

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШАЮЩИХСЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ВАРИАЦИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА

© 2013 г. В. Т. Беликов, И. А. Козлова, Д. Г. Рывкин, В. И. Уткин, А. К. Юрков

*Институт геофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
E-mail: belik2a@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.03.2013 г.

Исследованы процессы выделения радона при разрушении образцов горных пород. Предложена физическая модель, описывающая указанные процессы, разработаны методы количественной интерпретации данных радоновых измерений. Полученный экспериментальный материал позволил оценить степень развития процессов разрушения в зависимости от величины относительного изменения открытой пористости и удельной внутренней поверхности образца горной породы.

Ключевые слова: *горная порода, разрушение, радон, пористость, удельная внутренняя поверхность.*

ВВЕДЕНИЕ

Процессы разрушения изменяют условия миграции радона в геосреде, приводя к его перераспределению между трещинной и твердой фазами горной породы. Анализ экспериментальных данных, а также количественные оценки показывают, что наблюдающиеся высокоамплитудные (превышающие фон на порядок и более) аномалии концентрации радона непосредственно связаны с деструктивными процессами [3, 6, 7]. Эти аномалии несут в себе информацию об изменении структурно-петрофизических характеристик разрушающихся горных пород и могут являться предвестниками горных ударов и землетрясений [7]. Следует заметить, однако, что не всегда процессы разрушения в горной породе приводят к катастрофическим событиям. Нередко за появлением аномалии концентрации радиогенного газа, свидетельствующей о деструктивных процессах в геосреде, катастрофическое событие не наступает. С этой точки зрения, количественная интерпретация временных аномалий концентрации радона позволяет полнее изучить характер протекания процессов разрушения в горных породах, а также проанализировать причины и условия, влияющие на осуществление того или иного режима их развития. В работах [2–4] была разработана количественная физическая модель и построена система уравнений для описания миграции радона в разрушающейся трещиновато-пористой среде (ТПС), а также предложен механизм образования высокоамплитудных аномалий его концентрации. Основой

модели является предположение о том, что в сообщаемое (открытое) трещиновато-пористое пространство (из которого берутся пробы газа на анализ) включаются содержащие радон отдельные поры и трещины, а также их группы в областях горного массива (блоках), которые до разрушения были изолированы. Кроме того, вскрываются отдельные фрагменты (зерна) горной породы с отличиями от вмещающей среды физическими характеристиками, в том числе, с повышенной способностью генерировать радон. С использованием предложенной модели были разработаны алгоритмы для количественной интерпретации экспериментальных данных по вариациям концентрации радона. Их практическое применение, дало возможность изучать относительные временные изменения открытой пористости и удельной внутренней поверхности (УВП) разрушающейся горной породы, определять пространственно-временные характеристики очага разрушения [2, 4]. С целью проверки разработанной модели образования радоновых аномалий, а также уточнения ряда ее аспектов были проведены лабораторные эксперименты по изучению процессов эманации радона при разрушении образцов горных пород. Подобного рода работы уже предпринимались [10, 11], однако количественная интерпретация полученных результатов не проводилась. Поэтому цель исследований состояла в том, чтобы, с одной стороны, изучить механизмы выделения радона из образца по мере увеличения внешней нагрузки, с другой, – оценить величину изменения структурно-петрофизических характеристик горной породы в процессе разрушения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе проведения экспериментов, отобранные образцы подвергались одноосному сжатию, вплоть до разрушения. При такой схеме нагружения существенных осложнений при измерении объемной активности радона (ОАР) не возникало. Образцы имели цилиндрическую форму, а по минералогическому составу представляли собой эффузивные породы – аналоги гранитов и диоритов с пористостью 3–8%. Лабораторная установка состояла из герметичного устройства сильфонного типа, позволяющего реализовать циркуляционную схему измерения ОАР, а также производить смену образцов. В качестве регистратора использовался AlphaGuard PQ200 PRO. Циркуляция воздуха в установке осуществлялась насосом из комплекта данного прибора. После помещения образца в установку, в ней в течение четырех суток происходило накопление радона за счет его эманирования из испытуемого образца. Далее включалась измерительная схема в циркуляционном режиме и в течение 3–4 суток выполнялись фоновые измерения без внешней нагрузки. Величина интервалов изменения последней определялась, исходя из предела прочности горной породы, полученного в холостом опыте с образцом той же горной породы из того же интервала глубин. Обычно нагрузка увеличивалась до разрушающей 2–3 раза. После каждого ее увеличения, измерения продолжались в течение 1–2 суток, а после разрушения образца – в течение 3–4 суток. Ступенчатый

характер изменения внешней нагрузки был обусловлен технологическими особенностями используемого гидравлического пресса. Динамика трещинообразования вплоть до разрушения контролировалась наблюдениями сигналов акустической эмиссии (АЭ) с помощью двухканального регистратора динамической активности, датчики которого располагались на испытываемом образце и станине гидравлического пресса, что давало возможность учесть внешние помехи.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 представлен временной фрагмент результатов наблюдений ОАР для одного из образцов, характеризующий ее изменение при возрастании нагрузки, вплоть до разрушающей. В данном случае потребовалось поднимать внешнюю нагрузку всего лишь два раза, практически сразу же после второго ее увеличения образец разрушился. Как видно из представленного графика, по мере увеличения сжатия до момента разрушения образца в 10 час. 40 мин. 26.10.2011 г. ОАР варьирует около некоторого среднего значения. После разрушения образца возникает аномалия (скачок) ОАР в измерительной камере. Далее активность радона падает. Значимого уменьшения ОАР перед разрушением образца не наблюдается. Физическая модель для объяснения такого характера изменения ОАР может быть описана следующим образом. Приложен-

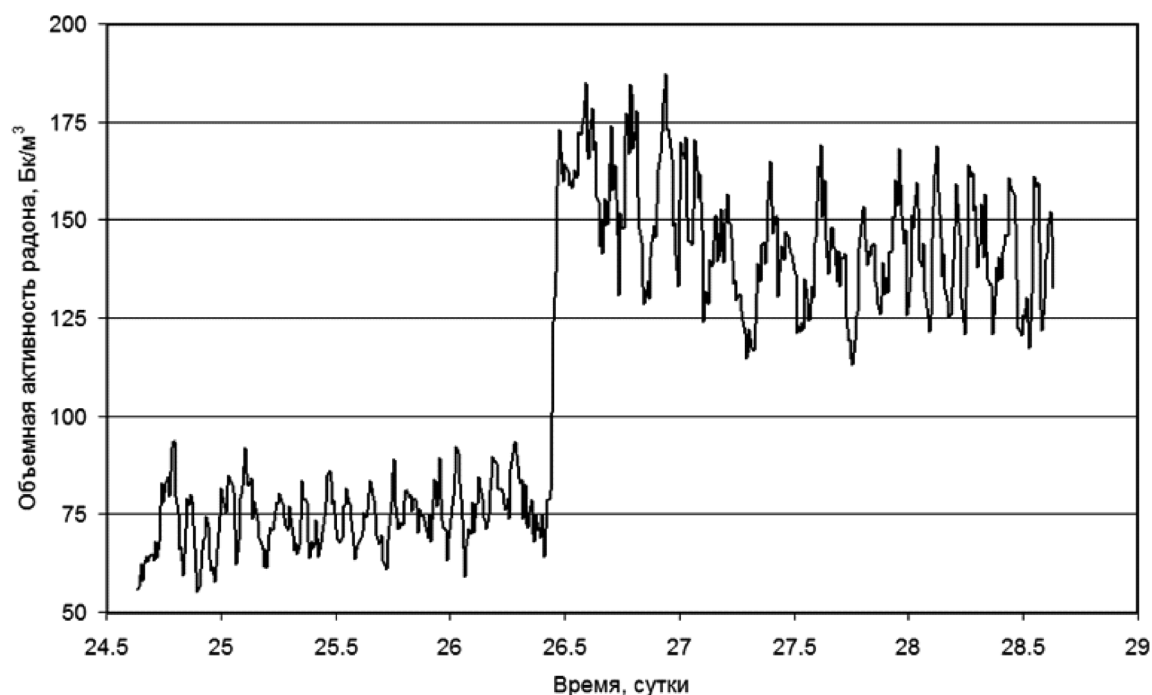


Рис. 1. Фрагмент временных изменений ОАР при разрушении образца горной породы.

Время отсчитывается от 0 часов 1 октября 2011 года.

ная нагрузка стимулирует в образце горной породы процессы трещинообразования. Причем, за счет концентрации упругих напряжений в окрестности трещин и зерен горной породы, они могут начаться при нагрузках, меньших разрушающей. Согласно положениям кинетической теории прочности [8], в процессе разрушения сначала возникают микроскопические трещины, которые затем, в результате роста и слияния образуют трещины макроскопических размеров. Последние, в свою очередь, при объединении формируют магистральную трещину, разделяющую образец на части. С точки зрения перераспределения радона в породе, важно отметить, что в процессе разрушения будут образовываться участки (области) проницаемого или открытого трещиновато-пористого пространства (ТПП), так называемые открытые поры [2], сообщающиеся как с указанными макроскопическими трещинами, так и с поверхностью образца. В этих областях в ТПП будет поступать радон из изолированных до разрушения отдельных пор и трещин. При этом важно подчеркнуть, что равновесная концентрация радона в изолированных до разрушения порах (в силу того, что они могут находиться во включениях с повышенной способностью генерировать радон) может значительно превышать ее значение для открытых пор. В результате, в проницаемом ТПП концентрация радона станет повышенной, по сравнению с той, которая была до начала процессов разрушения. После образования макроскопических трещин давление в них в течение некоторого промежутка времени будет меньше, чем в проницаемом пространстве указанных областей. Поэтому, под действием возникшего градиента давления в направлении этих трещин будет происходить конвективное движение газообразного флюида вместе с содержащимся в нем радоном. В результате, перед разрушением образца количество радона в макроскопических трещинах существенно возрастет. Причем, в силу того, что образование магистральной трещины происходит за промежуток времени, малый, по сравнению с длительностью всего процесса разрушения [8], диффузия и естественный распад не успевают значительно снизить концентрацию радона в макроскопических трещинах до момента деления образца на части. Таким образом, макроскопические трещины аккумулируют из горной породы, выделившийся в результате процессов разрушения радон, посредством его конвективного сбора по проницаемым участкам ТПП. Иными словами, эти трещины, в какой-то степени, играют роль искусственно создаваемой полости [6, 12], которая обычно используется для регистрации радона в горных массивах. Накопленное в макроскопических трещинах повышенное количество радона, после разрушения образца практически мгновенно попадает в камеру регистрации. В результате появляется аномалия ОАР, наблюдаю-

щаяся 26.10.2011 г. (рис. 1). Левая часть кривой (до указанной выше даты) характеризует динамику изменения ОАР в образце перед разделением его на части. Величина ОАР в камере регистрации в этот период времени определяется тем, что проницаемые зоны ТПП выходят и на поверхность образца. Правая часть кривой (после скачка) описывает характер изменения ОАР в измерительной установке в процессе циркуляции. Обращает на себя внимание тот факт, что после выброса радона, концентрация его уменьшается не так быстро, как должно быть в соответствии с законом естественного распада. Связано это, по-видимому, с тем, что продолжается подвод радона по проницаемым зонам к поверхностям скола частей разрушенного образца. Представленные на рис. 1 данные показывают, что в условиях лабораторных экспериментов, по крайней мере, с образцами данного вещественного состава и выбранной скоростью увеличения нагрузки, не удается получить временную развертку радоновой аномалии, с регистрацией участков роста и падения концентрации, как при радоновом мониторинге в естественных условиях [6, 12]. Поэтому в данном случае мы не имеем возможности изучать временные относительные изменения открытой пористости и УВП в процессе разрушения, как при количественной интерпретации высокоамплитудных радоновых аномалий, зарегистрированных при наблюдениях в горных массивах [2]. По результатам проведенных экспериментов можно сделать лишь оценку относительного изменения указанных параметров за период времени от начала процессов разрушения до момента деления образца на части. Говоря о величине зарегистрированного скачка ОАР, необходимо отметить, что в природных условиях наблюдаются аномалии с амплитудой, превышающей фоновое значение на порядок и более [12]. В данном случае ОАР увеличивается в момент разрушения образца чуть больше, чем в 2 раза. Это обусловлено, по-видимому, тем, что, с одной стороны, содержание радона в изолированных порах данной горной породы относительно невелико, с другой, — тем, что область его сбора в лабораторных условиях, мала по сравнению с той, которая существует в природе. Согласно [4], область зондирования радоновым мониторингом в геосреде может достигать размеров порядка сотни метров. Следует отметить существенную зависимость амплитуд возникающих аномалий не только от размеров области сбора радона, но и от состава горной породы. Например, для одного из образцов (другого вещественного состава и тех же размеров) была зарегистрирована аномалия ОАР, с амплитудой, превышающей фоновые значения почти в 6 раз.

Рассмотрим вопрос об изменении открытой пористости и УВП образца горной породы к моменту деления его на части. Используя решение уравнений, описывающих миграцию радона в разруша-

ющейся ТПС, можно определить его концентрацию и поток, а также общее его количество, поступившее в макроскопические трещины, а затем и в установку после разрушения образца [2, 3]. Это количество радона определяется скачком его объемной активности 26.10.2011 г. (рис. 1). Уравнение, описывающее баланс радона в момент разрушения образца, следующее из соотношений, полученных в [2], имеет вид:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{a\gamma\tau}{\gamma\tau + 1} \left[e^{\gamma(t_p - t_0)} - e^{-\frac{t_p - t_0}{\tau}} \right] + \frac{1}{\nu\tau + 1} \left[e^{\nu(t_p - t_0)} + \nu\tau e^{-\frac{t_p - t_0}{\tau}} \right], \quad (1)$$

где τ – среднее время жизни атомов радона, P – его количество, поступившее в измерительную камеру после разрушения образца, P_0 – количество радона в камере до разрушения образца, t_p – момент времени, когда происходит его разрушение (26.10.2011 г.), t_0 – время начала процессов разрушения в горной породе. Параметр $a = C_0\varphi_0/C_\Phi = A_0\varphi_0/A_\Phi$, где C_Φ – фоновая концентрация радона в открытых порах до разрушения [2], C_0 – равновесная концентрация радона в изолированных порах и скелете горной породы, A_0 – экспериментальное значение ОАР в образце горной породы, A_Φ – фоновая ОАР в открытых порах до разрушения, φ_0 – значение открытой пористости образца горной породы в момент времени t_0 . Величины γ и ν характеризуют среднюю за промежуток времени $t_p - t_0$ скорость относительного изменения открытой пористости и УВП, соответственно [2]. В уравнении (1) в качестве неизвестных рассматривались величины γ и ν , параметры P , P_0 , a , t_p , t_0 считались заданными. Изменение открытой пористости $\varphi_{от}$ и УВП Ω открытого пористого пространства, в соответствии с [2], можно определить из соотношений

$$\varphi_{от} = \varphi_0 e^{\gamma(t_p - t_0)}; \quad \Omega = \Omega_0 e^{\nu(t_p - t_0)}, \quad (2)$$

где Ω_0 – значение УВП в момент времени t_0 . Задавая значение одной из величин γ или ν , из соотношения (1) можно однозначно определить другую. Для изучения особенностей изменения какой-либо из них в зависимости от значения другой, а также характера соответствующих изменений $\varphi_{от}$ и Ω , был рассмотрен ряд вариантов численного решения трансцендентного уравнения (1) при значениях параметров P , P_0 , a , t_p , t_0 , соответствующих экспериментальным. При этом учитывалось, что скорость относительного изменения открытой пористости по своему физическому смыслу всегда положительна [2, 3], в то же время скорость относительного изменения УВП может быть и меньше нуля [2, 5]. В процессе разрушения такая ситуация возникает в том случае, когда происходит укрупнение и слияние трещин [2]. Исходные данные для расчетов были следующими: $P/P_0 = 2.05$; $t_p = 26.44$ сут.; $t_0 = 19.30$ сут.; $C_0/C_\Phi = A_0/A_\Phi = 6931$; $\varphi_0 = 0.04$; $a = 277.2$. Относительно принятых нами значений величин t_0 и P/P_0

Таблица 1.

$\gamma \cdot 10^4$, сут ⁻¹	2	5	8	11	14	15.5
ν , сут ⁻¹	0.165	0.114	0.045	-0.066	-0.338	-1.284
$\varphi_{от}/\varphi_0$	1.0014	1.0036	1.0057	1.0079	1.0100	1.0111
Ω/Ω_0	3.237	2.264	1.379	0.622	0.090	0.000

Примечание. Объяснения см. текст.

необходимо отметить следующее. Обычно сигналы дискретной АЭ, свидетельствующие о происходящих в материале процессах трещинообразования и роста трещин, возникают при нагрузке, равной примерно 50–70% от разрушающей [1]. Мы выбрали величину t_0 , исходя из того, что в этот момент времени нагрузка составляла 75% от той, при которой произошло разрушение образца. При вычислении частного P/P_0 мы считали, что оно совпадает с отношением средних ОАР, соответственно, после и до разрушения образца. Первую величину, мы получали усреднением по временному интервалу на порядок меньшему, чем среднее время жизни атомов радона τ , вторую – за промежуток времени $t_p - t_0$. Результаты расчетов по определению γ и ν , а также возможные (для рассматриваемого образца) варианты относительных изменений открытой пористости и УВП, приведены в табл. 1. Значения γ и ν во втором и последнем столбце табл. 1 примерно соответствуют предварительно рассчитанным пределам изменения этих величин. Анализ полученных результатов показывает, что малым (по отношению к верхнему пределу) значениям γ соответствуют незначительные относительные изменения открытой пористости. При этом ν принимает большие (по отношению к своей нижней границе) положительные значения и УВП растет. Это соответствует ситуации, при которой процессы разрушения в образце находятся на начальной стадии, когда происходит зарождение новых и рост уже существующих трещин. Этап их слияния и укрупнения еще не наступил. Когда значения величины γ близки к верхней границе ее изменения, рост пористости более существенен, ν в этом случае принимает большие по модулю отрицательные значения и УВП уменьшается. Это означает, что процессы разрушения в образце вступили в стадию укрупнения трещин, что и приводит к падению УВП. Необходимо отметить также, что, за исключением случая, когда ν близко к нулю, вариации открытой пористости менее значительны, чем изменение УВП. Например, при $\gamma = 0.0002$ открытая пористость растет всего лишь на 0.14%, в то же время УВП увеличивается более чем в три раза. При $\gamma = 0.0014$, открытая пористость растет на 1%, а УВП уменьшается более чем в одиннадцать раз. Следует сказать, что и по результатам интерпретации радонового мониторинга в естественных условиях наблюдается аналогичная тенденция, а именно, при разрушении горных пород

УВП изменяется в большей степени, чем открытая пористость [2].

Если известна связь между величинами γ и ν , то с ее использованием из уравнения (1) можно однозначно определить любую из них в отдельности. Для получения такого соотношения необходимо задать структурную модель среды. При ее выборе мы должны иметь в виду, что не существует модели ТПС с высокой степенью ее соответствия реальной горной породе. В дальнейших расчетах, с целью получения конкретного (одного из возможных) результата интерпретации, полученных экспериментальных данных мы считали, что по отношению к структуре испытуемого образца горной породы применимы допущения, лежащие в основе модели Терцаги, согласно которой, ТПС представляет собой хаотичную упаковку одинаковых сферических частиц [9]. Используя явный вид выражений, определяющих γ и ν [2, 3, 5], а также полагая, что общая пористость горной породы приблизительно равна ее открытой пористости, можно получить оценку $\nu/\gamma \approx \phi_0 k/\Omega$, где k – средняя (по поверхности открытого пористого пространства) кривизна. Если учесть, что в соответствии с принятой моделью $\Omega = 3(1-\phi_0)/r$, а средняя кривизна $k \approx 1/r$, где r – радиус сферической частицы, то $\nu/\gamma \approx \phi_0/[3(1-\phi_0)] = 0.014$. Выражая отсюда ν и подставляя его в (1), получим, что $\gamma = 9.44 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$, $\nu = 0.13 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$. Тогда, с учетом (2) $\phi_{от}/\phi_0 = 1.0068$, $\Omega/\Omega_0 = 1.0001$. Таким образом, если считать, что для образца горной породы применима модель Терцаги, рост концентрации радона в проницаемом ТПП в процессе разрушения обусловлен, в основном, увеличением открытой пористости. УВП при этом меняется незначительно. Объяснить это можно, по-видимому, тем, что рост поверхности, разделяющей открытые поры и скелет горной породы на одних участках, компенсируется ее уменьшением на других. С другой стороны, если учесть, что величина ν имеет среднее за промежуток времени $t_p - t_0$ значение, то можно допустить, что в данном случае поддерживается баланс между ростом УВП на начальной стадии развития процессов разрушения и ее падением на этапе укрупнения и слияния трещин.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных экспериментов показали, что при разрушении образцов горных пород, могут происходить процессы аккумуляции радона, приводящие к образованию аномалий его объемной активности в измерительной установке. Амплитуды возникающих скачков ОАР соответствуют его содержанию в породе, а также размерам области его сбора. Все это дает основание полагать, что подобного рода процессы, происходящие в больших масштабах, приводят к возникновению аномалий

ОАР, регистрируемых в разрушающихся массивах горных пород [6, 12]. Кроме того, выяснилось, что в лабораторных условиях, при одноосном нагружении образца горной породы, не удастся проследить характер относительного изменения открытой пористости и УВП в процессе разрушения. В данном случае оказалось возможным оценить изменение этих параметров лишь на конечной стадии процесса разрушения, к моменту разделения образца на части. В процессе количественной интерпретации обнаружилась большая чувствительность ее результатов к значению величины $t_p - t_0$, которая в основном (в силу того, что t_p можно оценить достаточно надежно), определяется временем начала процессов разрушения t_0 . Мы оценивали его по факту появления сигналов дискретной АЭ. Однако, связь между интенсивностью АЭ и процессами образования и роста трещин в настоящий момент изучена недостаточно. Поэтому определению величины t_0 при проведении аналогичных экспериментов и их интерпретации должно быть уделено повышенное внимание.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 12-Т-5-1004, № 12-П-5-1018 и № 12-С-5-1029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
2. Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Изучение изменений структурных и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород с использованием вариаций концентрации радона // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 67–78.
3. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации радона для определения структурных характеристик геосреды. I // Дефектоскопия. 1997. № 9. С. 79–88.
4. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Определение пространственно-временных характеристик области разрушения с использованием долговременных аномалий концентрации радона // Физика Земли. 2007. № 5. С. 80–87.
5. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 461–470.
6. Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Докл. АН. 1996. Т. 346, № 1. С. 245–248.
7. Гидро-геохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. 286 с.
8. Регель В.Р., Слуцкер А.Н., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 569 с.
9. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. М.-Л.: Госстройиздат, 1933. 392 с.

10. Bergelt H., Militzer H., Stolz W. Die Radonexhalation von Festgesteinsproben unter Druckeinwirkung // *Gerlands. Beitr. Geophysik*, Leipzig. 1986. V. 95, № 1. P. 7–14.
11. Hishinuma T., Nishikawa T., Shimogama T. et al. Emission of radon and thoron due to the fracture of rock // *Il Nuovo Cimento*. 1999. V. 22C, № 3-4. P. 523–527.
12. Trique M., Richon P., Perrier F. et al. Radon emanation and electric potential variations associated with transient deformation near reservoir lakes // *Nature*. 1999. V. 399 (6732). P. 137–141.

Рецензент Ю.В. Хачай

Study of changes in structural characteristics of destructible rock samples on the observations of volume activity radon variations

V. T. Belikov, I. A. Kozlova, D. G. Ryvkin, V. I. Outkin, A. K. Yurkov

Institute of Geophysics, Urals Branch of RAS

The processes of radon emission in the destruction of rock samples was been investigated. The physical model which describes these processes is proposed and methods of quantitative interpretation of radon volume activity measurements are developed. Received experimental data allowed us to estimate the extent of the rock destruction depending on the value of the relative changes in the open porosity and specific internal surface of sample.

Key words: rock, destruction, radon, porosity, specific inner surface.