

Динамика выброса радона из штолен бывшего уранового рудника на склонах горы Бештау

В статье приводятся результаты мониторинговых измерений концентрации радона в воздухе, мощности дозы гамма-излучения, а также скорости и направления движения воздуха на устьях штолен бывшего Бештаугорского рудника № 1 (гора Бештау). Также в ходе мониторинга проводились измерения концентрации радона в воздухе в зоне природной радоновой аномалии, связанной с тектоническим разломом. Полученные данные свидетельствуют о формировании на устьях штолен очень мощных сезонных радоновых аномалий, связанных с периодическим выбросом рудничного воздуха из штолен в атмосферу. В периоды разгрузки шахтного воздуха концентрации радона в открытой атмосфере локально вокруг устьев штолен достигают 594685 Бк/м^3 , составляя в среднем $50000\text{--}250000 \text{ Бк/м}^3$. Эквивалентная равновесная объемная активность радона в воздухе составляет от 1600 до 80000 Бк/м^3 . Выброс значительных концентраций радона и его дочерних продуктов распада приводит к резкому и существенному повышению мощности дозы гамма-излучения локально вокруг устьев штолен до значений $1\text{--}18 \text{ мкЗв/ч}$. Эти факты делают заброшенные устья штолен объектами повышенного радиационного риска. Сопоставление результатов измерений концентрации радона на устьях штолен и в зоне природной радоновой аномалии, связанной с тектоническим разломом, показывают, что выбросы радона в обоих случаях обусловлены единым процессом – циркуляцией воздуха в проницаемых зонах горного массива за счет перепада температур между горным массивом и атмосферой.

П.С.Микляев^{1,2}, Т.Б.Петрова³,
Д.В.Щитов⁴, П.А.Сидякин⁴,
Д.Н.Цебро⁴

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

² ФГУП НТЦ Радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России (ФГУП НТЦ РХБГ), г. Москва

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический ф-т, кафедра радиохимии, г. Москва

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

Ключевые слова: радон, сезонные колебания концентрации радона, месторождения урана, вентиляция горных выработок.

Данная статья является продолжением серии публикаций, посвященных конвективному переносу радона в проницаемых зонах земной коры [1,2].

В ходе предыдущих исследований нами были обнаружены мощные радоновые аномалии, приуроченные к зонам активных тектонических разломов, характеризующихся очень сильными сезонными колебаниями плотности потока радона (ППР) с поверхности почвы и объемной активности (ОА) радона в подпочвенном воздухе, тесно коррелирующие с изменением температуры воздуха. Несмотря на то, что «аномальные участки» расположены в резко различных геологических, тектонических и климатических условиях (один – в Прибайкалье, а другой – в регионе Кавказских Минеральных Вод), на этих участках наблюдался одинаковый сезонный ход ППР и ОА радона – максимальные значения ППР и ОА радона летом и минимальные зимой. Результаты моделирования переноса радона показали, что в обоих случаях сезонная динамика ППР с поверхности грунта может быть удовлетворительно объяснена только изменением направления конвективного газового потока, переносящего радон в течение года. В летние месяцы у подножия горы конвективный газовый поток направлен из горного массива в атмосферу, а зимой воздух из атмосферы затягивается в горный массив. На основе полученной совокупности данных было сделано предположение, что наиболее вероятной причиной регистрируемых сезонных колебаний радонового поля на обоих участках является конвективная циркуляция атмосферного воздуха в приповерхностных областях зон разломов за счет перепада температур между грунтовым массивом и атмосферным воздухом.

Механизм конвективной циркуляции воздуха в проницаемых зонах земной коры, вообще говоря, давно известен и является более

сложным и масштабным аналогом известного «стек-эффекта» или «эффекта дымовой трубы», формирующегося в зданиях за счет перепада температур между внутренней оболочкой здания и окружающей атмосферой. Эффект изучается в строительном и пожарном деле с точки зрения обеспечения естественной вентиляции зданий и борьбы с образованием тяги при пожарах. Стек-эффект также считается одним из наиболее значимых механизмов, обеспечивающих поступление радона в здания из грунтов основания. Аналогичные процессы наблюдаются также и в различного рода природных и техногенных подземных полостях (пещерах, шахтах, колодцах, скважинах, тоннелях, штольнях различного назначения и т. п.). Эти процессы изучаются в целях организации вентиляции, прежде всего, в действующих рудниках, тоннелях, а также пещерах, посещаемых туристами. Воздух в подземных пустотах обычно движется за счет разницы давлений и температур в разных частях подземных полостей. Как показывает накопившийся к настоящему времени значительный опыт мониторинга радона в пещерах, тоннелях и горных выработках [3-11], колебания концентрации радона в подземных полостях также проявляют сезонный характер и тесно коррелируют с температурой наружного воздуха. Особенно четко сезонная циркуляция воздуха за счет разницы температур проявляется в относительно простых техногенных системах (штольнях, туннелях), где этот процесс обуславливает естественную вентиляцию горных выработок.

Анализ литературы показывает, что конвективная циркуляция воздуха распространена не только в подземных полостях, но и в слоях хорошо проницаемых отложений. В местах выхода этих отложений на дневную поверхность формируются мощные радоновые аномалии, характеризующиеся резкими сезонными колебаниями, аналогичными тем, что

были зафиксированы нами в зонах разломов Прибайкалья и Кавказских Минеральных Вод [12-16]. Перечисленные аномалии были зарегистрированы в самых разных геологических и климатических условиях в странах Европы (Норвегия, Финляндия, Германия, Испания). Их объединяет тот факт, что все они регистрировались на склонах (фиордов, горных отвалов, потухших вулканов, песчаных холмов) в местах выходов на дневную поверхность слоев хорошо проницаемых отложений различного генезиса. В большинстве перечисленных работ преобладающая роль конвективной циркуляции атмосферного воздуха, как фактора, обуславливающего формирование мощных сезонных радоновых аномалий, была подтверждена экспериментально, в том числе с применением геохимических газов-трассеров [13,14]. Аномальные участки характеризуются очень сильными сезонными колебаниями уровней радона, связанными тесной корреляцией с температурой атмосферного воздуха: прямой в случаях локализации аномалий у основания склонов и обратной при расположении аномалий на вершине [12-15].

Анализ литературы, посвященной длительному мониторингу радона в зонах активных тектонических разломов, показывает, что радоновые аномалии в разломных зонах также характеризуются наличием сильных сезонных колебаний уровней радона, аналогичных описанным выше [11,17-22]. Совокупность данных, приведенных во многих упомянутых работах, позволяет предположить, что и в зонах активных тектонических разломов причиной формирования радоновых аномалий может выступать сезонная циркуляция атмосферного воздуха в приповерхностных областях разломов. Однако в литературе традиционно радоновые аномалии в зонах разломов связывают с глубинной дегазацией недр, а сезонные колебания уровней радона объясняют, как правило, модуляцией глубинного потока

радона за счет сезонных колебаний влажности и, соответственно, проницаемости среды. Таким образом, вопрос о природе сезонных колебаний радона в зонах разломов остается открытым.

Как было указано выше, результаты комплексного радонового мониторинга в зонах разломов, полученные нами в Прибайкалье и на Кавказских Минеральных Водах, свидетельствуют о том, что наиболее вероятным механизмом формирования радоновых аномалий в данных случаях может выступать конвективная циркуляция атмосферного воздуха в зонах разломов. Однако полученные нами данные базируются пока что на измерениях, выполненных в единичных точках, и подтверждаются в основном только результатами моделирования на основе весьма упрощенной одномерной модели. Для повышения достоверности полученных результатов интересно сравнить сезонные колебания радона в «аномальной точке» в зоне разлома на горе Бештау с колебаниями радона на устьях расположенных в этом районе урановых штолен, где есть возможность прямых измерений не только концентрации радона, но также скорости и направления движения воздуха. В разрушенных устьях штолен бывшего Бештаугорского рудника после рекультивации и блокировки входов в штольни путем бетонирования и разрушения порталов штолен взрывами в отдельных местах остались (или вновь образовались) узкие отверстия предположительно суффозионного провального происхождения, но иногда раскопанные и расширенные, вероятно, искателями приключений и/или охотниками за металлоломом. Через эти отверстия в настоящее время осуществляется газообмен между рудником и атмосферой. Результаты мониторинговых исследований режима этого газообмена будут представлены в данной работе.

Объект и методы исследований

Исследуемая территория расположена на курорте Кавказские Минеральные воды в окрестностях городов Лермонтов и Пятигорск Ставропольского края. Характерной особенностью региона является группа отдельных гор, образовавшихся в результате внедрения магмы щелочного гранитного состава в миоцене около 8,5 миллионов лет назад. Центральным и крупнейшим из них является гора Бештау (1401 м), которая представляет собой сложный многофазный интрузив из щелочных гранитных порфиров, трахитов и липаритов, в совокупности известных как «бештауниты». В глубине массива залегают урановые рудные жилы, приуроченные к системе разломов и трещин северо-западного простирания. Самый большой массив урановых жил (группа «Скала») содержит ^{238}U от нескольких сотых процента до нескольких процентов [23,24]. К магматическому массиву примыкает возвышенная равнина, состоящая из осадочных отложений – известняка, мергелей, песчаников и глин. При контакте с интрузивом породы осадочного чехла локально вытягивались в поднятие, опрокидывались и обнажались на поверхности по периферии интрузива. По результатам крупномасштабных полевых структурно-геодинамических исследований, проведенных летом 2019 года, было уточнено местоположение основных разломов, пересекающих гору, а также их текущая тектоническая активность. Были установлены три основные системы разломов: i) меридиональная система, включающая Главный разлом Бештау; ii) диагональная система северо-западного простирания, содержащая урановые руды, и iii) кольцевая система разломов по периферии магматического массива, а также в окружающих осадочных породах. Кольцевая система разломов, а возможно, и другие, были активированы в плиоцен-четвертичное время благодаря общему текто-

ническому поднятию гранитного массива. Большинство разломов, особенно в северо-западной ориентации, отчетливо видны в рельефе в виде впадин и оврагов. Разломы диагональной и меридиональной систем не прослеживаются в отложениях осадочного чехла. Исключением является Главный разлом Бештау, который продолжается в осадочном чехле на относительно небольшом расстоянии в виде изгиба. Кольцевые разломы, как упоминалось выше, можно проследить в магматических породах, контактирующих с осадочным чехлом, и в осадочных породах, окружающих интрузив.

С конца 1940-х до начала 1980-х годов в недрах горы Бештау разрабатывалось месторождение урана. Основной рудник (Рудник №1) был расположен в южной части горы и состоял из 12 горизонтальных уровней, расположенных на абсолютных высотах от 720 до 1100 м. Уровни были соединены двумя вертикальными шахтами – Восточной и Центральной. Шахта Восточная является вентиляционной и выходит на дневную поверхность на высоте 1001 м. Центральная шахта использовалась в качестве транспортной и не имеет соединения с поверхностью. Схема рудника №1 приведена на рис.1.

С 1990-х годов и по настоящее время на территории было проведено несколько этапов рекультивации. Отвалы породы были террасированы и покрыты защитным глинистым покрытием. Входы штолен были заблокированы (либо взорваны, либо забетонированы). Две штольни на нижнем уровне (№16 и №32) не были заблокированы и в настоящее время используются в технических целях, включая эксплуатацию подземных радоновых вод и мониторинг уровней радиации [25]. Через эти штольни в настоящее время рудничные воды сбрасываются в пруды-отстойники, а затем в окружающую среду. Также на некоторых устьях штолен над разрушенными

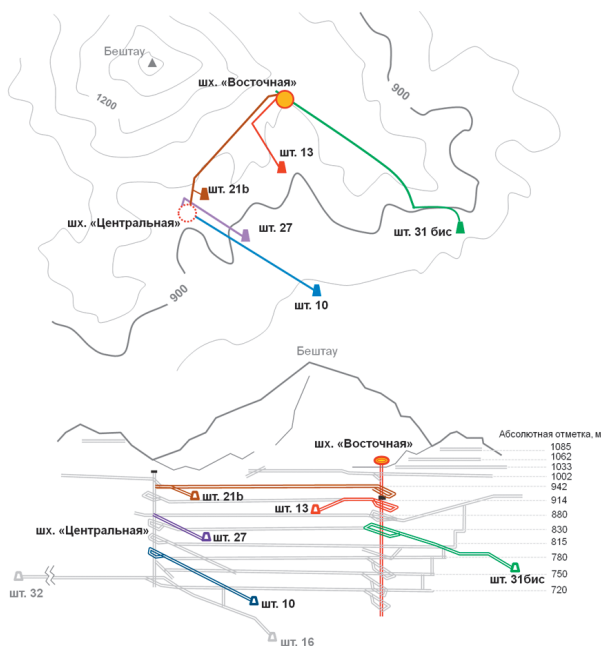


Рис.1. Схема Бештаугорского рудника №1. Вверху – план, внизу – разрез. Цветом выделены штольни, на устьях которых проводились исследования.

или забетонированными входами образовались отверстия относительно небольшого диаметра ($\varnothing 0,8-1,5$ м) местами суффозионно-провального, но чаще антропогенного происхождения. Эти отверстия являются основными каналами взаимодействия между шахтным пространством и атмосферой. В ходе исследований подобные отверстия были обнаружены на устьях штолен №10, №13, №21b, №27, №31 бис и шахты Восточной (рис.2). В ходе проведенных нами исследований в период с февраля по октябрь 2020 года на устьях штолен были выполнены регулярные измерения следующих показателей:

- скорости и направления воздушного потока на выходе из штолен;
- температуры и влажности воздуха;
- объемной активности радона в окружающем воздухе;
- эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе;
- мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения $\dot{H}^*(10)$;



Рис.2. Раскопанный лаз в районе устья штольни №10.

- концентрации свободного водорода (H_2) в воздухе.

Измерения проводились на высоте 1,0 м от поверхности земли на расстоянии около 3–5 м от отверстий в штольне непосредственно в потоке воздуха, выдуваемом из штолен. Положение исследуемых устьев штолен, как и простираение самих штолен в массиве и их взаимное расположение в системе Бештаугорского рудника, показано цветом на рис.1.

В то же время регулярные измерения объемной активности (ОА) и эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в открытом воздухе выполнялись в зоне выявленной ранее радоновой аномалии – участке на западном склоне горы на абсолютной высоте 850 м, где значения ППР достигали 30000 мБк/м²с и более, а ОА радона в почвенном воздухе – 166000 Бк/м³. Уточняющие структурно-геоморфологические и геологические исследования позволили сделать вывод, что выявленная радоновая аномалия приурочена к одному из узлов пересечения

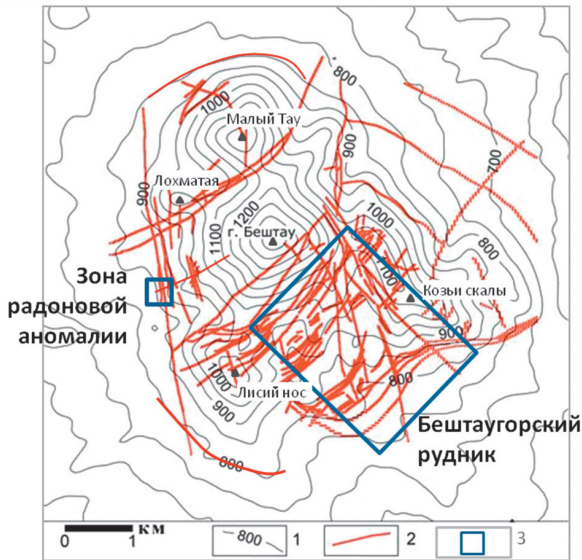
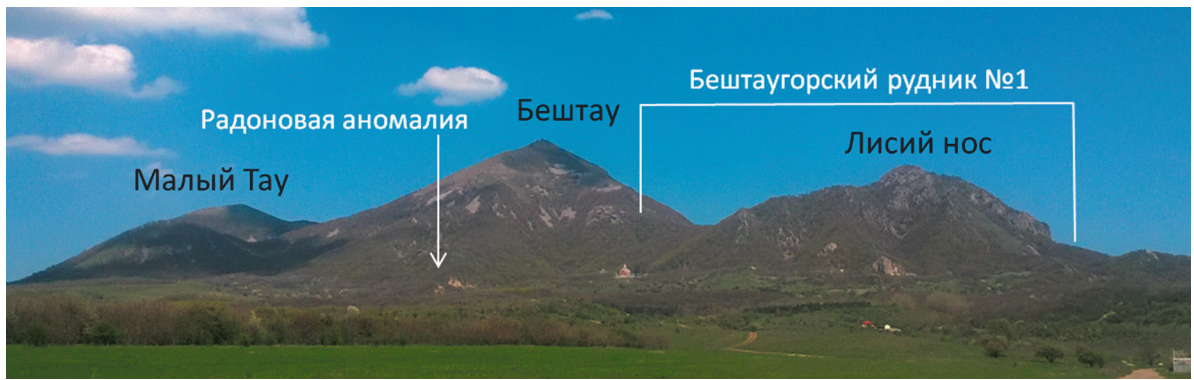


Рис.3. Расположение основной части Бештаугорского рудника №1 по отношению к выявленной ранее радоновой аномалии. Вверху – вид с запада от дороги Пятигорск – Лермонтов (Бештаугорское ш.), внизу – на Схеме разрывных нарушений Бештау (Схема по [24]): 1 – горизонтали с абсолютными высотами, 2 – разрывные нарушения, 3 – положение исследуемых объектов.

активных разрывных нарушений кольцевой системы разломов и системы северо-западного простирания. Разгрузка радона происходит в раскрытых трещинах горного массива. Выявленная радоновая аномалия природного происхождения не связана с техногенными причинами, в том числе с наличием неподалеку от участка бывшего устья глухой штольни №39, в настоящее время полностью уничтоженной взрывами и не сообщающейся с основным пространством рудника и с поверхностью земли. Хотя наличия пневматической связи между рудничным пространством и трещин-

ными зонами разлома, где обнаружена аномальная разгрузка радона, полностью исключить нельзя. Расположение исследуемой радоновой аномалии по отношению к основной части Бештаугорского рудника №1 показано на рис.3.

Измерения ОА и ЭРОА радона в воздухе проводились с помощью радиометра радона РАА-3-01 «Альфа-АЭРО». Диапазон измеряемых значений ЭРОА радона $1-10^6$ Бк/м³. Погрешность измерений 30%. Принцип действия радиометра основан на прокачке воздуха с заданной постоянной скоростью через аналитический фильтр АФА-РСП-3 и регистрации полупроводниковым детектором альфа-активности осажденных на фильтр короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) радона. При измерениях в условиях аномально высоких концентраций ДПР радона они осаждаются на детектор и могут влиять на последующие показания прибора даже в случае замены аналитического фильтра. В этой связи для измерений ЭРОА радона на устьях штолен использовалось несколько радиометров «Альфа-АЭРО». В случае регистрации аномально высоких значений ЭРОА радона в воздухе, прибор более не использовался в этот день и заменялся другим.

Измерения ОА радона и ЭРОА радона в воздухе на устьях штолен проводились на высоте 1,0 м от поверхности земли на расстоянии около 3–5 м от отверстий в штольне непосредственно в потоке воздуха, выдуваемом из штолен.

На участке радоновой аномалии измерения проводились на высоте не более 0,5 м от поверхности земли непосредственно в районе трещины, откуда происходила разгрузка радона. Измерения на радоновой аномалии проводились одновременно с измерениями на устьях штолен.

Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД ГИ) определяли с помощью портативного дозиметра ДКГ-07Д «Дрозд» и ДРГ-01Г на основе детектора Гейгера-Мюллера. Диапазон МАЭД составляет 10^{-1} – 10^3 мкЗв/ч, в диапазоне энергий 0,05–3,0 МэВ. Погрешность измерения не превышает 15% (2σ). Измерения проводились в устье штольни на высоте 0,1 м от земли.

Скорость воздушного потока определялась с помощью профессиональных анемометров ADA AeroTemp и Testo 410-2. Диапазон измерения скорости воздушного потока составляет 0,4–20 м/с; погрешность $\pm 0,2$ м/с; разрешение 0,1 м/с. Температура и влажность воздуха измерялись цифровым термоанемометром X-Line AeroTemp. Прибор позволяет измерять температуру воздуха в диапазоне

от -10 до $+45$ °С с разрешением 0,2 °С и точностью до ± 2 °С.

Для измерения объемной концентрации H_2 в воздухе использовался портативный газоанализатор ВГ-ЗБ (СКБ МИФИ, Россия). Это устройство на основе транзистора металл-диэлектрик-полупроводник, чувствительного к хемосорбции водорода, присутствующего в воздухе. Датчик калибруется производителем с использованием набора водородсодержащих воздушных смесей. Заявленные характеристики прибора: диапазон измерений 1–100 ppm H_2 , разрешение 1 ppm, относительная погрешность $\pm 5\%$. Газоанализатор питается от портативной батареи и может работать при температуре окружающей среды от -20 до $+30$ °С и относительной влажности до 90%.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений приведены на рис. 4, 5 и 6. Регулярные наблюдения показали, что на бывших устьях штолен, в отверстиях, соединяющих атмосферу с подземным пространством рудника, периодически наблюдаются мощные потоки воздуха, направленные то



Рис. 4. Средние значения скорости воздушного потока на устьевых отверстиях штолен в теплый и холодный период года в зависимости от абсолютной отметки устья (а). Объемная активность радона в воздухе на устьевых отверстиях штолен в теплый (б) и холодный (в) периоды года.

из рудника в окружающую атмосферу, то, наоборот, из атмосферы в рудник. Проведенные нами исследования показали, что направление и скорость воздушного потока определяется абсолютной высотой устья штольни и соотношением температур атмосферного и рудничного воздуха.

На рис.4 показано распределение средних значений скорости воздушного потока на устьевых отверстиях в теплый и холодный период года в зависимости от абсолютной отметки устья штолен. Положительные значения скорости соответствуют переносу воздуха из штольни в атмосферу, а отрицательные – из атмосферы в штольню. Как видно из рис.4, в холодное время (с февраля по апрель) в нижней части рудника, ниже абсолютной отметки (абс. отм.) 900 м, воздух затягивается из атмосферы в штольню, а выше 900 м воздух движется из штолен в атмосферу. В теплый период (с мая по сентябрь) картина меняется на противоположную. Такое движение воздуха в системе «рудник–атмосфера» в целом соответствует режиму естественной вентиляции рудника за счет разницы температур между

рудничным пространством и окружающим воздухом (эффект дымовой трубы). Отметка 900 м является «нулевой поверхностью», на которой давление в течение года остается постоянным и равным атмосферному. Выше и ниже этой поверхности за счет перепада температур в горном массиве периодически создаются области повышенного и пониженного давления, что приводит к движению воздуха. Проявление радоновых аномалий на устьях штолен приурочено к периодам времени, когда рудничный воздух, обогащенный радоном и его дочерними продуктами распада, движется из штолен в атмосферу. Наибольшие значения скорости движения воздуха и концентрации радона в воздухе наблюдаются на устьях штолен №10 и №216, что связано, по-видимому, с особенностями геометрии рудничного пространства и другими факторами, определяющими естественную вентиляцию рудника.

На рис.5 представлена зависимость скорости воздушного потока на устьевых отверстиях штолен №10 (абс. отм. устья 777 м) и №216 (абс. отм. устья 943 м) от температуры окружающего воздуха. Скорость переноса воздуха связана с температурой окружающей среды линейной зависимостью. Причем для штольни №216 (абс. отм. устья выше 900 м) зависимость обратная, а для штольни №10 (абс. отм. устья ниже 900 м) – прямая (положительные значения скорости переноса соответствуют движению воздуха из штолен в атмосферу, отрицательные – наоборот). Данный график позволяет с достаточно высокой степенью точности определить температурный порог, при кото-

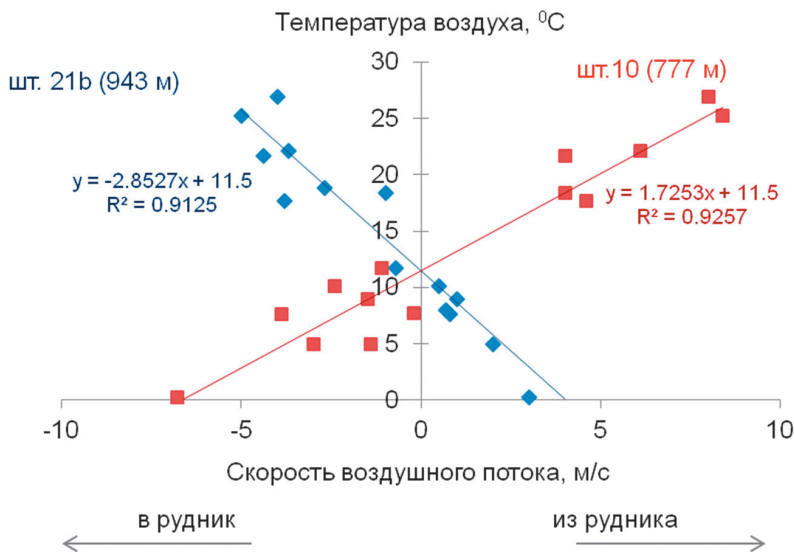


Рис.5. Зависимость скорости переноса воздуха на устьевых отверстиях штолен №10 (абс. отм. устья 777 м) и №216 (абс. отм. устья 943 м) от температуры атмосферного воздуха.

ром скорость движения воздуха на устьевых отверстиях меняет направление. Это значение $+11,5$ °С (значение, в котором прямые скорости воздушного потока пересекают ось температур). Как видно, значение соответствует среднегодовому значению температуры в руднике, оцененному по фоновым материалам [2,20]. То есть направление движения воздуха на устьях штолен определяется знаком перепада температуры между атмосферным и рудничным воздухом, а скорость движения воздуха – абсолютной величиной этого перепада. Скорость воздушного потока на уровне устьевых отверстий составляет от десятых долей м/с до 4–6 м/с. Наибольшие скорости движения воздуха наблюдались в теплый период, достигая 8,4 м/с на устье штольни №10.

На рис.6 показаны результаты регулярных измерений концентрации радона в воздухе (рис.6а), мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения (ГИ) на высоте 1 м от поверхности (рис.6б), концентрации свободного водорода H_2 в воздушном потоке (рис.6в), скорости и направления воздушного потока (рис.6г) на устьях штолен №10 (абс. отм. 777 м) и №216 абс. отм. 943 м), а также перепад температур между атмосферой и рудником (рис.6д). На рис.6а также показаны результаты измерений концентрации (ОА) радона в зоне радоновой аномалии, связанной с разломом (абс. отм. площадки 850 м).

Как видно из рис.6, изменение направления движения воздуха на устьях штолен приводит к резким колебаниям концентрации радона в воздухе локально вокруг устьев. В периоды, когда рудничный воздух дует из штолен, выброс рудничного воздуха в атмосферу обуславливает резкий рост концентрации радона, ЭРОА радона и МАЭД ГИ в воздухе в районе устьев штолен. Так, на верхних горизонтах рудника в зимнее время, когда воздух двигался из штолен в атмосферу, на участках вокруг устьев штолен наблюдались концентрации

радона 50000–383220 Бк/м³, значения ЭРОА радона от 1600 до 60000 Бк/м³, а МАЭД ГИ при этом достигала 10–15 мкЗв/ч, что приблизительно на два порядка превышает местный гамма-фон. В летнее время на участках вокруг устьев штолен нижних горизонтов, где выдувается холодный рудничный воздух, концентрации радона в воздухе в среднем составляли 100000–400000 Бк/м³ при максимальном значении 594685 Бк/м³; значения ЭРОА радона в открытом воздухе составляли от 12000 до 89000 Бк/м³, мощность дозы гамма-излучения составляла 1–18 мкЗв/ч. Как уже указывалось выше, резко повышенные значения МАЭД ГИ связаны с высокой концентрацией гамма-излучающих продуктов распада радона в струе рудничного воздуха.

Значения ОА и ЭРОА радона, а также МАЭД ГИ достаточно быстро снижаются по мере удаления от устьевых отверстий и на расстоянии 5–10 м обычно уже не превышают фоновых значений. Однако, несмотря на это, отверстия на устьях штолен, несомненно, могут быть причиной повышенного внешнего и внутреннего облучения населения, учитывая рекреационную привлекательность этих мест для жителей окрестных населенных пунктов и гостей курортов. Особенно это касается штолен нижних горизонтов рудника, расположенных часто недалеко от кольцевой бештаугорской дороги, в местах доступных для туристов и характеризующихся выбросом радона и его ДПР летом, в разгар курортного сезона.

Результаты измерений в районе ранее выявленной на западном склоне Бештау радоновой аномалии, связанной с разломом (абс. отм. аномальной зоны 850 м), показали, что концентрация радона в воздухе в зоне разлома также испытывает аномальные сезонные колебания (рис.6а). Результаты многолетнего радонового мониторинга, полученные нами ранее, показывают, что аномальные сезонные колебания плотности потока радона, а также

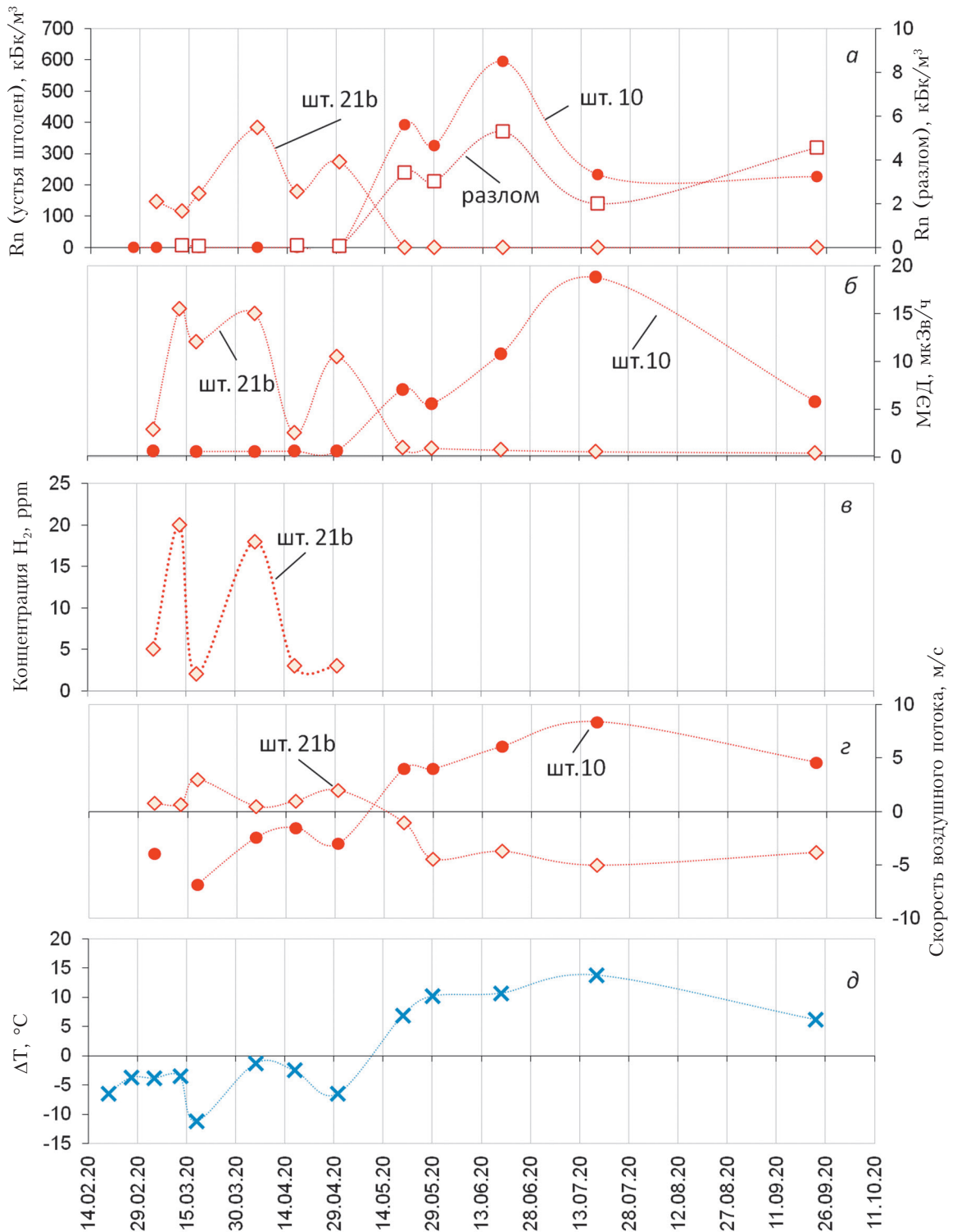


Рис. 6. Результаты регулярных измерений концентрации радона (а), мощности дозы гамма-излучения (б), концентрации свободного водорода (в), скорости и направления воздушного потока (г) и перепада температуры между атмосферой и рудником $\Delta T = T_{\text{в}} - T_{\text{руд}}$ (д) на устьях штолен №10 и №21б, а также на радоновой аномалии в зоне разлома.

концентрации радона в подпочвенном газе и в атмосферном воздухе с максимумами летом и минимумами зимой регистрируются в данной зоне постоянно в течение 4 лет [26]. Плотность потока радона с поверхности грунта в летние сезоны 2017–2019 годов составляла 4500–23800 мБк/м²с, при этом концентрации радона в открытом воздухе на аномальном участке достигали 2000–8000 Бк/м³, что превышает местный фон в 100 раз. Результаты синхронных измерений концентрации радона на устьях штолен рудника и в зоне радоновой аномалии, связанной с разломом, показывают наличие тесной корреляции между этими показателями (рис.6а). Причем для устьев штолен нижних горизонтов рудника (абс. отм. ниже 900 м) эта зависимость прямая, а для верхних горизонтов – обратная. Коэффициент корреляции между концентрацией радона в зоне разлома и на устьях штолен составил для штольни №10 (абс. отм. 777 м) и штольни №216 (абс. отм. 943 м), соответственно, +0,91 и –0,83. Резкий весенний рост концентраций радона в зоне радоновой аномалии, как и на устьях штолен, связан с изменением направления движения потока воздуха (газа), переносающего радон, и наблюдается в момент, когда температура атмосферного воздуха становится выше температуры горного массива. Все это свидетельствует об аналогичном механизме формирования радоновой аномалии в зоне тектонического разлома и на устьях штолен Бештаугорского рудника №1.

Интересные результаты были получены в ходе измерений концентрации молекулярного водорода (H₂) на устьях штолен и на радоновой аномалии в зоне разлома. Измерения концентрации водорода в потоке воздуха проводились на устьях всех исследуемых штолен, а также в зоне радоновой аномалии в течение всего периода наблюдений. Однако значимые концентрации водорода (от 3–5 до 20 ppm) были зафиксированы только в зимний период

и только на устьях штолен верхнего горизонта рудника, выше абс. отм. 900 м (рис.6в). Во всех других случаях концентрации водорода оставались стабильно ниже предела обнаружения газоанализатора ВГ-ЗБ (менее 1 ppm). Имеющиеся в литературе данные по уровням выделения водорода в Ловозерском массиве (Кольский п-ов) показывают, что значения концентрации H₂ от 1 до 7 ppm соответствуют фоновым уровням выделения водорода из недр в трещинных зонах магматических массивов; значения от 10 до 60 ppm обусловлены, как правило, колебаниями атмосферного давления, существенные аномальные всплески выделения водорода характеризуются концентрациями до 300 ppm [27]. То есть зарегистрированные концентрации водорода на устьях штолен верхних горизонтов Бештаугорского рудника являются фоновыми или немного повышенными относительно фона. Таким образом, свободный водород в концентрациях, близких к фоновым, фиксируется в восходящих потоках воздуха, разгружающегося из штолен верхнего горизонта зимой. При этом водород отсутствует в нисходящих потоках воздуха, разгружающегося у основания склонов летом. Судя по всему, водород глубинного происхождения затягивается из зон разломов и попадает в рудничный воздух при формировании в горном массиве восходящих конвективных потоков зимой. Отсутствие водорода в воздухе, разгружающемся из массива летом, свидетельствует о том, что это воздух атмосферного происхождения.

Как сказано выше, процесс конвективной циркуляции воздуха активизируется в проницаемых зонах за счет разницы температур между горным массивом и окружающей атмосферой при наличии перепада высот. Схематически перенос радона и других газов с конвективными потоками в массиве горы Бештау показан на рис.7. Зимой воздух в горном массиве (в столбе А-А') более теплый и легкий, чем

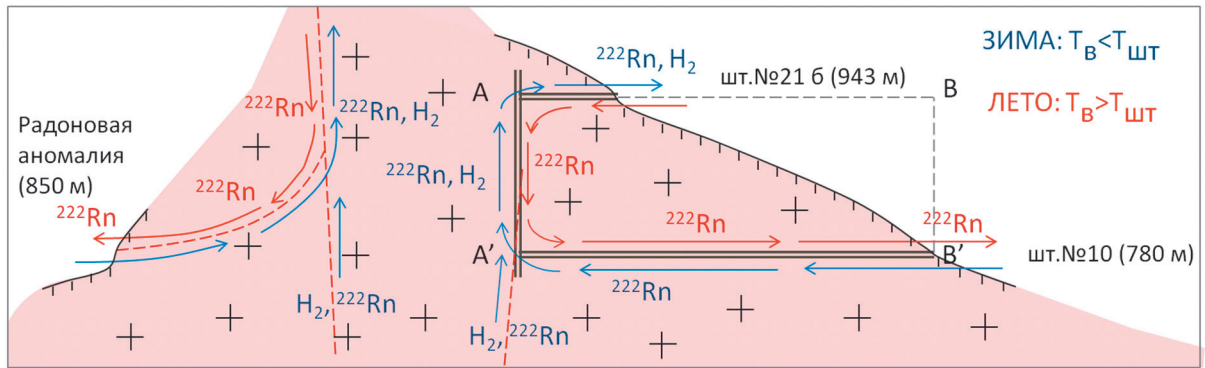


Рис. 7. Схема конвективной циркуляции атмосферного воздуха в пронизываемых зонах горного массива Бештау. Синими стрелками показано движение воздушных потоков зимой, красными – летом.

в атмосфере (в столбе В-В'), благодаря чему воздух в массиве поднимается вверх и разгружается в атмосферу в верхней части горы на устьях штолен верхних горизонтов рудника или в местах выхода на поверхность зон разломов. Возникшее при этом разрежение (область пониженного давления) в нижней части склона (ниже отметки 900 м) компенсируется за счет затягивания в массив воздуха из атмосферы. Летом температура воздуха в атмосфере становится выше, чем в горном массиве (столб А-А' становится тяжелее, чем В-В'). В результате направление движения воздуха в массиве меняется на противоположное: более холодный воздух в горном массиве опускается вниз и разгружается в окружающую атмосферу на устьях штолен нижнего горизонта и в местах выхода на поверхность зон повышенной трещиноватости, связанных с разломами. В это время в верхней части склона в массив затягивается атмосферный воздух, компенсируя образующееся разрежение. Атмосферный воздух, проходя через горный массив, обогащается радоном, что приводит к формированию аномальных сезонных вариаций радона на склонах в местах выхода циркулирующих воздушных потоков на поверхность земли. В верхней части склонов образуются области с аномально высокими значениями уровней радона зимой и низкими летом, а в нижней части склонов, наоборот, – с аномально

высокими летом и низкими зимой. Так как температура грунтового массива в течение года в известной степени постоянна или меняется незначительно, изменение абсолютной величины и направления градиента температуры между массивом и атмосферой полностью определяется колебаниями температуры атмосферного воздуха. Кроме того, в зимнее время, когда в массиве формируются восходящие потоки воздуха, возможно, происходит подтягивание глубинных газов, в том числе, молекулярного водорода из зон разломов. Летом в нисходящих воздушных потоках, разгружающихся у основания склонов, водород отсутствует, что свидетельствует о полностью атмосферном происхождении газов.

Исходя из полученных данных, можно предположить существование нескольких типов сезонных радоновых аномалий в пронизываемых зонах:

- 1) с максимальными значениями уровней радона летом и минимальными зимой («нижние» аномалии);
- 2) с максимальными значениями зимой и минимальными летом («верхние» аномалии);
- 3) аномалии, где летние и зимние максимумы не повторяются четко из года в год, а могут меняться в многолетнем тренде.

Последний тип аномалий возможен в случае, если пронизываемая зона выходит на дневную поверхность на абсолютных отметках

близких к «нулевой поверхности» (для Бештау – 900 м). Абсолютная высота «нулевой поверхности» может изменяться во времени в зависимости от климатических или иных факторов, в результате чего положение трещиноватой зоны относительно «нулевой поверхности» может меняться, вызывая изменение типа радоновой аномалии.

Интересно отметить, что по результатам, пожалуй, наиболее длительных и обширных исследований выделения радона в зоне разломов, проведенных в Калифорнии (США) в 70–80 годах 20 века, были также зафиксированы три перечисленных выше типа сезонных колебаний концентрации радона в почвенном газе [17]. Долговременный радоновый мониторинг проводился в течение нескольких лет в 60 точках, расположенных вдоль сегмента разлома Сан-Андрес длиной 380 км. Глубина расположения зондов составляла 70 см. По результатам этих исследований также было выделено три типа участков с сезонными колебаниями радона: с максимумами летом, с максимумами зимой и с проявлением в разные годы то зимних, то летних максимумов. Авторы [17] традиционно объясняли радоновые аномалии в зоне разлома дегазацией недр, а сезонные колебания радона изменением влажности и, соответственно, проницаемости пор и трещин в зимний период за счет заполнения их водой. Разные типы сезонных колебаний авторы попытались объяснить разной скоростью инфильтрации зимних осадков на глубину детектирования (70 см) в почвах с различной проницаемостью. Предполагалось, что в слабопроницаемых почвах инфильтрующиеся зимние осадки достигают глубины детектирования только весной – в начале лета, что и вызывает резкое снижение уровней радона в летний период. Однако подобное объяснение не выглядит убедительным. Проницаемость почв изменяется непрерывно в широком диапазоне, следовательно, инфильтрующиеся

осадки могут достигать глубины детектирования не обязательно именно весной. Различия в проницаемости почв должны были бы вызывать непрерывный спектр разных временных колебаний радона, а не два–три четких типа. Кроме того, выдвинутое авторами предположение не объясняет корреляцию уровней радона с температурой воздуха. Очевидно также, что в случае зависимости от влажности почв сезонные колебания радона могут наблюдаться только на территориях с влажной зимой и жарким сухим летом. Однако совершенно аналогичные высокоамплитудные сезонные колебания радона были зафиксированы и в резко отличных климатических условиях. Например, в Прибайкалье, где наиболее влажный период приходится на лето, а зимой выпадает очень небольшое количество осадков в виде снега [1,2,20]. Аналогичные сезонные колебания радона зафиксированы и в пустыне, в районе Мертвого моря, где осадки в течение года практически отсутствуют вовсе, и влажность почв в течение года не меняется [11].

Обращает на себя внимание тот факт, что зафиксированные в зоне разлома Сан-Андрес типы сезонных колебаний радона аналогичны тем, что обнаружены нами на устьях штолен Бештаугорского рудника, и могут быть более успешно объяснены описанным выше процессом конвективной циркуляции атмосферного воздуха в зоне разлома. Данный механизм позволяет непротиворечиво объяснить и наличие нескольких типов сезонных колебаний с максимумами в разное время года, и резкую перестройку радонового поля весной и осенью, и тесную корреляцию уровней радона с температурой воздуха. Однако в работах, посвященных исследованию радонового поля тектонических разломов, этот механизм, как правило, упускается из виду. Во многом это объясняется существованием стереотипных взглядов, согласно которым радоновые аномалии, связанные с активными разломами,

обусловлены исключительно восходящими глубинными газовыми потоками, разгружающимся в зонах разломов из недр Земли. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что конвективная циркуляция атмосферного воздуха в проницаемых зонах земной коры может быть универсальным механизмом, обуславливающим наблюдаемое «дыхание» горных массивов в самых различных условиях и в проницаемых зонах самой разной природы.

Заключение

На устьях штолен бывшего Бештаугорского рудника на нижних и на верхних горизонтах рудника были проведены одновременные измерения концентрации радона в воздухе и скорости и направления движения воздуха. Одновременно определялись уровни радона на «аномальной» площадке, расположенной в зоне тектонического разлома. Полученные данные свидетельствуют о формировании на устьях штолен мощных сезонных радоновых аномалий, связанных с периодическим выбросом рудничного воздуха из штолен в атмосферу. Сезонная разгрузка рудничного воздуха происходит за счет естественной конвективной вентиляции рудника, инициированной перепадом температуры между горным массивом и атмосферой. На устьях штолен, расположенных на абсолютных отметках ниже

900 м, зимой воздух затягивается в штольни, а летом разгружается из штолен в атмосферу, формируя мощные «летние» радоновые аномалии. На устьях штолен, расположенных выше 900 м, происходит обратный процесс с формированием «зимних» радоновых аномалий. На устьях штолен, расположенных в районе абс. отм. 900 м, аномалии проявлены слабее и могут проявляться как летом, так и зимой, что, по-видимому, связано с нестабильным положением «нулевой поверхности». Выброс значительных концентраций радона и его дочерних продуктов распада приводит к резкому и существенному повышению мощности дозы гамма-излучения локально вокруг устьев штолен. Эти факты делают заброшенные устья штолен объектами повышенного радиационного риска. Особенно это касается штолен нижних горизонтов, наиболее доступных для туристов в летнее время. Синхронные измерения концентрации радона на устьях штолен и в зоне радоновой аномалии, связанной с тектоническим разломом расположенной на западном склоне горы Бештау, показывают, что формирование радоновых аномалий и сезонные колебания концентрации радона в обоих случаях обусловлены одним и тем же процессом. Этот процесс – естественная циркуляция воздуха в проницаемых зонах горного массива за счет перепада температур между горным массивом и атмосферой.

Литература

1. Микляев П.С., Цапалов А.А., Маренный А.М., Лопатин М.Н., Мясников А.А., Фарафутдинов В.Т., Петрова Т.Б. Результаты мониторинга радонового поля в зоне активного тектонического разлома в Байкальской рифтовой зоне // АНРИ. 2016. № 3(86). С. 19-33.
2. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. О генезисе радоновых аномалий в зонах разломов // АНРИ. 2020. № 1(100). С. 3-15.
3. M. Alvarez-Gallego, E. Garcia-Anton, A. Fernandez-Cortes, S. Cuezva, S. Sanchez-Moral, «High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castanar cave, Spain)», *Journal of Environmental Radioactivity*, no. 145, pp. 19-29, 2015.

4. E. Tchorz-Trzeciakiewicz, T. Parkitny, «Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the Underground Tourist Route “Coal Mine” (SW Poland)», *Journal of Environmental Radioactivity*, no. 149, pp. 90-98, 2015.
5. L. Fijakowska-Lichwa, «Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland)», *Journal of Environmental Radioactivity*, no. 135, pp. 25-35, 2014.
6. L. Fijakowska-Lichwa, «Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned uranium mine ‘Podgorze’ in Kowary (Sudety Mts., Poland)», *Journal Environ. Radioact.* no. 165, pp. 13-23, 2016.
7. L. Fijakowska-Lichwa, «The assessment of lining structure impact on radon behaviour inside selected underground workings under the cour d'honneur of Ksiaz castle», *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, no. 326, pp. 1199-1211, 2020.
8. R. Kleinschmidt, D. Watson, M. Janik, G. Gillmore, «The presence and dosimetry of radon and thoron in a historical, underground metalliferous mine», *Journal of Sustainable Mining*, no. 17, pp. 120-130, 2018.
9. C. Pla, A. Fernandez-Cortes, S. Cuezva, J.J. Galiana-Merino, J.C. Cacaveras, S. Sanchez-Moral, D. Benavente, «Insights on Climate-Driven Fluctuations of Cave ^{222}Rn and CO_2 Concentrations Using Statistical and Wavelet Analyses», *Geofluids*, vol. 2020.
10. F. Ambrosino, L. Thinova, M. Briestensky, C. Sabbarese, «Study of ^{222}Rn continuous monitoring time series and dose assessment in six European caves», *Radiation Protection Dosimetry*, no. 191-2, pp. 233-237, 2020.
11. H. Zafrir, S. Barbosa, E. Levintal, N. Weisbrod, Y. Ben Horin, Z. Zalevsky, «The Impact of Atmospheric and Tectonic Constraints on Radon-222 and Carbon Dioxide Flow in Geological Porous Media – A Dozen-Year Research Summary», *Front. Earth Sci*, doi: 10.3389/feart.2020.559298, 2020.
12. H. Arvela, A. Voutilainen, T. Honkama, A. Rosenberg, «High indoor radon variations and the thermal behaviour of eskers», *Health Phys.*, no. 67, pp. 254-260, 1994.
13. R. Lefebvre, B. Lahmira, W. Lobner, «Atmospheric control of radon emissions from a waste rock dump», *Environmental Geotechnics*, no. 6(6), pp. 381-392, 2019.
14. 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.
15. P. Schmidt, «Proof of the radiological remediation success at former uranium mining and milling sites (WISMUT sites) in Germany». In: 4th Europ. IRPA Congr. Geneve, Switzerland. June 23-27, 2014.
16. 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.
17. C.Y. King, A. Minissale, «Soil variability of soil-gas radon concentration of Cenrtal California», *Radiat. Meas.*, no. 23(4), pp. 683-692, 1994.
18. B. Zmazek, M. Zivcic, J. Vaupotic, M. Bidovec, M. Poljak, I. Kobal, «Soil radon monitoring in the Krsko Basin, Slovenia», *Appl. Radiat. Isot.*, no. 56, pp. 649-657, 2002.
19. 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.
20. P.S. Miklyaev, T.B. Petrova, A.M. Marennyy, D.V. Shehitov, P.A. Sidyakin, M.A. Murzabekov, M.N. Lopatin, «High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions)», *J. Environ. Radioact.*, no. 219, pp. 106-271, 2020.
21. Ll. Font, C. Baixeras, V. Moreno, J. Bach, «Soil radon levels across the Amer fault», *Radiat. Meas.*, no. 43, pp. 319-323, 2008.

22. 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. Radioact.*, no. 151, pp. 293-303, 2016.
23. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: Изд-во ВИМС, 2010. 850 с.
24. 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.
25. Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С. Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз» // Радиация и риск. 2009. № 4. С. 73-81.
26. P.S. Miklyaev, T.B. Petrova, D.V. Shchitov, P.A. Sidyakin, M.A. Murzabekov, A.M. Marennyu, N.A. Nefedov, Y.A. Sapozhnikov, «The results of long-term simultaneous measurements of radon exhalation rate, radon concentrations in soil gas and groundwater in the fault zone», *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 167, pp. 109-460, 2021.
27. Нивин В.А., Пуха В.В., Ловчиков А.В., Рахимов Р.Г. Особенности и факторы временных вариаций выделения водорода на Ловозерском редкометальном месторождении (Кольский полуостров) // Геохимия. 2018. № 7. С. 661-675.

Dynamics of Radon Emission from the Adits of the Former Uranium Mine on the Mount Beshtau

Miklyaev Petr^{1,2}, Petrova Tatiana³, Shchitov Dmitry⁴, Sidyakin Pavel⁴, Tsebro Dmitriy⁴

¹ Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Moscow, Russia

² Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Moscow, Russia

⁴ North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Branch, Engineering Faculty, Department of Construction, Pyatigorsk, Russia

Abstract. This article presents the results of monitoring measurements of radon concentration in the air, the gamma dose rate, as well as the velocity and direction of air movement at the adit mouths of the former Beshtaugorsky mine No.1 (Mount Beshtau). The data obtained indicate the very powerful seasonal radon anomalies at the adit mouths associated with the periodic release of mine air from the tunnels into the atmosphere. During mine air discharge, radon concentrations in the open atmosphere locally around the adit mouth reach 594,685 Bq/m³, averaging 50000–250000 Bq/m³. The equivalent equilibrium concentration of radon in the air ranges from 1600 to 80000 Bq/m³. The release of significant concentrations of radon and its progeny leads to significant increase in the dose rate of gamma radiation locally around the adit mouth to values of 1–18 mSv/h. This means that abandoned adit mouths are objects of increased radiation risk. Comparison of the results of measurements of radon concentration at the adit mouths and in the zone of a natural radon anomaly associated with a tectonic fault shows that radon emissions in both cases are caused by a single process – air circulation in permeable zones of the rock massif due to the temperature difference between the mountain range and the atmosphere.

Key words: *radon, seasonal radon fluctuations, uranium ore deposits, ventilation of mine workings.*

П.С.Микляев (д.г.-м.н, профессор РАН, зам.директора по научной работе) – Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва; (с.н.с) – ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, г. Москва;

Т.Б.Петрова (к.т.н., с.н.с) – МГУ им. Ломоносова, химический факультет, кафедра радиохимии, г. Москва;

Д.В.Щитов (к.т.н, зав.каф.), П.А.Сидякин (профессор, к.т.н.), Д.Н.Чебро (студ.) – СКФУ, Пятигорский филиал, инженерный факультет, кафедра строительства, г. Пятигорск.

Контакты: тел. +7 (495) 623-31-11; e-mail: peterm7@inbox.ru.