

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАЗРУШАЮЩИХСЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД
ПО ДАННЫМ РАДОНОВОГО МОНИТОРИНГА**

Беликов В.Т., Козлова И.А., Рывкин Д.Г., Уткин В.И., Юрков А.К. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Проведены наблюдения вариаций объемной активности радона при одноосном нагружении образцов горных пород, вплоть до их разрушения. Разработана физическая модель, объясняющая механизмы выделения радона по мере увеличения внешней нагрузки. Предложены количественные методы оценки относительного изменения открытой пористости и удельной внутренней поверхности горной породы к моменту разрушения образца.

Образцы горной породы, разрушение, радоновый мониторинг, открытая пористость, удельная внутренняя поверхность.

**ESTIMATION OF CHANGES IN STRUCTURAL CHARACTERISTICS
DESTROYS ROCK SAMPLES ACCORDING RADON MONITORING**

Belikov V.T., Kozlova I.A., Ryvkin D.G., Outkin V.I., Yurkov A.K. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. We observed the variations of radon activity concentration in the uniaxial loading of rock samples, including their destruction. A model to explain the mechanisms of radon emission with increasing external load was developed. We proposed the quantitative method of evaluation the changes of the open porosity and specific internal surface of the rock after destruction of the sample relative to them initial values.

Rock samples, destruction, radon monitoring, open porosity, specific inner surface.

Введение

Анализ данных радонового мониторинга, а также количественные оценки показывают, что наблюдающиеся высокоамплитудные аномалии концентрации радона связаны с деструктивными процессами в геосреде (Гидро-геохимические..., 1985; Булашевич и др., 1996; Беликов, Шестаков, 1997). Количественная физическая модель для описания механизма их образования была рассмотрена в работах (Беликов, Шестаков, 1997; 2007; Беликов, Рывкин, 2011). Она базировалась на предположении о том, что причиной появления таких аномалий является вскрытие недоступных до разрушения пор и трещин, в процессе которого радон попадает в сообщающееся трещиновато-пористое пространство, из которого берутся пробы газа на анализ. На основе предложенной модели были разработаны алгоритмы количественной интерпретации экспериментальных данных по вариациям концентрации радона, что дало возможность изучать относительные вре-

менные изменения открытой пористости и удельной внутренней поверхности (УВП) разрушающейся горной породы, а также определять пространственно-временные характеристики очага разрушения (Беликов, Шестаков, 2007; Беликов, Рывкин, 2011; 2012).

Для изучения процессов эманации радона при разрушении образцов горных пород, а также уточнения некоторых положений разработанной модели образования радоновых аномалий были проведены лабораторные эксперименты. При этом в отличие от подобного рода работ (Bergelt, Militzer, Stolz, 1986), главное внимание было уделено количественной интерпретации полученных результатов. Таким образом, цель исследований состояла в том, чтобы не только изучить механизмы выделения радона из образца по мере увеличения внешней нагрузки, но и оценить величину изменения структурно-петрофизических характеристик горной породы в процессе разрушения.

Результаты экспериментов и их интерпретация

Для проведения экспериментов был использован гидравлический пресс, создающий максимальное усилие 500 кг/см². Отобранные образцы, которые имели цилиндрическую форму (диаметр 0,04–0,06 м, высота 0,08–0,1 м), а по минералогическому составу представляли собой эффузивные породы – аналоги гранитов и диоритов с пористостью 3–8 %, подвергались одноосному сжатию, вплоть до разрушения. Выбранная схема их нагружения не вносила существенных осложнений при измерении объемной активности радона (ОАР).

Лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 1, состояла из герметичного устройства сифонного 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. Внешняя нагрузка, приложенная к образцу, в соответствии с особенностями используемого пресса увеличивалась ступенчатым образом. Величина интервалов ее изменения определялась исходя из предела прочности горной породы, полученного в холостом опыте с образцом той же породы из того же интервала глубин. Обычно нагрузка увеличивалась до разруша-

ющей 2–3 раза. После каждого ее увеличения непрерывные измерения ОАР продолжались в течение 1–2 суток, а после разрушения образца – в течение 3–4 суток. Процессы трещинообразования контролировались наблюдениями сигналов акустической эмиссии (АЭ). Для этого использовался двухканальный регистратор динамической активности, датчики которого располагались на испытываемом образце и станине гидравлического пресса.

Временной фрагмент результатов наблюдений ОАР для одного из образцов (данные измерений с интервалом 10 минут, усредненные в скользящем часовом окне) приведен на рис. 2.

Из представленного графика видно, что после разрушения образца в 10 ч 40 мин 26.10.2011 г. происходит скачок ОАР в измерительной камере. В дальнейшем ОАР пульсирует с тенденцией к ее уменьшению. Объяснить такой характер изменения ОАР можно следующим образом (Беликов и др., 2013). После приложения нагрузки, в образце горной породы начинаются процессы трещинообразования. В ходе их развития сначала возникают микроскопические трещины, которые затем, в результате роста и слияния образуют трещины макроскопических размеров. Последние при слиянии формируют магистральную трещину, разделяющую образец на части (Регель, Слуцкер, Томашевский, 1974).

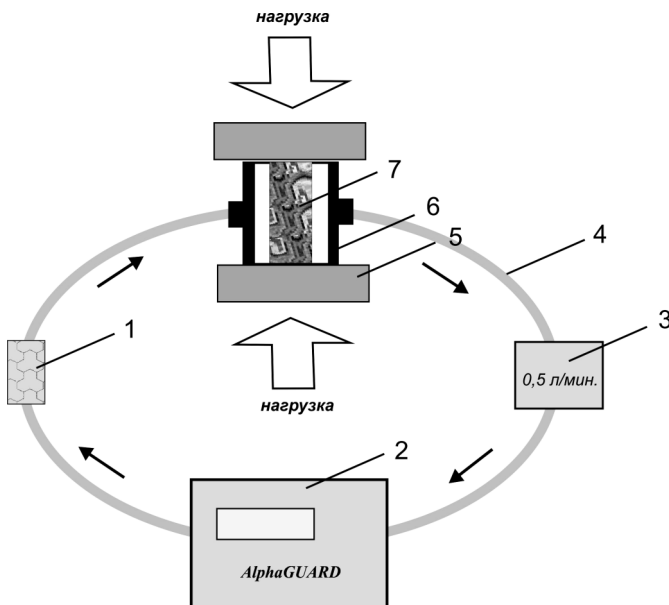


Рис. 1. Схема лабораторной установки для измерений объемной активности радона в циркуляционном режиме: 1 – фильтр; 2 – радиометр радона AlphaGUARD; 3 – насос; 4 – соединительные шланги; 5 – пресс ZAR-ZAD SPRETU NK18; 6 – камера для образцов; 7 – образец керна

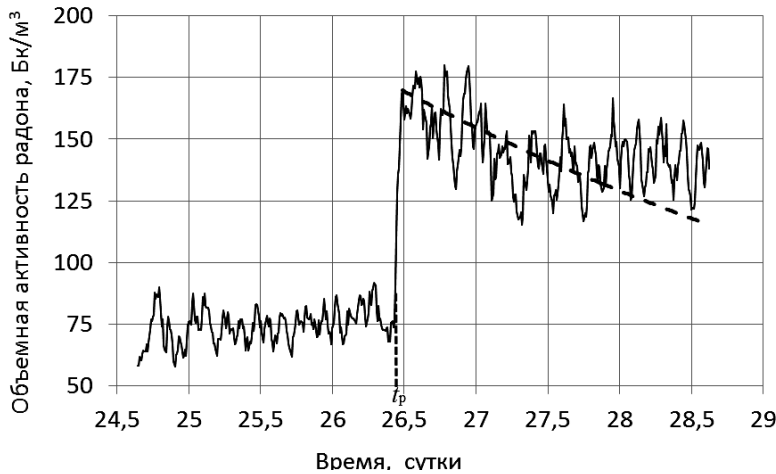


Рис. 2. Фрагмент временных изменений ОАР при разрушении образца горной породы. Пунктир — изменение ОАР, которое наблюдалось бы в соответствии с законом естественного распада, $t_p=26,44$ суток — момент разделения образца на части; время отсчитывается от 0 часов 1 октября 2011 года

Говоря о перераспределении радона в породе, необходимо отметить, что в процессе разрушения будут образовываться участки (области) проницаемого или открытого трещиновато-пористого пространства (ТПП), так называемые открытые поры (Беликов, Рывкин, 2011), сообщающиеся с указанными макроскопическими трещинами. В этих областях в ТПП будет поступать радон из изолированных до разрушения отдельных пор и трещин. В результате концентрация его в проницаемом ТПП 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. Под действием возникшего градиента давления в направлении этих трещин будет происходить конвективное движение газообразного флюида вместе с содержащимся в нем радоном.

Таким образом, макроскопические трещины будут аккумулировать радон из горной породы посредством конвективного сбора по проницаемым участкам ТПП. В результате количество радона в макроскопических трещинах существенно возрастет. После разрушения образца, он практически сразу же попадает в камеру регистрации и появляется скачок ОАР, наблюдающийся в эксперименте (см. рис. 2). Характер вариаций ОАР в камере регистрации перед разделением образца на части определяется тем, что проницаемые зоны

ТПП выходят и на его поверхность. Участок кривой после скачка ОАР описывает ее изменение в измерительной установке в процессе циркуляции. Обращает на себя внимание тот факт, что после выброса радона концентрация его уменьшается не столь резко, как должно быть в соответствии с законом естественного распада (пунктир на рис. 2). Объяснить это можно, по-видимому, тем, что продолжается подвод радона по проницаемым зонам к поверхностям скола частей разрушенного образца. В соответствии с данными, проведенных экспериментов, величина зарегистрированной аномалии ОАР выше фонового значения более, чем в два раза. С другой стороны, необходимо отметить, что в природных условиях нередко наблюдаются аномалии с амплитудой, превышающей фон на порядок и более (Trigue et al., 1999). Такое отличие можно объяснить, по-видимому, тем, что содержание радиогенного газа в изолированных порах данного образца горной породы относительно невелико. Кроме того, необходимо учесть, что область сбора радона в лабораторных условиях мала по сравнению с той, которая существует в природе (Беликов, Шестаков, 2007).

Перед проведением расчетов с целью изучения изменений открытой пористости и УВП при разрушении образца горной породы, обратим внимание на следующее важное обстоятельство.

Как показывают представленные на рис. 2 данные, в условиях лабораторных

экспериментов (по крайней мере, с образцами данного вещественного состава и выбранной скоростью увеличения нагрузки) не удастся получить временную развертку радоновой аномалии с регистрацией участков роста и падения концентрации, как при радоновом мониторинге в естественных условиях (Булашевич и др., 1996; Trique et al., 1999). В такой ситуации 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 (Беликов, Рывкин, 2011; 2012). Результаты проведенных экспериментов позволяют лишь оценить величину относительного изменения указанных параметров за период времени от начала процессов разрушения до момента разделения образца на части. С учетом соотношений, полученных в работе (Беликов, Рывкин, 2011), уравнение, описывающее баланс радона в момент разрушения образца, можно представить в виде

$$\frac{P(t_p)}{P_0} = \frac{a\gamma\tau}{\gamma\tau + 1} \left[\exp(\gamma\Delta t) - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] + \frac{\exp(\nu\Delta t) + \nu \exp(-\Delta t/\tau)}{\nu\tau + 1}, \quad (1)$$

где $P(t_p)$ – количество радона, зарегистрированное в измерительной камере в момент времени $t=t_p$, когда происходит разделение образца на части; P_0 – его количество в момент начала процессов разрушения при $t=t_0$; γ и ν – средние за промежуток времени $\Delta t=t_p-t_0$ скорости относительного изменения открытой пористости и УВП (Беликов, Рывкин, 2011); τ – среднее время

$$\text{жизни атомов радона; } a = \frac{C_0}{C_\phi} \Phi_{om}^0 = \frac{A_0}{A_\phi} \Phi_{om}^0,$$

где C_0 и C_ϕ – осредненная равновесная концентрация радона в изолированных (до разрушения) порах и его фоновая концентрация в открытом пористом пространстве, соответственно (Беликов, Рывкин, 2011); A_0 – экспериментальное значение ОАР в

образце до разрушения; A_ϕ – фоновая ОАР в открытых порах; Φ_{om}^0 – величина открытой пористости при $t=t_0$. Характер изменения открытой пористости Φ_{om} и УВП Ω открытого пористого пространства, в соответствии с работой (Беликов, Рывкин, 2011), описывается соотношениями

$$\Phi_{om} = \Phi_{om}^0 \exp(\gamma\Delta t); \quad \Omega = \Omega_0 \exp(\nu\Delta t), \quad (2)$$

где Ω_0 – значение УВП в момент времени t_0 .

Следует отметить, что скорость относительного изменения открытой пористости γ всегда положительна, в то время как скорость относительного изменения УВП ν , когда в процессе разрушения происходит укрупнение и слияние трещин, может быть и меньше нуля (Беликов, Шестаков, 1997; 2008; Беликов, Рывкин, 2011).

В уравнении (1) две неизвестные величины γ и ν . Приведенное к виду $F(\gamma, \nu)=0$, соотношение (1) можно рассматривать как неявную функцию, определяющую взаимную зависимость скоростей изменения открытой пористости γ и УВП ν . Используя указанное представление, можно показать, что $\partial\gamma/\partial\nu = -(\partial F/\partial\nu)/(\partial F/\partial\gamma) < 0$ при $\gamma > 0$ и всех значениях ν , включая отрицательные. Поэтому зависимость $\gamma(\nu)$, определяемая уравнением (1), всегда взаимно однозначная. Это означает, что, 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 вариаций γ и Ω были проведены расчеты, основанные на решении трансцендентного уравнения (1) при значениях параметров $P(t_p)$, P_0 , a , Δt , соответствующих экспериментальным.

Исходные данные были следующими: $P(t_p)/P_0 = 2,05$; $\tau = 5,52$ сут, $t_0 = 19,30$ сут, $t_p = 26,44$ сут, $\Phi_{om}^0 = 0,04$, $a = 277,2$. Значение t_0 , связанное с появлением сигналов АЭ, выбиралось таким образом, чтобы в этот момент времени нагрузка составляла 75 % от той, при которой произошло разрушение образца (Баранов, 1990). При вычислении частного $P(t_p)/P_0$ мы считали, что оно

совпадает с отношением средних ОАР, соответственно после и до разрушения образца. Первую величину мы получали усреднением по временному интервалу $0,1\tau$, вторую – за промежутки времени Δt .

Результаты расчетов по определению γ и ν , а также возможные (для рассматриваемого образца) варианты относительных изменений открытой пористости и УВП, приведены в таблице.

Представленные в ней данные показывают, что малым (по отношению к верхнему пределу) значениям γ соответствуют незначительные относительные изменения открытой пористости. При этом ν принимает большие положительные значения и УВП растет. В этом случае процессы разрушения в образце находятся на начальной стадии, когда происходит зарождение новых и рост уже существующих трещин. Этап их слияния еще не наступил. Если значения величины γ близки к верхней границе ее изменения, то, как видно из таблицы, ν 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. Аналогичная ситуация наблюдается и по результатам интерпретации данных радонового мониторинга в естественных условиях (Беликов, Рывкин, 2011; 2012).

Чтобы определить каждую из величин γ и ν в отдельности, к уравнению (1) необходимо присоединить соотношение, опи-

сывающее связь между ними. Для этого следует выбрать модель среды. Предположим, что по отношению к структуре испытуемого образца горной породы применимы допущения, лежащие в основе модели Терцаги, согласно которой, среда представляет собой хаотичную упаковку одинаковых сферических частиц (Терцаги, 1933). Используя явный вид выражений, определяющих γ и ν (Беликов, Шестаков, 1997; 2008; Беликов, Рывкин, 2011), а также полагая, что общая пористость горной породы приблизительно равна ее открытой пористости, можно получить оценку $\nu/\gamma \approx \varphi_0 k/\Omega$, где k – средняя по поверхности пор и трещин кривизна. Учитывая, что в соответствии с принятой моделью $\Omega = 3(1-\varphi_0)/r$, а средняя кривизна $k \approx 1/r$, где r – радиус сферической частицы, получим $\nu \approx \varphi_0 \gamma / [3(1-\varphi_0)] = 0,014\gamma$. Подставляя ν в (1), приходим к результату: $\gamma = 9,44 \times 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$, $\nu = 0,13 \times 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$. И, наконец, используя (2), получим, что $\varphi_{om}/\varphi_0 = 1,0068$; $\Omega/\Omega_0 = 1,0001$.

Отсюда следует, что если для образца горной породы применима модель Терцаги, рост концентрации радона в проницаемом ГПП в процессе разрушения обусловлен, в основном, увеличением открытой пористости. УВП, при этом, меняется незначительно. Это может быть связано с тем, что в данном случае поддерживается баланс между увеличением УВП на начальной стадии развития процессов разрушения и ее падением на этапе укрупнения и слияния трещин. Не исключено также, что рост поверхности, разделяющей открытые поры и скелет горной породы на одних участках, компенсируется ее уменьшением на других.

Таблица. Относительные изменения структурных характеристик разрушения образца

$\gamma \cdot 10^4, \text{ сут}^{-1}$	2	5	8	11	14	15,5
$\nu, \text{ сут}^{-1}$	0,165	0,114	0,045	-0,066	-0,338	-1,284
φ_{om}/φ_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

Заключение

В процессе разрушения горных пород происходит перераспределение радона между сообщающимися и изолированными до разрушения порами, а также скелетом горной породы. При этом изменяются условия миграции радона, и в некоторых частях открытого ТПП могут возникать области с повышенным его содержанием. Согласно предложенной модели процесса, такими областями являются макроскопические трещины, которые объединяясь, образуют магистральные трещины, разделяющие образец на части. Это и приводит к появлению скачка ОАР, регистрируемого в измерительной камере. Результаты проведенных экспериментов не противоречат ранее высказанным предположениям о том, что аномалии концентрации радона, наблюдающиеся в горных массивах и превышающие фон в десять и более раз, обусловлены, в основном, процессами разрушения горных пород (Беликов, Шестаков, 1997; 2007). Существенно меньшие значения амплитуд, зарегистрированные в лабораторных условиях, отчасти можно объяснить тем, что содержание радиогенного газа в образце данной горной породы сравнительно невелико. Однако главная причина указанной особенности заключается в том, что область сбора радона в лабораторных условиях мала по сравнению с той, которая существует в природе. Таким образом, процессы образования аномалий ОАР в разрушающихся образцах и массивах горных пород отличаются лишь масштабами, при этом, основные закономерности процессов его аккумуляции в естественных и лабораторных условиях, по видимому, одинаковы.

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

Литература

Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации ра-

дона для определения структурных характеристик геосреды. I // Дефектоскопия. 1997. № 9. С. 79–88.

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.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 461–470.

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Изучение изменений структурно-петрофизических характеристик разрушающегося массива горных пород // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 67–78.

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Реконструкция временных изменений структурных и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород с использованием вариаций концентрации радона // Дефектоскопия. 2012. № 12. С. 74–81.

Беликов В.Т., Уткин В.И., Козлова И.А., Рывкин Д.Г., Юрков А.К. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов выделения радона при разрушении образцов горных пород // ДАН. 2013. Т. 450. № 2. С. 222–223.

Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // ДАН. 1996. Т. 346. № 1. С. 245–248.

Гидро-геохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. 286 с.

Регель В.Р., Слуцкер А.Н., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 569 с.

Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств М.; Л.: Госстройиздат, 1933. 392 с.

Bergelt H., Militzer H., Stolz W. Die Radon-exhalation von Festgesteinsproden unter Druckeinwirkung // Gerlands. Beitr. Geophysik, Leipzig. 1986. V. 95. № 1. P. 7–14.

Trique M., Richon P., Perrier F., Avouac J.P., Sabroux J.C. Radon emanation and electric potential variations associated with transient deformation near reservoir lakes // Nature. 1999. V. 399 (6732). P. 137–141.