

О генезисе радоновых аномалий в зонах тектонических разломов

В результате почти трехлетнего цикла наблюдений, проводимых в зоне разлома в районе магматического массива Бештау (Кавказские Минеральные Воды), зарегистрированы аномальные высокоамплитудные сезонные колебания плотности потока радона, характеризующиеся максимумами летом и минимумами зимой. Летние значения плотности потока радона достигали $23800 \text{ мБк}/(\text{м}^2\text{с})$, что в 50 раз превышает фоновые значения, характерные для данной местности. Зимой поток радона снижался до $40 \text{ мБк}/(\text{м}^2\text{с})$, что почти в 10 раз ниже фона. Плотность потока радона в аномальной зоне проявляет тесную прямую корреляцию с температурой атмосферного воздуха. Резкий рост уровней радона весной и падение осенью приурочены к моментам, когда температура атмосферного воздуха становится, соответственно, выше и ниже температуры горного массива. Полученные данные позволяют предположить, что формирование сезонных радоновых аномалий в зонах разломов обусловлено циркуляцией атмосферного воздуха в проницаемых зонах горного массива, возникающей за счет перепада температур между горным массивом и атмосферой.

Ключевые слова:

радон, плотность потока радона, тектонический разлом, сезонные вариации радона, конвективный перенос.

**П.С.Микляев^{1,3}, Т.Б.Петрова²,
А.М.Маренный³,
Д.В.Щитов⁴, П.А.Сидякин⁴,
М.А.Мурзабеков⁴**

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва

² МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра радиохимии, г. Москва

³ ФГУП НТЦ Радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, г. Москва

⁴ Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорский филиал, инженерный ф-т, кафедра строительства, г. Пятигорск

Проблема генезиса радоновых аномалий в зонах разломов

В настоящее время все более актуальной становится задача выявления и картирования зон потенциального радонового риска, связанных с повышенным выделением радона из геологической среды [1-3]. Процессы выделения радона в поры и трещины горных пород, его перенос в геологической среде и эксхалация с поверхности земли активно исследуются во всем мире. Традиционно источниками повышенного выделения радона считаются горные породы и рыхлые отложения с повышенными концентрациями урана и радия, а также активные тектонические разломы и геодинамически активные зоны, характеризующиеся повышенной проницаемостью геологической среды [4].

Зоны разломов представляют собой сложные системы разновозрастных, разноранговых и разномасштабных нарушений среды, характеризующихся различной степенью современной активности тектонических движений, изменчивым полем температур и давлений. Крайне неоднородный состав и свойства заполнителя трещин обуславливает неоднородность флюидной проницаемости разломных зон. Все это вместе определяет существенную пространственно-временную вариабельность радонового поля в зонах тектонических разломов, что осложняет изучение процессов миграции газов в таких зонах. В настоящее время исследования эксхалляции радона в активных разломах широко распространены во всем мире, как в целях картирования областей повышенного радонового риска, так и в связи с широким спектром геофизических и геодинамических задач [5-19]. Предполагается, что изменения напряженно-деформируемого состояния земной коры, вызванные высвобождением сейсмической энергии, могут приводить к миграции глубинных флюидов вверх, вдоль трещинных зон, являющихся, как полагают, каналами глубинной дегазации земной коры [5,9,10,14]. Общепринято мнение, что радоновые аномалии, регистрируемые на поверхности земли в зонах тектонических разломов, обусловлены относительно быстрым объемным переносом газов через трещины из более глубоких областей, обогащенных ураном и радием [19]. Действительно, анализ результатов многочисленных эманационных съемок показывает, что в зонах разломов часто регистрируются очень мощные радоновые аномалии, объяснить которые только за счет распада радия, содержащегося в приповерхностных горных породах, не представляется возможным, что заставляет предполагать наличие глубинных источников радона. Вместе с тем, учитывая малый период полураспада радона, его миграция к поверхности со значительных

глубин возможна только при весьма высоких скоростях переноса газов в геологической среде, порядка 10–100 м/сут. Эти значения на один–два порядка превышают известные из экспериментов скорости переноса газов в ненарушенных горных породах [5,20]. Для объяснения столь значительных скоростей переноса необходимо наличие мощной движущей силы, заставляющей перемещаться газовый поток. Между тем, природа сил, обуславливающих быстрый перенос глубинных газов в зонах разломов, не очевидна и разными авторами представляется по-разному. Выдвигаются различные гипотезы, такие, например, как гипотеза «флюидодинамических зон» [8], «супердиффузии радона во фрактальной среде» [21] или «пузырькового» транспорта радона [22]. Однако все они основываются на умозрительных гипотетических построениях, чаще всего, не поддающихся экспериментальной проверке.

В последние два десятилетия, с развитием методов непрерывной регистрации радона в геологической среде, появились результаты долгосрочных мониторинговых измерений радона в зонах разломов [8,13,23-28]. Полученные временные ряды показывают, что в зонах разломов часто регистрируются очень четко выраженные и высокоамплитудные сезонные вариации радонового поля, характеризующиеся, как правило, крайне высокими значениями летом и низкими зимой. Хотя иногда отмечается и обратный характер сезонных колебаний [8,27]. Важно отметить, что во всех случаях регистрируется четкая положительная корреляция между концентрацией радона в почвенном газе и температурой воздуха. В некоторых работах отмечается, что падение уровней радона осенью и рост весной связаны с инверсией направления температурного градиента между горным массивом и атмосферой [23-26].

Основным фактором, обуславливающим снижение концентраций радона в зимнее

время, традиционно считается уменьшение проницаемости трещин, препятствующее поступлению газов из глубинных зон разлома. Так, в работе [8] предполагается прохождение в земной коре т. н. «геодеформационных волн сезонной периодичности» – гипотетических сейсмических волн, возможно, приливной природы, приводящих к разуплотнению пород летом и схлопыванию трещин зимой. Более распространена точка зрения, согласно которой сезонные колебания радона в зонах разломов связаны с прекращением поступления глубинных газов в зимний период за счет снижения проницаемости среды при заполнении трещин водой [26,28]. Однако эти предположения не объясняют наблюдаемой тесной корреляции уровней радона с температурой воздуха, а также связи сезонных колебаний радона с инверсией перепада температур между горным массивом и атмосферой.

Вместе с тем, исследования, проведенные нами ранее в Байкальской рифтовой зоне [23,24], показали, что сезонные вариации радонового поля в зоне разлома не связаны с изменением проницаемости среды, а обусловлены изменением направления конвективного переноса газов в трещинных зонах. Было установлено, что газовый поток в зоне разлома летом направлен из горного массива в атмосферу, а зимой – из атмосферы в горный массив [23,24]. Причины изменения направления потока воздуха в зонах разломов, однако, оставались до конца не выясненными. В этой связи нами была поставлена задача продолжения детальных исследований поведения радона в зонах разломов с целью уточнения наших представлений о механизмах формирования радоновых аномалий. Для этого были организованы комплексные мониторинговые исследования по схеме, аналогичной той, что применялась нами ранее в Байкальской рифтовой зоне [23,24], но в принципиально иных геологических, тектонических и климатических условиях.

Для проведения исследований был выбран район Кавказских Минеральных Вод (КМВ), характеризующийся современной сейсмической и геодинамической активностью, наличием активных разломов, разгрузкой минерализованных термальных подземных вод. Район исследований характеризуется значительным содержанием урана и радия в магматических породах и рыхлых склоновых образованиях, в некоторых районах присутствует урановая минерализация, в недрах гор Бештау и Бык в 1940-е – 80-е гг. производилась разработка урановых руд. Все это обуславливает высокие концентрации радона в подпочвенном воздухе и грунтовых водах региона, а также в зданиях населенных пунктов, расположенных на склонах магматических массивов. Территория характеризуется высоким радоновым потенциалом и является одной из наиболее радоноопасных территорий в России [29].

Объект мониторинга и методика исследований

По результатам предварительных исследований, проведенных летом и осенью 2017 года, на западном склоне горы Бештау была выявлена мощная радоновая аномалия, приуроченная к крупной трещине в массиве горных пород. Координаты аномалии по GPS N 44.092340; E 43.008840, абсолютная отметка 850 м. Значения плотности потока радона с поверхности почвы непосредственно вблизи трещины достигают 16000 мБк/м²с [30]. Полученное значение в 20 раз превышает средний фоновый уровень, определенный для данной части Бештау, и в 200 раз допустимый уровень, рекомендуемый для участков застройки (ОСПОРБ-99/2010). В результате мощного выброса радона в атмосферу в аномальной зоне регистрировались повышенные значения объемной активности радона в открытом воздухе на высоте 0,5–1,0 м, достигающие 4000–8000 Бк/м³. Непосред-

ственно в районе трещины, откуда происходит разгрузка газа, наблюдались повышенные значения МЭД гамма-излучения, достигающие 1,5 мкЗв/ч (при фоновых значениях для данной местности 0,4–0,6 мкЗв/ч) что, по-видимому, обусловлено гамма-излучением дочерних продуктов распада радона. Результаты предварительных исследований подробно изложены в публикации [30].

Специальные геодинамические исследования позволили установить, что аномалия связана с активным разломом, прослеживающимся в массиве Бештау. О современной тектонической активности разлома свидетельствует наличие мощной зоны трещиноватости, характеризующейся многочисленными раскрытыми трещинами с хорошо выраженными зеркалами скольжения. Ширина зоны составляет около 200 м. В глубине горного массива зона трещиноватости, возможно, пересекает систему горных выработок бывшего Бештау-горского уранового рудника.

В районе выявленной радоновой аномалии в течение двух лет с июня 2017 г. по настоящее время (октябрь 2019 г.) проводятся ежемесячные измерения плотности потока радона с поверхности почвы. В целом методология проведения исследований соответствовала применяемым ранее подходам [23,31]. Измерения проводились в 6 точках, три из которых расположены в зоне разлома («аномальная» площадка), а три – за ее пределами («фоновая» территория). Среднее значение по трем точкам принималось в качестве результата ежемесячных измерений на каждой площадке. Для измерения плотности потока радона с поверхности грунта применялся метод открытой камеры с активированным углем с использованием измерительного комплекса «Камера-01». Время экспозиции камер на поверхности грунта составляет около 4 часов. Общая неопределенность результата измерений не превышает 40% в широком диапазоне

температуры и влажности окружающей среды, характерном для полевых условий [32].

Кроме того, непосредственно в аномальной зоне, в трещине между камнями, откуда зарегистрирована разгрузка газа, в период с октября 2018 по август 2019 года проводились непрерывные автоматические измерения мощности дозы гамма-излучения. Как указывалось выше, повышенные концентрации радона в атмосферном воздухе вызывают рост мощности дозы гамма-излучения. В этой связи контроль мощности дозы может дать информацию о динамике радона в аномальной зоне. Непрерывная автоматическая регистрация показаний проводилась с интервалом 1 час индикатором мощности дозы «Атом-Мини2» (разработка КБ «Радар», г. Троицк).

Также на площадке измерялась температура воздуха на высоте 1 м от поверхности с помощью цифрового прибора *X-Line AeroTemp*. Диапазон измерения температуры от –10 до +45 °С, разрешение 0,2 °С, точность ±2 °С.

Участок мониторинга расположен в пределах массива магматических пород (бештаунитов), перекрытых рыхлыми склоновыми образованиями, представляющими собой дресву с многочисленными обломками бештаунитов. Свойства приповерхностных рыхлых образований, такие как содержание радия, плотность, проницаемость, как в зоне разлома, так и за ее пределами, были определены ранее в ходе предварительных исследований. Распределение значений свойств горных пород и рыхлых образований на исследуемых площадках однородное. Удельная активность радия-226 в горных породах и рыхлых отложениях составляет в среднем около 200 Бк/кг [30].

Полученные результаты

Результаты регулярных ежемесячных измерений плотности потока радона, температуры воздуха и мощности дозы гамма-излучения в районе зоны разлома на западном склоне

горы Бештау приведены на рис.1. Как видно из приведенных данных, на фоновой площадке плотность потока радона в сезонном цикле меняется незначительно, в то время как на аномальной площадке зарегистрированы чрезвычайно высокие по амплитуде сезонные колебания плотности потока радона с максимумами летом и минимумами зимой. Причем, летом плотность потока радона на аномальной площадке в десятки раз превышает фоновые значения, а зимой в 4–5 раз ниже фоновых уровней. Сезонные колебания плотности потока радона в аномальной зоне устойчиво повторяются из года в год в течение неполных трех сезонных циклов. Колебания плотности потока радона на аномальной площадке, полученные по ежемесячным измерениям, подтверждаются результатами непрерывной регистрации мощности дозы гамма-излучения (рис.1).

На аномальной площадке наблюдается тесная корреляционная связь между плотностью потока радона и температурой атмосферного воздуха (коэффициент корреляции составляет $r = 0,8$). Осеннее снижение и весенний рост плотности потока радона происходят в момент, когда температура атмосферного воздуха становится, соответственно, ниже или выше температуры горного массива. Значение температуры горного массива ($11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) принято по фоновым данным по результатам многолетних температурных замеров в урановых штольнях, расположенных на тех же гипсометрических отметках. Значимой корреляции плотности потока радона с другими метеопараметрами, такими как количество осадков, атмосферное давление и скорость ветра, не наблюдается.

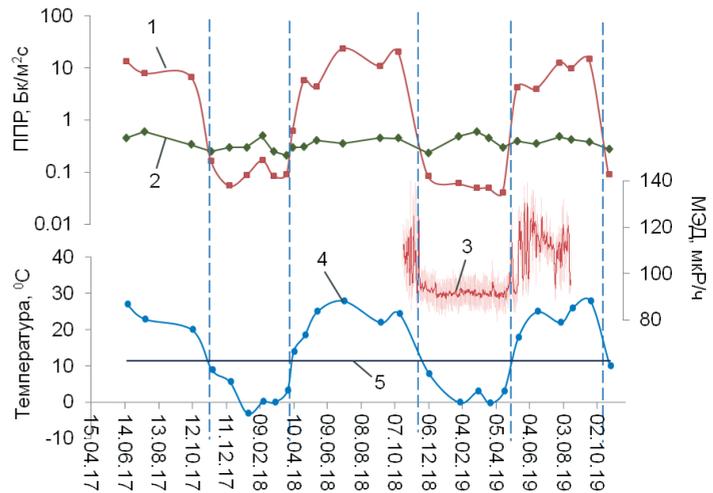


Рис.1. Временные вариации: плотности потока радона на аномальной площадке (1) и на фоновой площадке (2), мощности дозы гамма-излучения (3), температуры атмосферного воздуха (4) и воздуха в недрах горного массива (5), в зоне разлома на западном склоне массива Бештау.

На основе модели переноса радона в геологической среде было проведено моделирование переноса радона в массиве. Известно, что для однородной полубесконечной пористой среды стационарный диффузионно-конвективный перенос радона только в вертикальном направлении описывается уравнением [33]:

$$\frac{\partial^2 C(z)}{\partial z^2} + \frac{v}{D_e} \frac{\partial C(z)}{\partial z} - \frac{\lambda}{D_e} C(z) + \frac{C_\infty}{\varepsilon D_e} = 0, \quad (1)$$

где $C(z)$ – концентрация радона в почвенном газе, $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$; D_e – эффективный коэффициент диффузии радона, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; v – скорость вертикального конвективного переноса радона в грунтах, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; λ – константа распада ^{222}Rn , с^{-1} ; ε – пористость грунта, доли ед.; C_∞ – ожидаемая концентрация радона в объеме грунта в состоянии векового равновесия с радием, $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$.

Ожидаемая концентрация радона в объеме грунта C_∞ может быть найдена с помощью выражения:

$$C_\infty = C_{Ra} E \rho, \quad (2)$$

где C_{Ra} – содержание радия в грунте, $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$; E – коэффициент эманирования, доли ед.; ρ – плотность грунта, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Решение уравнения (1) с учетом граничных условий $C(0) = 0$ и $C(\infty) = C$ позволяет получить следующее соотношение для расчета плотности потока радона (J , Бк·м⁻²·с⁻¹) с поверхности почвы [33]:

$$J = D_e C_\infty \left[\sqrt{\left(\frac{v}{2D_e}\right)^2 + \frac{\lambda}{D_e}} + \frac{v}{2D_e} \right]. \quad (3)$$

Если перенос радона происходит с преобладанием диффузии ($v = 0$) и почва сухая, то выражение (3) преобразуется в простое соотношение, аналогичное известному уравнению, приведенному в [34]:

$$J = C_{Ra} E_p \rho \lambda L, \quad (4)$$

где L – диффузионная длина ²²²Rn, м;

$$L = \sqrt{D_e / \lambda}.$$

Моделирование проводилось с использованием результатов измерений свойств грунтов, а также данных мониторинга плотности потока радона, полученных на площадках. Результаты моделирования показали, что на фоновой площадке наблюдаемая динамика плотности потока радона может быть удовлетворительно описана диффузионной моделью, без привлечения конвективного транспорта. При этом полученные расчетные значения коэффициента диффузии радона составили около $1,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с, что близко к верхней границе типичного диапазона D_e для почв и грунтов [34]. На аномальной площадке сезонная динамика радона не может быть объяснена только диффузионным механизмом. Удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными может быть получено при использовании диффузионно-конвективной модели переноса. Как показали результаты моделирования (рис.2), скорость конвективного переноса радона в аномальной зоне подвержена весьма существенным сезонным вариациям. Летом получены чрезвычайно высокие положительные значения скорости конвекции радона, достигающие 28,0 м/сут, зимой же

скорость конвективного переноса радона принимает отрицательные значения, достигающие –4,0 м/сут. Отрицательные значения скорости конвективного переноса означают, что зимой транспорт радона происходит в противоположном направлении, чем летом, т. е. летом атмосферный воздух разгружается из разломной зоны в атмосферу, а зимой затягивается в горный массив. Изменение направления конвективного переноса радона четко приурочено к моментам инверсии разности температур между горным массивом и атмосферой.

Обсуждение результатов

На рис.2 для сравнения приведены результаты расчетной оценки скорости конвективного переноса радона, полученные в зоне разлома на Бештау в 2018–2019 гг. и в зоне Приморского разлома Байкальского рифта, полученные в 2015–2016 гг. [23–24]. Как видно из рисунка, динамика скорости переноса радона в обеих разломных зонах практически идентична. Незначительные отличия связаны с различием в содержании радия в горных породах и климатических условиях регионов.

Следует обратить внимание на тот факт, что геологическое строение и тектонические условия этих районов кардинально различаются. Достаточно сказать, что Приморский разлом, где проводились измерения в 2015–16 гг., является звеном глобальной Байкальской рифтовой зоны, по которому происходит погружение впадины Байкала. Разлом характеризуется глубинным заложением, рассекая литосферу со значительным смещением по ее подошве и отчетливо проявляется в рельефе в виде уступа вдоль западного побережья Байкала высотой до 600 м и длиной около 200 км. В то же время исследуемый разлом на Бештау относится к локальным структурам неглубокого заложения, имеет длину не более 10–15 км

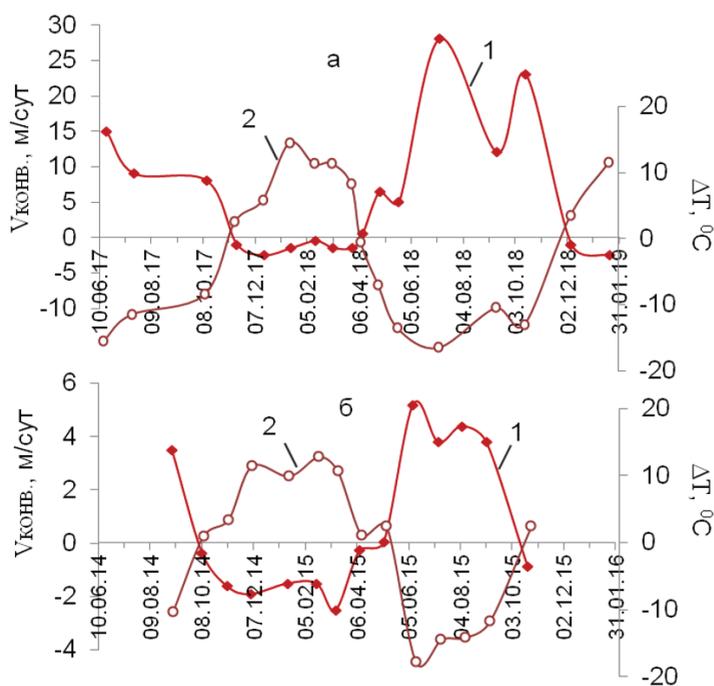


Рис.2. Скорость конвективного переноса радона (1) и разница температур между горным массивом и атмосферой (2) в аномальных зонах Бештаугорского (а) и Приморского (б) разломов.

и прослеживается только в пределах магматического массива. Современная активность разломов Бештау связана, вероятнее всего, с процессами локального тектонического подъема бештаугорской кольцевой структуры в раннечетвертичное время. Однако, несмотря на столь разную природу, структуру и масштаб исследуемых разломных зон, поведение в них радона практически одинаково. Это свидетельствует об отсутствии влияния глубинных геологических и тектонических условий региона (ранга и глубины заложения разлома) на эксхалацию радона в аномальных зонах, что ставит под сомнение глубинное происхождение радоновых аномалий.

Какие же процессы могут быть причиной наблюдаемой сезонной динамики плотности потока радона в зонах разломов? Какие силы летом способствуют выбросу воздуха из трещин в атмосферу и, наоборот, заставляют атмосферный воздух затягиваться в горный массив в течение всей зимы? Очевидно, что сезонные изменения проницаемости среды

(влагонасыщенности или открытости трещин) не могут приводить к подобному эффекту.

Анализ полученных данных позволяет предположить, что весь комплекс наблюдаемых явлений может быть удовлетворительно объяснен процессами конвективной циркуляции атмосферного воздуха в проницаемых зонах разломов. Суть процесса заключается в следующем. Зимой воздух в недрах горного массива более теплый, чем в окружающей атмосфере, в результате чего он поднимается по зонам трещиноватости вверх и

разгружается в атмосферу у вершины, при этом возникающее разрежение компенсируется затягиванием атмосферного воздуха в массив у подножия склонов. Летом, когда температура горного массива ниже температуры атмосферного воздуха, более холодный и плотный воздух в проницаемой зоне горного массива опускается вниз и разгружается в атмосферу в местах выхода зон трещиноватости у подножия склона, при этом создающееся в массиве разрежение компенсируется поступлением воздуха в проницаемую зону в верхней части склона. По мере движения через проницаемые зоны, воздух обогащается радоном за счет эманирования окружающих горных пород, что обуславливает формирование радоновых аномалий в местах разгрузки воздушных потоков. Таким образом, в зонах разломов в верхней части склонов формируются сезонные радоновые аномалии с максимумами зимой и минимумами летом, а у подножия склонов, наоборот, с максимумами летом и минимумами зимой (рис.3). Следует отметить, что

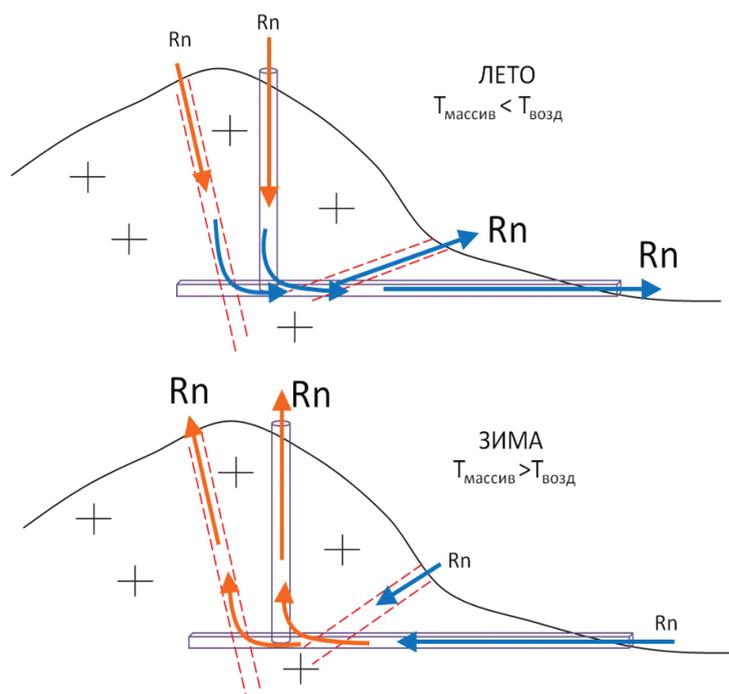


Рис. 3. Схема формирования сезонных радоновых аномалий в зонах разломов за счет конвективной циркуляции атмосферного воздуха в зонах разломов.

обе радоновые аномалии, описанные нами выше, расположены у подножия склонов, что объясняет наблюдаемую сезонную динамику радона.

Атмосферное происхождение газового потока, разгружающегося в зоне радоновой аномалии на Бештау, подтверждается отсутствием в составе газов свободного водорода, что было определено в ходе измерений, проведенных летом 2019 года с помощью портативного водородного газоанализатора ВГ-3 разработки НИЯУ «МИФИ».

Конвективная циркуляция воздуха за счет перепада температур между воздушным пространством внутри горного массива и атмосферой – достаточно известный процесс. Он во многом обуславливает естественный воздухо- и теплообмен в природных пещерах и искусственных подземных выработках, имеющих выход на разных гипсометрических отметках [35-37]. Сезонная разгрузка холодного воздуха в летний период известна, например, в т. н. «Пещере вечной мерзлоты» – старой

штольне на горе Развалка – известном туристическом объекте Кавказских минеральных вод, расположенном недалеко от горы Бештау. По результатам наших измерений концентрация радона в потоке холодного воздуха, выходящего из «пещеры» летом 2019 г., колебалась в пределах от 9000 до 22000 Бк/м³. Мощный поток холодного воздуха в летнее время отмечен нами также и из устьев штолен бывшего Бештаугорского уранового рудника, расположенных у подножия Бештау в нескольких километрах южнее исследуемой радоновой аномалии. Температура воз-

душного потока на устьях штолен составляла около 12–14 °С при температуре атмосферного воздуха 24 °С, скорость потока достигала 8 м/с. Концентрация радона в потоке воздуха достигала 450000 Бк/м³. Причем, зимой во всех случаях наблюдается обратная картина – атмосферный воздух затягивается в штольни.

В последнее десятилетие появляется все больше публикаций, указывающих на связь радоновых аномалий с конвективной циркуляцией атмосферного воздуха в подземных полостях, а также в слоях высокопроницаемых отложений. Так, в работе [38] описана аналогичная конвективная циркуляция воздуха на склонах потухших вулканов в природном парке Ла Гарроча (округ Жирона, Испания). Разгрузка холодного воздуха в летнее время происходит из системы природных полостей и каналов диаметром 2–10 см в вулканических туфах. Интересно, что жители региона издавна строили свои дома на склонах так, чтобы подземные полости выходили в подвалы, используя таким образом конвективный

эффект в практических целях – для охлаждения подвалов в летнюю жару. Исследования показали, что летом концентрация радона в таких домах достигает 1500 Бк/м^3 , а в воздухе, непосредственно поступающем из подземных полостей – до 9500 Бк/м^3 [38]. В работе отмечена связь колебаний концентрации радона с изменением перепада температур между горным массивом и атмосферой, однако природа конвективного переноса радона не объяснена.

Аналогичные сезонные радоновые аномалии, связанные с перепадом температуры между горным массивом и атмосферой, были зарегистрированы на склоне фьорда в деревне Кинсарвик в западной Норвегии [39]. За счет данного эффекта регистрировались высокоамплитудные сезонные колебания концентрации радона в домах, расположенных в верхней и в нижней части склона. В аномальных зонах были также зафиксированы мощные сезонные аномалии концентрации радона в почвенном воздухе, причем, объемная активность почвенного радона в верхней и нижней части склона колебалась в противофазе. Изменение концентраций радона в почвенном воздухе происходило строго в момент инверсии перепада температур между грунтовым и атмосферным воздухом. В работе [39] было четко показано, что радоновые аномалии формируются за счет сезонной циркуляции атмосферного воздуха в слое высокопроницаемых валунных ледниковых отложений, залегающем на склоне фьорда.

Наконец, в работе [40] описаны сезонные радоновые аномалии в районе уранового месторождения Шлема-Альберода (Саксония, ФРГ), где наблюдаются наибольшие концентрации радона в домах по сравнению с другими участками бывшей добычи и переработки урановой руды в Германии. В деревне, расположенной в непосредственной близости к склонам уранового отвала, были зафиксированы

концентрации радона в открытом воздухе, достигающие в летнее время 2500 Бк/м^3 . Зимой концентрация радона в воздухе понижалась в 10 раз, до 200 Бк/м^3 . Специальные исследования, включающие многолетний мониторинг радона, а также применение газовых трассеров показали, что сезонные колебания радона связаны с процессом конвективной циркуляции атмосферного воздуха в высокопроницаемом материале отвала. Процесс конвекции управляется перепадами температур между воздухом внутри отвала и атмосферой. Как следствие, плотность потока радона с поверхности в нижней части склонов отвала, а также концентрации радона в атмосферном воздухе у подножия склонов демонстрировали существенные сезонные колебания.

Таким образом, существенная роль конвективной циркуляции атмосферного воздуха в формировании сезонных радоновых аномалий известна, однако до сих пор подобные аномалии считались относительно редким явлением, характерным для специфических геологических условий, не связанных с зонами тектонических разломов. Радоновые аномалии в зонах тектонических разломов традиционно объяснялись исключительно наличием потока газов из глубинных областей земной коры, а сезонные вариации – изменением проницаемости среды. Вместе с тем, полученные нами данные показывают, что в исследованных зонах тектонических разломов радоновые аномалии формируются не за счет глубинной разгрузки газов, а благодаря именно конвективной циркуляции атмосферного воздуха в приповерхностной зоне. Отметим, что исследуемые разломы были выбраны совершенно случайно, обладают различными характеристиками и расположены в регионах с разными тектоническими условиями. Кроме того, как указывалось в начале статьи, известные из литературы мощные радоновые аномалии, зарегистрированные в других зонах разломов,

проявляют аналогичную сезонную динамику и связь с температурой воздуха и массива. Все это позволяет предположить, что процесс конвективной циркуляции атмосферного воздуха значительно более распространен в разломных зонах, чем это считалось ранее. Трещины тектонических разломов выступают в качестве проницаемой среды, где осуществляется приповерхностный конвективный перенос атмосферного воздуха, в то время как глубинная разгрузка газов, если таковая вообще имеет место, в данных условиях на уровне радона практически не влияет.

Выводы

По результатам проведенных исследований установлено, что преобладающим процессом формирования сезонных радоновых аномалий в зонах разломов, скорее всего, является конвективная циркуляция атмосферного воздуха в горном массиве. При этом у подножия склонов формируются радоновые аномалии с максимумами летом, а у вершины – с максимумами зимой. Для формирования сезонных радоновых аномалий необходимы следующие условия:

- 1) наличие в горном массиве проницаемой среды (система связанных между собой и не заполненных водой трещин);
- 2) наличие выходов проницаемой зоны на дневную поверхность на разных гипсометрических отметках;
- 3) перепад температур между атмосферным воздухом и горным массивом.

Сезонная циркуляция атмосферного воздуха может развиваться на склонах и вне зон разломов в проницаемых отложениях, где возможен конвективный перенос газов. Есть все основания предполагать, что сезонные радоновые аномалии, связанные с данным процессом, могут быть значительно более распространенным явлением, чем это считалось ра-

нее. Подобную же природу, возможно, имеют, например, радоновые аномалии, отмеченные нами ранее на территории Москвы [41,42]. По крайней мере, анализ геоморфологических данных показывает, что большинство из этих аномалий приурочено к местам пересечения геодинамически активных зон, характеризующихся повышенной проницаемостью среды, с долинами рек. Определенную роль, по-видимому, может играть техногенный фактор, а именно, наличие подземных коллекторов различного назначения, имеющих выходы на разных высотных отметках, вдоль которых развиваются суффозионные процессы.

Сезонные радоновые аномалии необходимо принимать во внимание при оценке потенциальной радоноопасности территорий, т. к. в этих зонах наблюдаются наиболее высокие значения плотности потока радона из грунтов. Следует особо обратить внимание на то, что при оценке потенциальной радоноопасности участков строительства, основанной на разовых измерениях плотности потока радона, в таких зонах могут быть получены ошибочные заниженные результаты, если измерения проводились в период, характеризующийся низкими уровнями радона. В этой связи особо актуальной задачей представляется разработка методики и составление крупномасштабных карт геогенного радонового потенциала территорий, на которых, в том числе, отражались бы области возможного развития сезонных радоновых аномалий, а также аномалии, выявленные на той или иной территории ранее.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00674а), часть исследований выполнялась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0142-2019-0025).

Литература

1. G. Cinelli, T. Tollefsen, P. Bossew, V. Gruber, K. Bogucarskis, L. de Felice, M. de Cort. «Digital version of the European Atlas of natural radiation», *J. Environ. Radioactiv*, no. 196, pp. 240-252, 2019.
2. H. Friedmann, A. Baumgartner, M. Bernreiter, J. Graser, V. Gruber, F. Kabrt, H. Kaineder, F.J. Maringer, W. Ringer, C. Seidel, G. Wurm, «Indoor radon, geogenic radon surrogates and geology – Investigations on their correlation», *J. Environ. Radioactiv*, no. 166(2), pp. 382-389, 2017.
3. F. Giustini, G. Ciotoli, A. Rinaldini, L. Ruggiero, M. Voltaggio, «Mapping the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Bayesian Kriging regression: A case study from a volcanic area of central Italy», *Sci. Total Environ*, no. 661, pp. 449-464, 2019.
4. V. Gruber, P. Bossew, M. de Cort, T. Tollefsen, «The European map of the geogenic radon potential», *J. Radiol. Prot.*, no. 33, pp. 51-60, 2013.
5. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.
6. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов западного Прибайкалья // Геодинамика и тектонофизика. 2013. N 4(1). С. 1-12.
7. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Вариации объемной активности радона в разломных зонах земной коры: пространственные особенности // Физика Земли. 2014. N 6. С. 80-85.
8. Рудаков В.П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир. 2009. 176 с.
9. L.C. Vaubron, A. Rigo, J.P. Toutain, «Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France)», *Earth Planet Sci. Lett.* no. 196, pp. 69-81, 2002.
10. G. Ciotoli, S. Bigi, G.P. Cavinato, *Radon distribution as shallow evidence of buried fault geometry in the Fucino plain (Central Italy)*. 6th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology, 19-24 April 2015, Pescina, Fucino Basin, Italy. no. 6, pp. 79-82, 2015.
11. J.-P. Drolet, R. Martel, «Distance to fault as a proxy for radon gas concentration in dwellings». *J. Environ. Radioactiv*, no. 152, pp. 8-15, 2016.
12. P. Hernández, N. Perez, J. Salazar, M. Reimer, K. Notsu, H. Wakita, «Radon and helium in soil gases at Casaadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain», *J. Volcanol. Geoth. Res.* no. 131, pp. 59-76. 2004.
13. S. Inan, A. Kop, H. Cetin, F. Kulak, Z. Pabuccu, C. Seyis, S. Ergintav, O. Tan, R. Saatcilar, M. Nuri Bodur, «Seasonal variations in soil radon emanation: long-term continuous monitoring in light of seismicity», *Nat Hazards*, no. 62, pp. 575-591, 2012.
14. C.Y. King, «Radon emanation on San Andreas fault», *Nature*, no. 271, pp. 516-519, 1978.
15. C.Y. King, B.S. King, W.C. Evans, «Spatial radon anomalies on active faults in California». *Appl. Geochem.*, no. 11, pp. 497-510, 1996.
16. V. Moreno, J. Bach, M. Zarroca, Ll. Font, C. Roque, R. Linares, «Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa», *J. Environ. Radioactiv.*, no. 189, pp. 1-13, 2018.
17. C. Papastefanou, «Variation of radon flux along active fault zones in association with earthquake occurrence», *Radiat. Meas.*, no. 45, pp. 943-951, 2010.
18. V. Walia, S.J. Lin, C.C. Fu, T.F. Yang, W.L. Hong, K.L. Wena, C.H. Chen, «Soil-gas monitoring: A tool for fault delineation studies along Hsinhua Fault (Taiwan), Southern Taiwan», *Appl. Geochem.*, no. 25, pp. 602-607, 2010.
19. V.I. Utkin, A.K. Yurkov, «Radon as a tracer of tectonic movements», *Russ. Geol. Geophys.*, no. 51, pp. 220-227, 2010.
20. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989. 407 с.
21. Паровик Р.И., Швецов Б.М., Фирстов П.П. Модель переноса радона в режиме супердиффузии во фрактальной среде. Доклады Адыгейской (Черкесской) Международной академии наук. 2008. Т. 10. N 2. С. 79-85.

22. Шулейкин В.Н., Резниченко А.П., Пушина Л.В. О связях метана и водорода почвенного воздуха. Дегазация Земли: геофизика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всерос. конф. М.: ГЕОС, 2008. С. 544-547.
23. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Издательство «Перо», 2016. 394 с.
24. 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. N 3(86). С. 19-34.
25. Ll. Font, C. Baixeras, V. Moreno, J. Bach, «Soil radon levels across the Amer fault», *Radiat. Meas.*, no. 43, pp. 319-323, 2008.
26. V. Moreno, J. Bach, Ll. Font, C. Baixeras, M. Zarroca, R. Linares, C. Roque, «Soil radon dynamics in the Amer fault zone: An example of very high seasonal variations». *J. Environ. Radioactiv.*, no. 151, pp. 293-303, 2016.
27. F. Perrier, P. Richon, J.-C. Sabroux, «Temporal variations of radon concentration in the saturated soil of Alpine grassland: The role of groundwater flow». *Sci. Total Environ.*, no. 407, pp. 2361-2371, 2009.
28. B. Zmazek, M. Zivcic, Vaupotic, M. Bidovec, M. Poljak, I. Kobal, «Soil radon monitoring in the Krsko Basin, Slovenia», *Appl. Radiat. Isot.*, no. 56, pp. 649-657, 2002.
29. V.L. Lezhnin, M.V. Zhukovsky, E.V. Polzik, V.S. Kazantsev, O.A. Pakholkina, «A Multifactorial assessment of carcinogenic risks of radon for the population residing in a Russian radon hazard zone». *Arch. Oncology*, no. 19(1-2), pp. 3-8, 2011.
30. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М., Нефедов Н.А., Остапчук Т.В., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. Уровни эксхалации радона на западном склоне горы Бештау, Кавказские Минеральные Воды // Геоэкология. 2018. N 5. С. 20-30.
31. Маренный А.М., Микляев П.С., Пенезев А.В., Цапалов А.А., Климшин А.В., Лопатин М.Н., Маренный М.А., Петрова Т.Б., Шкуропат Д.И., Щелкунов А.В., Янкин А.С. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 4 - результаты мониторинга радона внутри грунтовых массивов // АНРИ. 2015. N 3(82). С. 52-63.
32. A. Tsapalov, K. Kovler, P. Miklyaev, «Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface». *J. Environ. Radioactiv.* pp. 160, С. 28-35, 2016.
33. V.S. Yakovleva, «A theoretical method for estimating the characteristics of radon transport in homogeneous soil». *Ann. Geophys.*, no. 48(1), pp. 195-198, 2005.
34. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and effects of ionizing radiation. In: Sources, vol. I. United Nations Publications, New York. 2000.
35. Голод В.М., Голод М.П. Микроклимат гипсовых пещер Пинежья. В кн.: Пещеры Пинежо-Северодвинской карстовой области. Л.: Наука, 1974. С. 128-155.
36. Дегтярев А.П. Температурно-динамические типы пещерных входов // Вопросы географии. 2018. N 147. С. 299-310.
37. Лукин В.С. Температурные аномалии в пещерах Предуралья и критический анализ теорий подземного холода // Пещеры. 1965. N 5(6). С. 164-172.
38. V. Moreno, J. Bach, C. Baixeras, Ll. Font, «Characterization of blowholes as radon and thoron sources in the volcanic region of La Garrotxa». *Spain. Radiat. Meas.*, no. 44, pp. 929-933. 2009.
39. A.V. Sundal, V. Valen, O. Soldal, T. Strand, «The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments». *Sci. Total Environ.* no. 389, pp. 418-428, 2008.
40. P. Schmidt, «Proof of the Radiological Remediation Success at Former Uranium Mining and Milling Sites (WISMUT sites) in Germany». 4th Europ. IRPA Congr., June 23-27, Geneve, Switzerland. 2014.

41. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Маренный А.М., Дорожко А.Л., Макеев В.М. Карта плотности потока радона на территории Москвы // АНРИ. 2012. N 3(70). С. 15-24.
42. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Макеев В.М., Климшин А.В. Аномалии плотности потока радона на территории Москвы // Геоэкология. 2017. N 5. С. 39-47.

On the Genesis of Radon Anomalies in the Tectonic Fault Zones

Miklyaev Petr^a, Petrova Tatiana^b, Marennyy Albert^c, Shchitov Dmitry^d, Sidyakin Pavel^d, Murzabekov Murat^d

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences (IEG RAS). Ulansky per. 13, build. 2, 101000, Moscow, Russia, peterm7@inbox.ru;

^b Lomonosov Moscow State University, Faculty of chemistry, Department of radiochemistry, Leninskie gory, 1, build. 3, GSP-1, 119991, Moscow, Russia, tbp111@inbox.ru;

^c Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Shchukinskaya ul., 40, 123182, Moscow, Russia, amarennyy@yandex.ru;

^d North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Branch, Engineering faculty, Department of Construction, Ermolov str., 46a, 357500, Pyatigorsk, Russia, skfu.pgs@gmail.com.

Abstract. As a result of almost three-year observations conducted in the fault zone in the Beshtau magmatic massif area (Caucasian Mineral Waters), anomalous seasonal fluctuations in radon exhalation rate were registered. Seasonal fluctuations are characterized by highs in summer and lows in winter. Summer values reached 23800 mBq/(m²s), while in winter the radon exhalation rate decreased to 40 mBq/(m²s). Radon exhalation rate in the fault zone shows a clear direct correlation with air temperature. The rise of radon levels in spring and fall in autumn are timed to the moments when the temperature of the atmospheric air becomes, respectively, above and below the temperature of the rock massif. It is established that seasonal fluctuations of radon levels are caused by changes in the direction of convective radon transport in the fractured zones. The obtained data suggest that the formation of seasonal radon anomalies in the fault zones is due to the circulation of atmospheric air in permeable zones of the rock massif, which occurs due to the temperature difference between the massif and the atmosphere.

Key words: radon, radon exhalation rate, tectonic fault, radon seasonal variations, convective transport.

Контакты:

Микляев П.С. (д.г.-м.н., профессор РАН, г.н.с. Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, с.н.с. ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России), +7 (495) 607-80-63, peterm7@inbox.ru.

Петрова Т.Б. (к.т.н., с.н.с. каф. радиохимии хим. ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова), alpinzayac@mail.ru.

Маренный А.М. (д.ф.-м.н., зав. лаб. ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России), amarennyy@yandex.ru.

Щитов Д.В. (к.т.н., доцент, зав. каф. строительства инженерного ф-та Пятигорского филиала СКФУ).

Сидякин П.А. (к.т.н., доцент, профессор кафедры строительства инженерного ф-та Пятигорского филиала СКФУ).

Мурзабеков М.А. (ассистент кафедры строительства инженерного ф-та Пятигорского филиала СКФУ, зав. лаб.).