоновая обстановка, по общему мнению специалистов, формируется за счет переноса радона с конвективными газовыми потоками в проницаемых зонах. Радоновый риск в таких зонах не связан напрямую с общепринятыми такими показателями радоноопасности, как концентрация радона в грунтовом газе и содержанием радия в грунтах, что существенно затрудняет оценку радоноопасности. Проблема еще более осложняется в связи с высокоамплитудными сезонными вариациями радона, наблюдаемыми во всех упомянутых аномальных зонах [6, 15, 16, 19, 22]. Вместе с тем, несмотря на узкую локализацию аномальных зон, зарегистрированные в них чрезвычайно высокие значения параметров радонового поля заставляют считать эти зоны наиболее значимым фактором радоноопасности территорий.

Причины формирования подобных значительных радоновых аномалий являются предметом дискуссии. Так, в работе [19] формирование радоновой аномалии объясняется сезонной циркуляцией конвективных воздушных потоков в приповерхностном слое хорошо проницаемых глициальных отложений за счет перепада температур между массивом и атмосферой, при этом циркулирующий воздух обогащается радоном по мере его движения в грунтовом массиве. В рабо-

тах [15, 22] в качестве основной причины выявленных радоновых аномалий предполагается разгрузка глубинных мантийных газовых потоков в зоне влияния активных разломов. В исследовании [16] ведущая роль в формировании радоновой аномалии отводится переносу радона с потоком грунтовых вод, обогащающихся радоном по мере движения вод через массив от областей питания к зоне разгрузки. Т.е. в разных работах схожим по своей сути явлениям даются разные, порой противоречивые объяснения, что позволяет считать проблему генезиса радоновых аномалий далекой от своего решения.

Анализ литературы показывает, что аномалия радона, выявленная нами на склоне горы Бештау, – одна из наиболее мощных в мире. В отечественной и мировой научной литературе отсутствуют известные нам сообщения о подобных радоновых аномалиях в природной среде. Значения плотности потока радона более 10 000 мБк/м²с регистрировались на поверхности хвостохранилищ урановых руд [13, 17], где высокий уровень эксхалляции радона объясняется значительной удельной активностью радия в хвостах (от тысяч до сотен тысяч Бк/кг). Причем ОА радона в атмосферном воздухе на данных объектах находилась на уровне 50–200 Бк/м³, что на порядок ниже значений, зарегистрированных на склонах Бештау. Кроме того, в восточной Германии в ходе рекультивации горно-обогачительного предприятия “WISMUT” на локальных участках у подножия отвалов были зарегистрированы высокие значения ППР – до 20000 мБк/м²с, и ОА радона в открытом атмосферном воздухе – до 4500 Бк/м³, что сопоставимо с полученными результатами [18]. Данная аномалия объяснена не столько высокими значениями содержания урана и радия в отвале, сколько сезонной циркуляцией воздуха в теле отвала с формированием в летнее время нисходящих потоков относительно холодного воздуха, разгружающегося у подножия отвала (механизм аналогичен предлагаемому в работе [19] для природных условий).

Источником радоновой аномалии на склоне Бештау, очевидно, не может быть эманирование горных пород, непосредственно выходящих на поверхность в аномальной зоне, так как удельная активность радия в отобранной пробе не превышает местного фона и не может обеспечить столь высокие значения ППР и ОА радона в атмосферном воздухе. Скорее всего, в данном случае мы наблюдаем разгрузку радона из более глубоких частей горного массива с мощными конвективными газовыми потоками. Источником радона могут выступать породы с урановой минерализацией и, возможно, не до конца выработанные урановые руды в их естественном залегании, находящиеся в недрах горы. Примерно в 500 м юго-

восточнее выявленной радоновой аномалии расположена система рудных ураноносных жил “Скала” [4, 10]. В этой связи выявленная радоновая аномалия может быть связана с техногенными причинами – разгрузкой радоновых вод (и/или конвективных воздушных потоков, обогащенных радоном) из засыпанных технологических отверстий заброшенных подземных выработок. Отметим, однако, что в аномальной точке отсутствуют признаки каких-либо техногенных объектов, связанных с урановым рудником (устья штолен, выходы вентиляционных отверстий и т.п.). Вместе с тем, аномалия может формироваться и за счет природных процессов разгрузки радоновых вод и/или воздушных потоков, обогащенных радоном, в системе зон трещиноватости и разломов, рассекающих массив Бештау, в том числе и рудные жилы.

Однако, наиболее вероятно, сочетание этих факторов, что может осуществляться, в том случае, когда система природных тектонических трещин пересекает выработанные в массиве заброшенные штольни и дренирует (вентилюет) их. В природных разломах и трещинных зонах, вероятно, соединяющихся с шахтным пространством, возможно формирование сезонной циркуляции воздуха за счет перепада температур между горным массивом и атмосферой. Для получения более полных данных о природе выявленной радоновой аномалии необходимы дополнительные исследования, включая радоновый мониторинг, в том числе, разгружающихся в этой зоне подземных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследуемая территория в целом по значениям плотности потока радона может быть отнесена к потенциально радоноопасной, что связано с повышенными содержаниями радионуклидов уранового ряда в горных породах и почвах региона. Вместе с тем, на склонах горы Бештау выявлена аномальная зона, где плотность потока радона достигает значения 15 000 мБк/м²с, что на порядок выше местного фона. Столь высокие уровни эксхалации радона приводят к формированию аномально высокой концентрации радона в атмосферном воздухе, превышающей 4000 Бк/м³. Формирование указанной аномальной радоновой зоны возможно связано с конвективным поступлением радона из горного массива с разгружающимися воздушными потоками или подземными водами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников ЦГиЭ №101 ФМБА России в г. Лермонтове, Н.С. Финьков-

скую, О.О. Зезюлину и Ю.М. Зезюлина за помощь в проведении исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ФМБА России. На заключительном этапе исследования поддержаны РФФИ, проект № 18-05-00674-“а”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С. Радиозоологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО “Алмаз” // Радиация и риск. 2009. № 4. С. 73–81.
2. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: от фундаментальных исследований к практике регулирования. М: Изд-во ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. 2016. 432 с.
3. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Изд-во “Перо”, 2016. 394 с.
4. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мизута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: Изд-во ВИМС, 2010. 850 с.
5. Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Маренный А.М., Макеев В.М. Радоновое поле Москвы // Геозоология. 2013. № 2. С. 172–187.
6. Микляев П.С., Цапалов А.А., Маренный А.М., Лопатин М.Н., Мясников А.А., Фарафутдинов В.Т., Петрова Т.Б. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Ч. 7. Результаты мониторинга радонового поля в зоне активного тектонического разлома в Байкальской рифтовой зоне // АНРИ. 2016. № 3. С. 19–34.
7. Милановский, Е.Е. Геологическое строение Кавказа / Е. Е. Милановский, В. Е. Хаин. М.: МГУ, 1963. 356 с.
8. Романович И.К., Стамат И.П., Санжарова Н.И., Панов А.В. Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Ч. 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации // Радиационная гигиена. 2016. № 4. С. 6–15.
9. Сидякин П.А., Янукян Э.Г., Фоменко Н.А., Вахилевич Н.В. Формирование уровней облучения населения региона Кавказских Минеральных Вод за счет радиоактивности горных пород // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. № 1. С. 66–70.
10. Соколова О.В., Королев И.Б., Поздняков С.П., Самарцев В.Н. Прогноз изменения гидродинамических условий горы Бештау вследствие реабилитации объекта “Алмаз” // Разведка и охрана недр. 2013. № 6. С. 41–47.
11. Bossew P. Determination of radon prone areas by optimized binary classification // J. Environ. Radioact. 2014. 129. P. 121–132.

12. *Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J. M., et al.* Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // *British Medical J.* 2005. V. 330. P. 223–227.
13. *Gnoni G., Palacios M.* Measurements of radon exhalation flux and atmospheric radon in uranium mining and progressing sites // *Sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate and air quality studies: proceedings of a technical meeting held in Vienna, organized by the International Atomic Energy and co-sponsored by the World Meteorological Organization.* Vienna: IAEA, 2011. P. 29–38.
14. *Gruber V., Bossew P., De Cort M. and Tollefsen T.* The European map of the geogenic radon potential // *J. Radiol. Prot.* 2013. V. 33. P. 51–60.
15. *Moreno V., Bach J., Font Ll., Baixeras C., Zarroca M., Linares R., Roqué C.* Soil radon dynamics in the Amer fault zone: An example of very high seasonal variations // *J. Environ. Radioact.* 2016. 151. P. 293–303.
16. *Perrier F., Richon P., Sabroux J-C.* Temporal variations of radon concentration in the saturated soil of Alpine grassland: The role of groundwater flow // *Science of The Total Environment.* 2009. 407. P. 2361–2371.
17. *Schläger M., Murtazaev Kh., Rakhmatuloev B., Zoriy P., Heuel-Fabianek B.* Radon exhalation of the uranium tailings dump Digmai, Tajikistan // *Fourth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD 4, May 23-27, 2016, Niš, Serbia. Book of Abstracts.* 2016. P. 487.
18. *Schmidt P.* Proof of the Radiological Remediation Success at Former Uranium Mining and Milling Sites (WISMUT sites) in Germany // *4th European IRPA Congress, June 23–27, 2014, Geneva, Switzerland.*
19. *Sundal A.V., Valen V., Soldal O., Strand T.* The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments // *Science of The Total Environment.* 2008. 389. P. 418–428.
20. *Tollefsen T., Cinelli G., De Cort M.* Special issue of the *Journal of Environmental Radioactivity: Geogenic radiation and its potential use for developing the geogenic radon map – Foreword* // *J. Environ. Radioact.* 2017. 166. P. 209.
21. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective/* by Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun (ed.). World Health Organization. 2009. 94 p.
22. *Zmazek B., Živčič M., Vaupotič, Bidovec M., Poljak M., Kobal I.* Soil radon monitoring in the Krško Basin, Slovenia // *Appl. Radiat. Isot.* 2002. 56. P. 649–657.

RADON EXHALATION RATE ON THE WESTERN SLOPE OF BESHTAU MOUNTAIN, CAUCASIAN MINERAL WATERS REGION

P. S. Miklyaev^{a,b,#}, T. B. Petrova^{c,##}, A. M. Marenniy^{b,###}, N. A. Nefedov^b, T. V. Ostapchuk^{d,####}, D. V. Shchitov^e, P. A. Sidiyakin^{e,#####}, and M. A. Murzabekov^e

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulansky per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical and Biological Agency of Russia, Schukinskaya ul. 40, Moscow, 123103 Russia*

^c*Radiochemical Department, Chemistry Faculty, Moscow State University, Leninskie Gory 1, str. 10, Moscow, 119991 Russia*

^d*Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Medical and Biological Agency of Russia, ul. Lenina 26, Lermontov, Stavropol region, 357340 Russia*

^e*North Caucasus Federal University, Faculty of Engineering, Department of Construction, ul. Ermolova 46a, Pyatigorsk, Stavropol region, 357500 Russia*

[#]*E-mail: peterm7@inbox.ru*

^{##}*E-mail: tbp111@inbox.ru*

^{###}*E-mail: amarenniy@yandex.ru*

^{####}*E-mail: cge101@fmbamail.ru*

^{#####}*E-mail: sidiyakin_74@mail.ru*

The measurements on radon activity concentration in the air and radon exhalation rate from the soil surface were performed in the area of Beshtau Mt. The aim of this research was to determine the background levels of environmental radiation in this area under natural conditions, which are the least affected by uranium mining. The mean radon exhalation rate obtained for the areas composed by clay is 295 mBq/m²s. The average value of radon exhalation rate from the surface of magmatic rock reached 1438 mBq/m²s. It is established that high values of radon exhalation are caused by high content of uranium and radium in soils and rocks. In addition, the local spot with abnormally high radon levels was discovered. The radon exhalation rate and radon activity concentration in the air in the abnormal zone reach 15 000 mBq/m²s and 4000 Bq/m³, respectively. Abnormal levels of radon exhalation can be explained by the convective transfer of radon from the mountain interior.

Key words: *radon, radon exhalation rate, abnormal radon flux density, radon activity concentration, uranium mine.*

REFERENCES

- Karpenko, E.I., Sanzharova, N.I., Spiridonov, S.I., Serebryakov, I.S. Radioekologicheskaya obstanovka v rajone razmeshcheniya byvshego uranodobyvayushchego predpriyatiya LPO "Almaz" [Radioecological situation in the area of location of the former uranium mining enterprise "Almaz"]. *Radiatsiya i risk*. 2009. № 4. S. 73–81. (In Russ.)
- Kiselev, S.M., Zhukovskii, M.V., Stamat, I.P., Yarmoshenko, I.V. Radon: ot fundamental'nykh issledovaniy k praktike regulirovaniya [Radon: from fundamental research to regulatory practice]. — M: Izd-vo FGBU GNTS FMBTS im. A.I. Burnazyana FMBA Rossii. 2016. — 432 s (In Russ.).
- Marennyy, A.M., Tsapalov, A.A., Miklyaev, P.S., Petrova, T.B. Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polja v geologicheskoy srede [Regularities of radon behavior in the geological environment], Moscow, "Pero" Publ., 2016. 394 p. (In Russ.).
- Mashkovcev, G.A., Konstantinov, A.K., Miguta, A.K., Shumilin, M.V., Shchetochkin, V.N. Uran rossijskikh neдр [Uranium of Russian mineral resources]. M.: Izd-vo VIMS, 2010. 850 s. (In Russ.).
- Miklyaev, P.S., Makarov, V.I., Dorozhko, A.L., Petrova, T.B., Marennyy, M.A., Marennyy, A.M., Makeev, V.M. Radon-ovoe pole Moskvy [Radon in Moscow] *Geojekologija*. 2013, no 2, p.p. 172–187. (In Russ.).
- Miklyaev, P.S., Tsapalov, A.A., Marennyy, A.M., Lopatin, M.N., Myasnikov, A.A., Farafutdinov, V.T., Petrova, T.B. Kompleksnyye monitoringovyye issledovaniya formirovaniya radonovykh polej gruntovykh massivov. Chast' 7 — Rezul'taty monitoringa radonovogo polja v zone aktivnogo tektonicheskogo razloma v Bajkal'skoj riftovoj zone [A comprehensive monitoring study of the radon in soil. Part 7 — the Results of monitoring of radon in the zone of active tectonic fault in the Baikal rift zone] *ANRI*. 2016, no 3, p.p.19–34. (In Russ.).
- Milanovskij, E. E. Geologicheskoe stroenie Kavkaza [The geological structure of the Caucasus]/E. E. Milanovskij, V. E. KHain. M.: Izd. MGU, 1963. S. 356. (In Russ.)
- Romanovich, I.K., Stamat, I.P., Sanzharova, N.I., Panov, A.V. Kriterii rehabilitatsii ob'ektov i territorij, zagryaznennykh radionuklidami v rezul'tate proshloj deyatelnosti: Chast' 1. Vybór pokazatelej dlya obosnovaniya kriteriev rehabilitatsii [Criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities: Part 1. The choice of indicators for justification of the criteria of rehabilitation]. *Radiacionnaya gigiena*. 2016. № 4. S. 6–15. (In Russ.)
- Sidyakin, P.A., Yanukyan, Eh.G., Fomenko, N.A., Vakhilevich, N.V. Formirovanie urovnej oblucheniya naseleniya regiona Kavkazskikh Mineral'nykh Vod za schet radioaktivnosti gornyx porod [Formation of levels of irradiation of the population of the region of Caucasian Mineral Waters due to radioactivity of rocks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*. 2016. № 1. S. 66–70 (in Russ.).
- Sokolova, O.V., Korolev, I.B., Pozdnyakov, S.P., Samarcev, V.N. Prognoz izmeneniya gidrodinamicheskikh uslovij gory Beshtau vsledstvie rehabilitatsii ob'ekta "Almaz" [Forecast of changes in hydrodynamic conditions of Beshtau mountain due to the rehabilitation of the object "Almaz"]. *Razvedka i ohrana neдр*. 2013. № 6. S. 41–47. (In Russ.)
- Bossey, P. Determination of radon prone areas by optimized binary classification. *J. Environ. Radioact.* 2014. 129. P. 121–132.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical J.*, 2005, vol. 330, pp. 223–227.
- Gnoni, G., Palacios, M. Measurements of radon exhalation flux and atmospheric radon in uranium mining and progressing sites. Sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate and air quality studies: proceedings of a technical meeting held in Vienna/ organized by the International Atomic Energy and co-sponsored by the World Meteorological Organization. Vienna: IAEA, 2011, pp. 29–38.
- Gruber, V., Bossey, P., De Cort, M. and Tollefsen, T. The European map of the geogenic radon potential. *J. Radiol. Prot.* 2013. V. 33. P. 51–60.
- Moreno, V., Bach, J., Font, Ll., Baixeras, C., Zarroca, M., Linares, R., C. Roqué. Soil radon dynamics in the Amer fault zone: An example of very high seasonal variations. *J. Environ. Radioact.* 2016. 151. P. 293–303.
- Perrier, F., Richon, P., Sabroux, J-C. Temporal variations of radon concentration in the saturated soil of Alpine grassland: The role of groundwater flow. *Science of The Total Environment*. 2009. 407. P. 2361–2371.
- Schläger, M., Murtazaev, Kh., Rakhmatuloev, B., Zoriy, P., Heuel-Fabianek, B. Radon exhalation of the uranium tailings dump Digmai, Tajikistan. Fourth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD 4, May 23–27, 2016, Niš, Serbia / Book of Abstracts. 2016. P. 487.
- Schmidt, P. Proof of the Radiological Remediation Success at Former Uranium Mining and Milling Sites (WISMUT sites) in Germany. 4th European IRPA Congress, June 23–27, 2014, Geneve, Switzerland.
- Sundal, A. V., Valen, V., Soldal, O., Strand T. The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. *Science of The Total Environment*. 2008. 389. P. 418–428.
- Tollefsen, T., Cinelli, G., De Cort, M. Special issue of the Journal of Environmental Radioactivity: Geogenic radiation and its potential use for developing the geogenic radon map — Foreword. *J. Environ. Radioact.* 2017. 166. P. 209.
- WHO handbook on indoor radon: a public health perspective/ by Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun (ed.). World Health Organization. 2009. 94 p.
- Zmazek, B., Živčić, M., Vaupotič, Bidovec, M., Poljak, M., Kobal, I. Soil radon monitoring in the Krško Basin, Slovenia. *Appl. Radiat. Isot.* 2002. 56. P. 649–657.