

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШАЮЩЕГОСЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Беликов В.Т., Рыбкин Д.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. На основе предложенного алгоритма проведена количественная интерпретация экспериментальных данных по нескольким последовательным во времени высокоамплитудным радоновым аномалиям. Изучен характер относительных изменений открытой пористости, удельной внутренней поверхности и давления в разрушающемся массиве горных пород.

Массив горных пород, разрушение, радон, пористость, удельная внутренняя поверхность, давление.

AN INVESTIGATION OF PATTERNS OF TEMPORAL CHANGES OF STRUCTURAL AND DYNAMICAL CHARACTERIZATIONS OF DESTROYING MASSIF OF ROCKS

Belikov V.T., Ryvkin D.G. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. We propose an algorithm for and provide a quantitative interpretation of experimental data for several consecutive high-amplitude radon concentration anomalies. We further study the patterns of relative changes of porosity, specific internal surface and pressure in a destroying rock massif.

Massif of rocks, destruction, radon, porosity, specific inner surface, pressure.

Введение

Закономерности временных изменений структурно-петрофизических и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород могут быть изучены на основе анализа экспериментального материала по таким индикаторам деструктивных процессов, как высокоамплитудные аномалии концентрации радона. Количественная интерпретация соответствующих экспериментальных данных должна быть основана на физико-математических моделях, позволяющих установить взаимосвязь между наблюдаемыми параметрами аномалии и структурными, а также динамическими характеристиками массива. Известно, что высокоамплитудные аномалии концентрации радона, которые нередко предшествуют наступлению катастрофических событий, обусловлены тектонофизическими явлениями в геосреде (Булашевич и др., 1996; Гидро-геохимические ..., 1985; Trique et al., 1999). Будучи генетически связанными с процессами разрушения, они несут в себе информацию о временных изменениях структурно-петрофизических характеристик горных пород. Результаты количественной интерпретации экспериментального материала по вариациям концентрации радона дают возможность детальнее изучить характер протекания дест-

руктивных процессов, а также исследовать причины и условия, влияющие на осуществление того или иного режима их развития. Кроме того, полученные данные о временных изменениях структурных и динамических характеристик трещиновато-пористой среды (ТПС) позволят прогнозировать сценарии протекания процессов разрушения и определять условия реализации каждого из них. В работах (Беликов, Шестаков, 1996; 1997а; б; 2000; 2007) была разработана количественная физическая модель и построена система уравнений для описания миграции радона в разрушающейся ТПС, а также предложен механизм образования высокоамплитудных аномалий его концентрации. С использованием полученных результатов проведена интерпретация экспериментального материала по временным вариациям концентрации радона перед горными ударами в шахтах (Беликов, Шестаков, 1996; 1997а; б; 2000). При этом было изучено относительное изменение открытой пористости и удельной внутренней поверхности (УВП), определены пространственно-временные характеристики очага разрушения. Данные по относительному изменению УВП были использованы в дальнейшем для изучения временных вариаций свободной энергии деформации и напряженного состояния в разрушающемся

массиве горных пород (Беликов, Шестаков, 2008). Усовершенствованная методика и алгоритм количественной интерпретации высокоамплитудных аномалий концентрации радона для изучения относительных временных изменений открытой пористости, УВП и напряженного состояния в процессе разрушения была предложена в работе (Беликов, Рывкин, 2011). Ее опробование проводилось с использованием экспериментального материала по вариациям концентрации радона, полученного в естественных условиях (Trigue et al., 1999).

Необходимо отметить, однако, что упомянутые выше алгоритмы количественной интерпретации с целью изучения временных изменений структурно-петрофизических характеристик среды были разработаны для отдельной, имеющей один явно выраженный максимум (одноmodalной) радоновой аномалии. Между тем, при проведении радонового мониторинга, нередко наблюдаются аномалии более сложной формы, по сути, представляющие собой совокупность нескольких последовательных перекрывающихся во времени высокоамплитудных радоновых аномалий. Характерной особенностью таких объектов является то, что в целом они образуют полиmodalную аномалию, имеющую один главный (глобальный, превышающий фон более чем на порядок) высокоамплитудный максимум, а также несколько локальных максимумов на спаде, причем амплитуда последних со временем имеет тенденцию к уменьшению (см. рис. 1).

Такая морфология временных вариаций концентрации радона показывает, что режим развития процессов разрушения отличается от того, который приводит к появлению одноmodalной аномалии. Следует ожидать, что и характер временных изменений структурно-петрофизических и динамических характеристик разрушающихся горных пород в этом случае будет иным. Таким образом, актуальной в настоящее время является задача количественной интерпретации экспериментальных данных по нескольким последовательным во времени высокоамплитудным аномалиям с целью изучения особенностей разви-

тия процессов разрушения, обусловивших такую морфологию вариаций концентрации радона.

Целью данной статьи является разработка и тестирование алгоритма количественной интерпретации экспериментального материала по многоэкстремальным высокоамплитудным аномалиям концентрации радона для изучения относительных временных изменений открытой пористости, УВП и напряженного состояния среды в процессе разрушения. Предложенный алгоритм опробован с использованием экспериментальных данных по вариациям концентрации радона, полученных в (Trigue et al., 1999).

Постановка задачи

Количественный анализ, а также данные наблюдений показывают, что основным фактором при возникновении высокоамплитудных аномалий концентрации радона, превышающих его фоновое значение в десять и более раз, является разрушение (Беликов, Шестаков, 1996; 1997а; Булашевич и др., 1996). По мере его развития в сообщающееся (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, при разрушении горной породы могут вскрываться ее отдельные фрагменты (зерна) с повышенной способностью генерировать радон (Беликов, Рывкин, 2011). При этом важно отметить, что его равновесная концентрация в изолированных до разрушения порах и блоках, а также вскрытых зернах может значительно превышать ее значение для открытых пор (Беликов, Шестаков, 2007). Вообще говоря, характер развития процессов разрушения в различных участках области, доступной радоновому мониторингу, может быть различным. Следует отметить, однако, что результаты режимных наблюдений вариаций концентрации радона, причем, как правило, в одной точке, не позволяют изучать особенности развития процессов разрушения в отдельных частях массива горных пород. Действительно, свой вклад в формирование данной радоно-

вой аномалии могут давать источники, связанные с пространственно различными областями (очагами) разрушения, в которых одновременно развиваются деструктивные процессы. При этом отдельно оценить влияние каждого из них на морфологию аномалии, а также изучить особенности изменения структурных характеристик среды в соответствующих им областях разрушения по существующим в настоящее время экспериментальным данным мы не имеем возможности. Вместе с тем, для оценки количества зарегистрированного радона нам достаточно знать величину его потока на поверхности полости (помещения), где происходят наблюдения. Причем величина его будет нести в себе информацию обо всех источниках из области доступной радоновому мониторингу. Поэтому такой поток, по сути, будет являться осредненным по пространству, а для его вычисления можно ограничиться одномерной постановкой задачи. С другой стороны, имеющиеся в настоящее время результаты радоновых наблюдений не позволяют изучать пространственную зависимость структурных характеристик разрушения, а также пористости и УВП. Они дают возможность восстанавливать лишь временные изменения осредненных по области сбора радона значений указанных величин.

Физико-математическая модель для описания миграции радиогенного газа в разрушающейся ТПС была предложена в (Беликов, Рывкин, 2011). Она основывается на общей системе осредненных уравнений тепломассопереноса в гетерогенных многокомпонентных средах (Беликов, 1986; 1991). При этом рассматриваются следующие фазы: 1) скелет горной породы; 2) открытое пористое пространство (открытая фаза), из которого производится анализ флюида на содержание радона; 3) изолированная фаза, включающая в себя закрытые (изолированные) поры и трещины, которые в процессе разрушения вовлекаются в сообщающееся открытое пористое пространство, а также блоки пород со своей системой пор и трещин, радон из которых недоступен для анализа перед разрушением (Беликов, Рывкин, 2011). Фазы считаются несжимаемыми, а процесс –

изотермическим. Осредненное уравнение баланса радона в открытом пористом пространстве в одномерном случае имеет вид (Беликов, Рывкин, 2011)

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{C}{\tau} = b\Omega + \tilde{C}_0 \gamma \varphi_{от}. \quad (1)$$

Обозначения следующие (Беликов, Рывкин, 2011): C – осредненная частичная концентрация радона; τ – среднее время жизни атомов радона ($\tau = 5,52$ сут), связанное с постоянной его распада λ соотношением $\tau = 1/\lambda$; v – среднемассовая скорость радон содержащего флюида; D – коэффициент диффузии радона во флюиде; b – поток радона в открытые поры из

скелета; $\Omega = \frac{1}{V} \int_{S_{от-ск}} dS$ – УВП открытого пористого пространства; $S_{от-ск}$ – межфазная поверхность, разделяющая открытое пористое пространство и скелет горной породы; V – величина объема осреднения; $\varphi_{ю}$ – доля объема, занимаемая открытой фазой, $\varphi_{от} = V_{от}/V$, $V_{от}$ – объем, занимаемый открытыми порами, в пределах V ; \tilde{C}_0 – эффективная осредненная равновесная концентрация радона в скелете и изолированной фазе.

Средние концентрации радона в этих фазах практически постоянны и одинаковы (Беликов, Шестаков, 1997б), тогда в данном приближении \tilde{C}_0 будет совпадать с каждой из них. Физический смысл параметра γ будет обсужден ниже. Первый член справа в (1) описывает приток радона в открытую фазу из скелета горной породы, второй – рост его количества за счет разрушения скелета, а также включения в состав открытого пористого пространства части изолированной до разрушения фазы вместе с содержащимся в ней радоном (Беликов, Рывкин, 2011). В процессе разрушения меняется доля объема, занимаемая открытой фазой $\varphi_{ю}$. Уравнение, описывающее изменение $\varphi_{ю}$, имеет следующий вид (Беликов, Рывкин, 2011)

$$\frac{\partial \varphi_{от}}{\partial t} = \gamma \varphi_{от}, \quad (2)$$

$\gamma = \gamma_{от-ск} + \gamma_{от-и}$, причем

$$\gamma_{от-ск} = \frac{1}{V} \int_{от-ск} u_i n_i dS, \quad \gamma_{ио-э} = \frac{1}{V_{ио}} \int_{ио-э} u_i n_i dS, \quad (3)$$

где u_i – скорость движения соответствующей межфазной границы при разрушении (Беликов, 1996; Беликов, Шестаков, 2008); n_i – единичный вектор нормали, внешней по отношению к открытым порам; $S_{от-и}$ – участки поверхности $S_{от-ск}$, которые исчезнут в результате разрушения перемычек, отделяющих изолированную фазу от открытого пористого пространства (Беликов, Рывкин, 2011). Величины $\gamma_{от-ск}$ и $\gamma_{от-и}$ описывают относительное изменение в единицу времени величины $\Phi_{ио}$ за счет движения поверхностей $S_{от-ск}$ и $S_{от-и}$. Таким образом, параметр γ в (1) и (2) описывает скорость общего относительного изменения $\Phi_{ио}$ в результате процессов разрушения. Как следует из (1), на содержание радона в открытом пористом пространстве влияет его приток из скелета породы через межфазную поверхность $S_{от-ск}$, которая меняется в процессе разрушения. Уравнение, описывающее изменение УВП открытых пор, в соответствии с (Беликов, Шестаков, 2008; Беликов, Рывкин, 2011), можно записать так

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \nu \Omega, \quad (4)$$

где ν – коэффициент, характеризующий скорость относительного изменения УВП, обусловленного движением межфазной границы $S_{от-ск}$ при разрушении, учитывающий также и перераспределение поверхности, разделяющей скелет и изолированную фазу в пользу открытого пористого пространства (Беликов, Рывкин, 2011). Он зависит от морфологии поверхности $S_{от-ск}$ и скорости ее движения, в которой присутствует также и составляющая, связанная с деформацией межфазной границы (Беликов, Шестаков, 2008). Необходимо отметить, что предположение о несжимаемости фаз не исключает возможности деформации межфазных поверхностей. Последние могут деформироваться, однако,

объемы (и доли объема) каждой из фаз при этом не меняются. В то же время, если межфазная поверхность движется в результате процессов разрушения, то (в предположении о несжимаемости фаз) происходит перераспределение объема между фазами. Открытая пористость $\Phi_{от}$ и УВП, а также величины ν и γ (последние два параметра в дальнейшем мы будем называть структурными характеристиками разрушения), зависят в общем случае от координат и времени и определяются такими факторами, как морфология ГПС, ее вещественный состав, распределение упругих напряжений и температур. Однако, как мы сказали выше, в силу того, что имеющиеся в настоящее время результаты радоновых наблюдений не позволяют нам изучать зависимость указанных параметров от координат, мы будем считать их осредненными по пространству и зависящими только от времени. В систему уравнений, описывающую изменение структурно-петрофизических характеристик при возникновении радоновой аномалии, входят соотношения (1), (2) и (4). Неизвестными являются C , Ω , $\Phi_{ио}$.

Расчеты и обсуждение результатов

В силу того, что мы считаем величины $\Phi_{от}$, γ , ν , Ω зависящими только от времени, решение уравнения (1) целесообразно искать в виде суммы фоновой концентрации радона в открытых порах до начала процессов разрушения и осредненной, зависящей лишь от времени нестационарной добавки, обусловленной процессами разрушения, одинаковой для всей области миграции флюида (Беликов, Рывкин, 2011). При этом предполагается, что фоновая концентрация радона в открытой фазе стационарна, однородна по пространству и определяется равновесием между его распадом и притоком из скелета горной породы. Полученное с использованием такого представления общее решение уравнения (1) позволяет определить полный осредненный поток радона, а также вычислить относительное его количество, поступающего в помещение, в котором происходят наблюдения (Беликов, Рывкин, 2011).

$$\frac{P}{P_0} = 1 + aF_\varphi(t) + F_\Omega(t), \quad (5)$$

где P – общее количество регистрируемого радона; P_0 – характеризует фоновое значение P ,

$$a = \frac{\tilde{C}_0 \varphi_{от}^0}{b \Omega_0 \tau}; F_\Omega(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t \left[\frac{\Omega(y)}{\Omega_0} - 1 \right] e^{-(t-y)/\tau} dy;$$

$$F_\varphi(t) = \frac{1}{\varphi_{от}^0} \int_{t_0}^t \gamma(y) \varphi_{от}(y) e^{-(t-y)/\tau} dy, \quad (6)$$

$\varphi_{от}^0 = \varphi_{от}(t_0)$ – открытая пористость до начала процесса разрушения; $\Omega_0 = \Omega(t_0)$ – соответствующее значение УВП открытого пористого пространства; t_0 – момент времени, принимаемый за начальный. Решения уравнений (2) и (4) имеют вид (Беликов, Рывкин, 2011)

$$\varphi_{от} = \varphi_{от}^0 \exp\left(\int_{t_0}^t \gamma(u) du\right)$$

$$\Omega = \Omega_0 \exp\left(\int_{t_0}^t \nu(u) du\right) \quad (7)$$

При помощи соотношения (5), используя данные наблюдений вариаций концентрации радона, в результате решения обратной задачи можно восстановить временные изменения структурных характеристик разрушения (γ, ν), а затем, согласно (7), соответствующие относительные (по отношению к начальному значению) изменения $\varphi_{от}$ и Ω (Беликов, Рывкин, 2011).

В качестве исходного экспериментального материала в данной работе были использованы результаты наблюдений вариаций концентрации радона, приведенные в (Trigue et al., 1999) (см. рис. 1). Восстановление временных изменений структурных характеристик разрушения проводилось на основе сравнения экспериментальных значений относительной (по отношению к фону) активности радона с теоретическими, численно совпадающими с отношением P/P_0 (Беликов, Шестаков, 2007). При выборе временной зависимости $\gamma(t)$ и $\nu(t)$ мы учитывали многомодальность исследуемой радоновой аномалии. Принятая, исходя из ее морфологии, зависимость параметра γ от времени может быть охарактеризована так. При $t_0 < t < t_1$ процессы разрушения не происходят ($\gamma = 0$). В момент времени t_1 (начало подъема концентрации радона) они возникают, и γ скачком возрастает до величины $\gamma = \gamma_1$, оставаясь постоянной в течение промежутка времени $t_1 < t < t_2^\varphi$ (t_2^φ – момент окончания процесса интенсивного разрушения). В интервалах $t_2^\varphi < t < t_3^\varphi$, $t_3^\varphi < t < t_4^\varphi$ и $t_4^\varphi < t < t_e$, где t_k – время окончания процессов разрушения, совпадающее с концом аномалии, $\gamma = \gamma_2$, $\gamma = \gamma_3$, $\gamma = \gamma_4$ соответственно, причем $\gamma_2 < \gamma_1$, $\gamma_3 < \gamma_1$, $\gamma_4 < \gamma_1$. При $t > t_k$ разрушение прекращается ($\gamma = 0$).

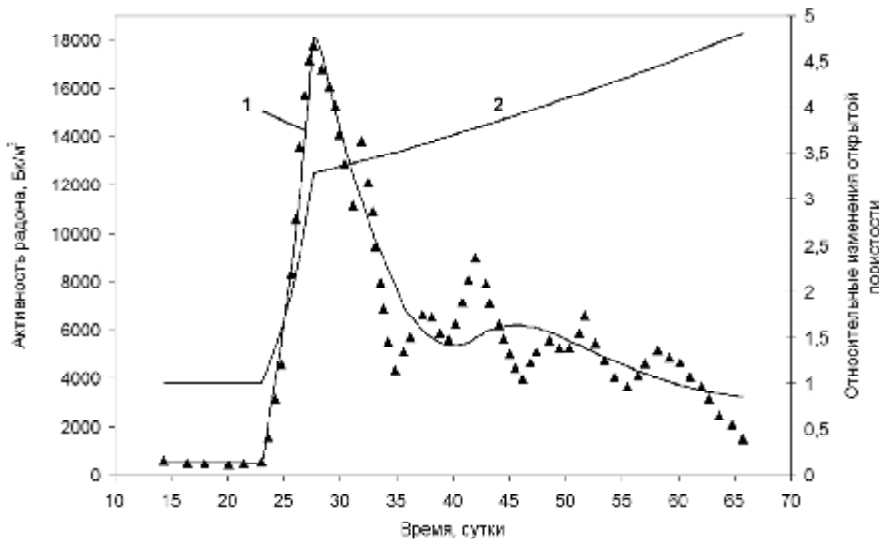


Рис. 1. Сравнение наблюдаемых значений временных вариаций активности радона (маркеры) с теоретически рассчитанными кривая 1). Относительное изменение открытой пористости $\varphi_{от} / \varphi_{от}^0$ (кривая 2)

Говоря об изменении УВП открытого пористого пространства в процессах разрушения, необходимо иметь в виду, что на некоторой стадии их развития возрастание Ω может смениться ее убыванием (например при укрупнении трещин) и наоборот, при активизации процессов разрушения УВП может снова начать расти. При этом характер как возрастания, так и убывания со временем может быть различным. Выбранная зависимость параметра ν от времени может быть описана следующим образом. При $t = t_1$, когда начинаются процессы разрушения, ν скачком возрастает до величины $\nu = \nu_1 > 0$, оставаясь постоянной в течение промежутка времени $t_1 < t < t_2^\Omega$, где t_2^Ω – момент первой инверсии, когда возрастание Ω сменяется ее убыванием ($t_1 < t_2^\Omega < t_3^\circ$). В промежутке $t_2^\Omega < t < t_3^\circ$ величина ν принимает постоянное значение $\nu = -\nu_2$, $\nu_2 > 0$, где t_3° – момент времени, когда происходит повторная инверсия, и убывание Ω сменяется ее возрастанием. При $t_3^\circ < t < t_4^\Omega$, $\nu = \nu_3 > 0$, где t_4^Ω – момент третьей инверсии, когда рост Ω сменяется периодом ее убывания. Причем в интервале $t_4^\Omega < t < t_5^\circ$ скорость падения Ω характеризуется величиной $\nu = -\nu_4$, $\nu_4 > 0$, а в интервале $t_5^\circ < t < t_k$ – величиной $\nu = -\nu_5$, $\nu_5 > 0$. При $t > t_k$, $\nu = 0$. Необходимо отметить, что указанные выше времена являются моментами возможной инверсии в зависимости $\Omega(t)$. Например, если в результате решения обратной задачи окажется, что $\nu_2 = 0$, то при $t = t_2^\Omega$ не произойдет смены характера изменения УВП. Важно подчеркнуть, что сама форма радоновой аномалии несет в себе объективную информацию о временах, описывающих характер изменения величин γ и ν . Поэтому, в силу того, что количество определяемых параметров в обратной задаче достаточно велико, все вышеуказанные времена выбирались в соответствии с морфологией аномалии концентрации радона. При этом выбор их численных значений осуществлялся с привлечением фи-

зических соображений, соответствующих предложенной модели. Момент времени, принимаемый за начальный, – $t_0 = 14,4$ сут. Время, когда начинаются процессы разрушения (начало подъема концентрации радона), – $t_1 = 23,0$ сут. Время окончания процессов интенсивного разрушения, соответствующее наибольшей амплитуде (глобальному максимуму) радоновой аномалии, – $t_2^\circ = 27,6$ сут. Момент времени $t_3^\circ = 34,9$ сут характеризует первый минимум аномалии, следующий за глобальным максимумом. Время $t_4^\circ = 46,2$ сут соответствует следующему минимуму на кривой вариаций концентрации радона. Момент времени, когда заканчиваются процессы разрушения, – $t_k = 65,7$ сут. Время $t_2^\Omega = t_2^\circ = 27,6$ сут соответствует первой инверсии в изменении Ω , когда ее рост сменяется убыванием. Момент времени $t_3^\Omega = t_3^\circ = 34,9$ сут определяет вторую инверсию в характере изменения Ω , когда она после периода убывания начинает возрастать. При $t_4^\Omega = 42,0$ сут происходит третья инверсия, и возрастание Ω сменяется ее убыванием. В момент времени $t_5^\Omega = t_4^\circ = 51,7$ сут изменяется скорость падения Ω . Все времена отсчитывались от даты 0 час 1 марта 1996 г.

Остальные неизвестные параметры $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \nu_5, a$ определялись посредством минимизации функционала, являющегося суммой квадратов отклонений теоретической (в соответствии с (5)) величины P/P_0 от экспериментальных значений относительной активности радона.

На рис. 1 представлена взятая из работы (Trigue et al., 1999) интерпретируемая часть наблюдаемой кривой временных вариаций концентрации радона в сравнении с теоретической, подобранной при помощи процедуры минимизации. Там же приведены временные изменения величины $\Phi_{от} / \Phi_{от}^0$, рассчитанные согласно (7). Из приведенного на рис. 1 графика видно, что характер относительного изменения открытой пористости монотонный. В процессе образования аномалии она все время

возрастает, увеличиваясь в итоге в 4,8 раза. Причем скорость ее роста максимальна на этапе интенсивного разрушения от $t_1 = 23,0$ сут до $t_2^{\phi} = 27,6$ сут. Следует отметить, что рост открытой пористости происходит как за счет изолированной фазы, так и за счет скелета горной породы. Приведенная выше оценка для относительного увеличения $\phi_{от}$ справедлива в предположении, что доля объема, занимаемая открытой фазой в начальный момент времени и на протяжении всего процесса разрушения, значительно меньше доли объема, приходящейся на остальные фазы ТПС. Сделать количественные оценки по поводу изменения общей пористости массива данные радоновых измерений не позволяют (Беликов, Рывкин, 2011). В то же время характер относительного изменения УВП (величина Ω/Ω_0) существенно не монотонный. Кривая ее относительных вариаций, представленная на рис. 2, имеет два четко выраженных максимума, наблюдающиеся в моменты времени 27,6 и 42,0 сут, когда УВП возрастает по сравнению с ее первоначальным значением приблизительно в 10,2 и 9,8 раза, соответ-

венно. Между этими максимумами наблюдается минимум, когда величина Ω/Ω_0 равна двум. После второго максимума происходит падение УВП, продолжающееся до уровня, при котором она меньше первоначального значения примерно в 2 раза.

Полученные данные об относительных изменениях УВП позволяют восстановить временные изменения давления в предположении, что среда находится в состоянии равномерного всестороннего сжатия (Беликов, Рывкин, 2011). Это можно осуществить, когда сценарий развития процессов разрушения является эволюционным (не сопровождающимся значительным акустическим импульсом). Критерий, характеризующий условия возникновения такого режима развития процесса разрушения, был предложен в работе (Беликов, Шестаков, 2008). Он является аналогом критерия Гриффитса, характеризующего закономерности распространения отдельной трещины. При его выполнении разрушение происходит таким образом, что мощность упругих сил скомпенсирована работой, затрачиваемой в единицу времени на изменение УВП горных пород.

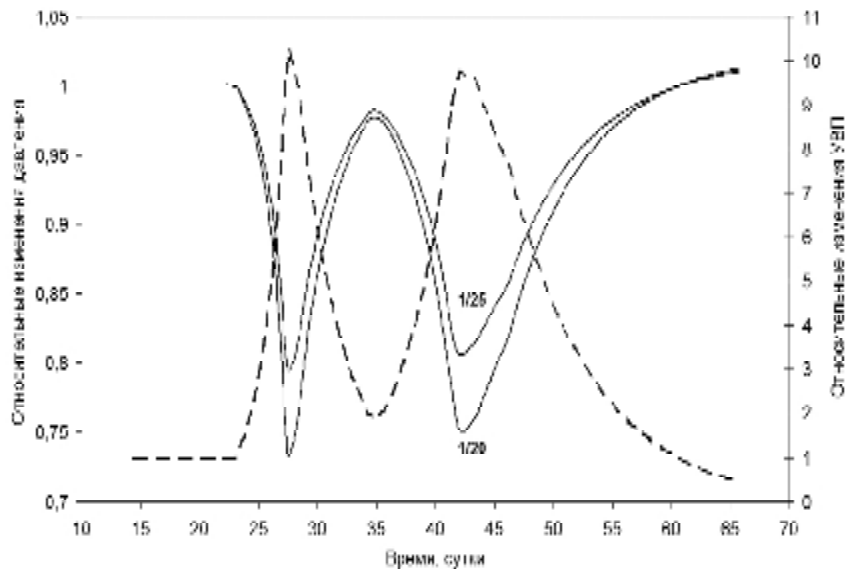


Рис. 2. Относительные изменения давления p/p_0 (сплошные кривые) и УВП открытых пор Ω/Ω_0 (пунктирная кривая) в горном массиве в процессе разрушения. Шифр кривых изменения давления – значения параметра A_0

Описание условий экспериментов, приведенное в (Trigue et al., 1999), а также результаты количественной интерпретации, представленного там экспериментального материала с целью определения пространственно-временных характеристик очага разрушения (Беликов, Шестаков, 2007), позволяют заключить, что характер развития деструктивных процессов был близок к эволюционному. Поэтому для изучения относительных временных изменений давления в массиве горных пород в процессе разрушения можно использовать уравнение (Беликов, Шестаков, 2008; Беликов, Рывкин, 2011)

$$\frac{p}{p_0} = \left[1 - A_0 \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где p и p_0 – давление в скелете породы в текущий и начальный моменты времени; A_0 – параметр, характеризующий начальное соотношение между поверхностной свободной энергией и свободной энергией деформации (Беликов, Шестаков, 2008).

При выводе этого соотношения предполагалось, что на протяжении всего процесса разрушения УВП открытого пористого пространства много больше соответствующей величины для изолированной фазы (Беликов, Шестаков, 2008; Беликов, Рывкин, 2011). Результаты расчетов относительных временных изменений давления в массиве горных пород в процессе разрушения приведены на рис. 2.

Значения параметра A_0 брались равными $1/20$ и $1/25$. Анализируя одну из приведенных кривых (для случая $A_0 = 1/20$), можно отметить, что по мере развития процесса разрушения вначале (до прохождения первого максимума на кривой Ω / Ω_0) происходит уменьшение давления (разгрузка) в массиве, которое в первом минимуме имеет значение $p = 0,73 p_0$. В дальнейшем, по мере уменьшения УВП, давление в среде увеличивается (нагрузка массива), достигая максимума $p = 0,98 p_0$. Затем, при росте УВП давление падает, достигая второго минимума $p = 0,75 p_0$. Далее, по мере уменьшения УВП, давление в разрушающемся массиве

снова растет (повторное нагружение), достигая к концу аномалии значения $p = 1,01 p_0$.

Полученные результаты показывают, что возникновение многомодальной радоновой аномалии обусловлено повторяющимися во времени периодами активизации процессов разрушения. Причем каждый последующий этап их активизации может начаться, когда еще не завершилась перестройка среды в соответствии с предыдущим этапом. Такой характер развития процессов разрушения приводит к тому, что и давление в массиве периодически меняется. Иначе говоря, при режиме развития процессов разрушения близком к эволюционному, появление многомодальной аномалии свидетельствует о том, что характер изменения давления является немонотонным. Периоды его уменьшения, соответствующие росту свободной поверхностной энергии и УВП, сменяются стадией увеличения давления, когда уменьшается УВП вследствие укрупнения трещин и сжатия массива. Затем рост давления сменяется периодом его падения, соответствующим следующему этапу активизации процессов разрушения. И, наконец, при уменьшении УВП происходит повторное нагружение массива и, как следствие, растет давление. Выше мы уже говорили о том, что отдельные максимумы радоновой аномалии могут быть ассоциированы с различными очагами разрушения.

Например, максимум при $t = 42,0$ сут, следующий за глобальным, может быть генетически связан с другим источником (очагом), отличным от того, который обуславливает главный максимум на кривой вариаций концентрации радона. При этом процессы разрушения в очаге, ассоциированном с глобальным максимумом, уже прошли активную стадию, и среда в этой области массива релаксирует к новому равновесному состоянию, в то же время в источнике, ответственном за локальный максимум при $t = 42,0$ сут, наступает активный этап, приводящий к росту открытой пористости и УВП. Последнее отражается на увеличении значений этих параметров в среднем по всей области, доступной радоновому мониторингу. Следующие максимумы аномалии (по крайней мере,

некоторые из них) также могут быть связаны с другими очагами разрушения. В то же время не исключен вариант, при котором некоторые из последующих максимумов аномалии возникают вследствие активизации процессов разрушения в областях массива, обусловивших предшествующие максимумы.

Заключение

Использование предложенного алгоритма для количественной интерпретации экспериментальных данных по многоэкстремальным высокоамплитудным радоновым аномалиям позволило изучить относительные временные изменения открытой пористости и УВП в процессе разрушения массива горных пород. При этом оказалось, что их характер существенно отличается от того, который наблюдается в среде при возникновении одномодальных аномалий.

В данном случае присутствует периодичность в развитии процесса разрушения. При этом его активный этап сменяется периодом релаксации к новому состоянию равновесия, а затем процессы разрушения в данной (или другой) области массива снова могут активизироваться, и наступает новый цикл. Причем, если рост открытой пористости является монотонным, то в характере изменения УВП наблюдается периодичность.

Для аномалии, рассмотренной в данной работе, наблюдаются два четко выраженных максимума в изменении УВП, разделенные одним минимумом. Такой характер временных вариаций УВП приводит к тому, что и динамические условия в среде меняются циклически. Как показывают результаты расчетов по восстановлению относительных временных изменений давления, в разрушающемся горном массиве наблюдается цикл: разгрузка – нагружение, снова разгрузка, затем происходит его повторное нагружение. При этом к концу аномалии давление в массиве выходит на уровень, практически совпадающий с тем, который был до активизации процессов разрушения и образования радоновой аномалии. Дальнейшее усовершенствование алгоритмов количественной интерпретации экспериментальных данных по наблюдениям вариаций концентрации радона с точки

зрения их универсализации по отношению к морфологии аномалии позволит получать оперативную информацию о временных изменениях структурно-петрофизических и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород. Это, в свою очередь, даст возможность охарактеризовать условия реализации того или иного режима развития процессов разрушения, а также разработать критерии для прогноза катастрофических событий.

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

Литература

Беликов В.Т. Условия диссоциации и рекомбинации водяного пара во флюидном потоке // Геология и геофизика. 1986. № 3. С. 110–113.

Беликов В.Т. Количественное описание процессов теплопереноса в литосфере // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 3–9.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Влияние процессов разрушения на миграцию радона в трещиновато-пористой среде. Ин-т геофизики УрО РАН. Екатеринбург, 1996. 38 с. – Рукопись деп. в ВИНТИ 11.07. № 2315-В96.

Беликов В.Т. О термодинамической интерпретации эмпирического соотношения для долговечности твердых тел // Дефектоскопия. 1996. № 1. С. 96–101.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации радона для определения структурных характеристик геосреды. I // Дефектоскопия. 1997а. № 9. С. 79–88.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации радона для определения структурных характеристик геосреды. II // Дефектоскопия. 1997б. № 9. С. 89–97.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование вариаций концентрации радона для определения пространственно-временных характеристик очага разрушения // Дефектоскопия. 2000. № 3. С. 89–95.

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 структурных и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород с использованием вариаций концентрации радона // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 67–78.

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

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

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. Vol. 399 (6732), P. 137–141.