

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

В.Т. Беликов, И.А. Козлова, Д.Г. Рывкин, А.К. Юрков

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия*

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование процессов выделения радона при разрушении образцов горных пород. Предложена физическая модель для описания механизмов образования аномалий его объемной активности. С использованием полученного экспериментального материала изучены относительные изменения открытой пористости и удельной внутренней поверхности горной породы в процессе разрушения.

Разрушение горных пород, радон, пористость, удельная внутренняя поверхность.

ORIGIN OF ANOMALIES OF RADON VOLUME ACTIVITY DURING FAILURE OF ROCKS

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

Experimental and theoretical research into the processes of radon emanation during failure of rocks has been carried out. We propose a physical model for the mechanisms of origin of anomalies of radon volume activity. Based on the obtained experimental data, relative changes in the open porosity and specific inner surface of rock during its failure have been studied.

Failure of rocks, radon, porosity, specific inner surface

ВВЕДЕНИЕ

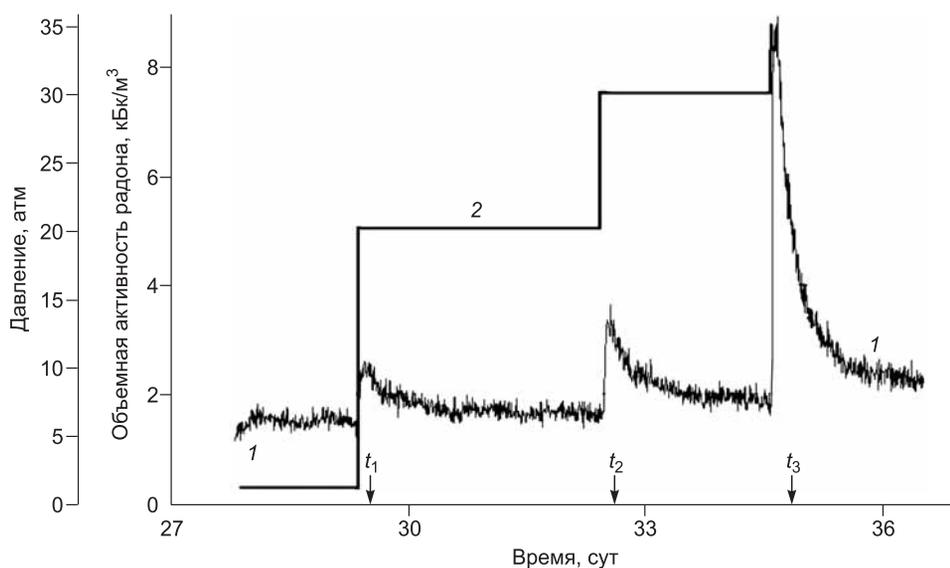
Индикаторами тектонофизических процессов в геосреде являются высокоамплитудные аномалии концентрации радона, несущие в себе информацию об изменении структурно-петрофизических характеристик разрушающихся горных пород. В статьях [Беликов, Шестаков, 1997, 2007; Беликов, Рывкин, 2011] была разработана количественная 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. В основе модели лежит предположение о том, что в сообщающемся (открытое) трещиновато-пористое пространство (откуда 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 отличными 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 с целью изучения относительных временных изменений открытой пористости и удельной внутренней поверхности (УВП) разрушающейся горной породы, а также определения пространственно-временных характеристик очага разрушения [Беликов, Шестаков, 2007; Беликов, Рывкин, 2011]. Для проверки разработанной модели образования радоновых аномалий и уточнения ряда ее аспектов были проведены лабораторные эксперименты по изучению процессов эманиции радона при разрушении образцов горных пород. Работы в этом направлении уже предпринимались [Bergelt et al., 1986], однако количественная интерпретация полученных результатов не проводилась. Поэтому цель исследований состояла в том, чтобы изучить механизмы выделения радона из образца по мере увеличения внешней нагрузки, проведя при этом анализ их особенностей в зависимости от прочностных характеристик горной породы и скорости увеличения нагрузки. Кроме того, ставилась задача оценить величину изменения структурно-петрофизических характеристик среды в процессе разрушения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении экспериментов отобранные образцы подвергались одноосному сжатию, вплоть до разрушения. Такая схема их нагружения не вносила существенных осложнений при измерении объемной активности радона (ОАР). Образцы имели цилиндрическую форму (диаметр 0.042 м, длина 0.05 м), а по минералогическому составу представляли собой эффузивные (в ряде случаев с повышенной урановой минерализацией) 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 на протяжении 4 сут происходило накопление радона за счет его эманирования из испытуемого образца. Далее в циркуляционном режиме в течение 3—4 сут 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 (с интервалом 10 мин) продолжались в течение 1—2 сут, а после разрушения образца — 3—4 сут. Динамика трещинообразования вплоть до разрушения контролировалась наблюдениями сигналами акустической эмиссии с помощью двухканального регистратора динамической активности, датчики которого располагались на испытуемом образце и станине гидравлического пресса, что давало возможность учесть внешние помехи. На рисунке приведен временной фрагмент результатов наблюдений ОАР для одного из образцов, характеризующий ее изменение при возрастании сжатия. Там же представлен график, иллюстрирующий выбранный режим изменения внешней нагрузки, приложенной к образцу. Как видно, в процессе проведения эксперимента в измерительной установке было зафиксировано три аномалии (скачка) ОАР, их амплитуды в процессе увеличения сжатия возрастают. Причем после появления последнего скачка ОАР происходит разрушение образца, после чего он уже не может нести приложенную к нему внешнюю нагрузку. По морфологии все аномалии похожи: у каждой из них резкое возрастание ОАР со временем сменяется падением, более медленным, чем при ее росте, однако более быстрым по сравнению с тем, которое должно быть в соответствии с законом естественного распада. При этом уровень, до которого уменьшаются значения ОАР перед появлением второй и третьей аномалии, несколько превышает тот, что был до начала процессов разрушения.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Физическая модель для объяснения зарегистрированного характера изменения ОАР может быть описана следующим образом. Приложенная нагрузка стимулирует в образце процессы трещинообразования. Причем за счет концентрации упругих напряжений в окрестности зерен горной породы они могут начаться при нагрузках, меньших разрушающей. Согласно положениям кинетической теории проч-



Вариации ОАР при разрушении образца (1) и режим изменения внешней нагрузки (2).

Стрелками показаны моменты максимумов ОАР (t_1 , t_2 , t_3).

ности [Регель и др., 1974], в процессе разрушения сначала возникают микроскопические трещины, затем они 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 [Беликов, Рывкин, 2011], 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 его количество в макроскопических трещинах значительно возрастет. При этом диффузия и естественный распад не успевают существенно снизить концентрацию радона в макроскопических трещинах в течение времени образования магистральной трещины в силу того, что оно происходит за промежуток времени, малый по сравнению с длительностью всего процесса разрушения [Регель и др., 1974]. 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 обычно искусственно создаваемой полости [Булашевич и др., 1996; Trique et al., 1999], используемой для регистрации радона в горных массивах.

Необходимо отметить, что в зависимости от типа горной породы и выбранного режима изменения нагрузки развитие процессов разрушения может происходить по-разному. В одних случаях, по мере увеличения сжатия от образца могут непосредственно отделяться некоторые его части, когда без задержек (одномоментно) образуется вся магистральная трещина. Тогда все накопленное в соответствующих макроскопических трещинах повышенное количество радона сразу же попадает в камеру регистрации. Иногда может возникнуть ситуация, при которой магистральная трещина формируется в несколько этапов (стадий) с временной задержкой между ними. Причем на каждой стадии образуется участок магистральной трещины за счет объединения части макроскопических трещин, ее трассирующих. При этом, если сначала возникает фрагмент у концов будущей магистральной трещины с выходом его на поверхность образца (вследствие чего он сообщается с измерительной камерой), происходит выброс соответствующей порции радона, приводящий к появлению аномалии его объемной активности. Дальнейшие этапы формирования данной магистральной трещины также приводят к появлению аномалий ОАР, причем последняя из них возникает после окончательного отделения соответствующего фрагмента от образца.

В общем случае допустимы обе ситуации, а именно возможно как одномоментное отделение фрагментов от образца, так и поэтапное развитие магистральных трещин. Причем последовательность, в которой происходят эти события, может быть различной. Важно отметить при этом, что основные черты процессов аккумуляции радона из горной породы принципиально не меняются. После завершения опыта было обнаружено три фрагмента, отделившихся от образца. Это означает, что в данном случае реализовалась ситуация, при которой в один этап сформировалась каждая из трех магистральных трещин, приведших к отделению этих фрагментов. Каждому из таких событий сопутствовал выброс радона в измерительную камеру, в результате чего и образовались три аномалии ОАР, представленные на рисунке. После возникновения первой из них продолжается конвективный подвод радона по открытому ТПП к макроскопическим трещинам, объединение которых в магистральную приводит к отделению еще одного фрагмента от образца и появлению второй — более высокоамплитудной аномалии (см. рисунок). То же самое происходит и после образования второго скачка ОАР. В результате амплитуды аномалий ОАР по мере развития процессов разрушения возрастают.

Как видно из полученных данных, все три аномалии приурочены к моментам увеличения внешней нагрузки. Это говорит о том, что каждый такой акт активизирует процесс образования магистральной трещины посредством слияния трассирующих ее макроскопических трещин. Следует отметить, что при проведении экспериментов для некоторых из образцов наблюдалась всего лишь одна аномалия ОАР, появляющаяся в момент разделения его на части. При этом разрушение такого образца происходило при нагрузке, почти в два раза превышающей ту, при которой разрушился рассматриваемый образец. Это свидетельствует о том, что количество возникающих аномалий ОАР и их амплитуда существенно зависят от вещественного состава горной породы, ее упругопрочностных характеристик, а также

от величины нагрузки и скорости ее увеличения. Выше, обсуждая морфологию аномалий ОАР, мы уже говорили о том, что после возникновения каждой из них концентрация радона падает быстрее, чем должно быть в соответствии с законом естественного распада. Связано это, по-видимому, с тем, что в измерительной камере происходит его адсорбция на поверхности образца, а также на деталях измерительной установки. Говоря о величине зарегистрированных скачков ОАР, необходимо отметить, что в природных условиях наблюдаются аномалии с амплитудой, превышающей фоновое значение на порядок и более [Trigue et al., 1999]. Полученные данные показывают (см. рисунок), что ОАР увеличивается по сравнению с ее значением до начала процессов разрушения примерно в 1.7, 2.3 и 5.9 раза соответственно для первой, второй и третьей аномалий. Такие амплитуды ОАР, по-видимому, соответствуют его содержанию в изолированных порах данной горной породы. Кроме того, их относительно небольшие значения обусловлены тем, что область сбора радона в лабораторных условиях мала по сравнению с той, которая существует в природе. Например, согласно [Беликов, Шестаков, 2007], область зондирования радоновым мониторингом в геосреде может достигать размеров порядка сотни метров.

В представленных на рисунке данных непосредственную информацию о деструктивных процессах в образце несут лишь сами аномалии, а точнее, их амплитуды. Остальные участки кривой описывают характер вариаций ОАР в измерительной установке. Это означает, что в условиях лабораторных экспериментов не удастся получить временную развертку радоновой аномалии с регистрацией участков роста и падения концентрации на протяжении всего процесса разрушения, как при радоновом мониторинге в естественных условиях [Булашевич и др., 1996; Trigue et al., 1999]. Поэтому в данном случае мы не имеем возможности изучать соответствующие временные относительные изменения открытой пористости и УВП, как при количественной интерпретации высокоамплитудных радоновых аномалий, зарегистрированных по наблюдениям в горных массивах [Беликов, Рывкин, 2011]. Результаты проведенных экспериментов позволяют лишь оценить величину относительного изменения открытой пористости и УВП открытого пористого пространства за период времени от начала процессов разрушения до появления каждой из трех аномалий ОАР, представленных на рисунке. Используя решение уравнений, описывающих миграцию радона в разрушающейся ТПС, можно определить его концентрацию и поток, а также общее его количество, поступившее в макроскопические трещины, а затем и в измерительную установку после отделения соответствующего фрагмента от образца [Беликов, Шестаков, 1997; Беликов, Рывкин, 2011]. Для первой аномалии, образующейся в момент времени $t = t_1$ (см. рисунок), уравнение баланса радона, следующее из соотношений, полученных в [Беликов, Рывкин, 2011], имеет вид

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{\alpha\gamma\tau}{\gamma\tau + 1} \left[e^{\gamma(t_1 - t_0)} - e^{-\frac{t_1 - t_0}{\tau}} \right] + \frac{1}{\nu\tau + 1} \left[e^{\nu(t_1 - t_0)} + \nu\tau e^{-\frac{t_1 - t_0}{\tau}} \right]. \quad (1)$$

Аналогичные (с точностью до индексов) уравнения можно записать и для моментов времени t_2 и t_3 , когда образуются вторая и третья аномалии ОАР с амплитудами соответственно P_2 и P_3 (см. рисунок). Эти соотношения для краткости мы выписывать не будем. В выражении (1) обозначения следующие: τ — среднее время жизни атомов радона, P_1 — его количество, поступившее в измерительную камеру в момент появления первой аномалии, P_0 — количество радона в камере до начала развития процессов разрушения в образце, t_0 — время начала процессов разрушения в горной породе. Параметр $\alpha = C_0\phi_0/C_\phi = A_0\phi_0/A_\phi$, где C_ϕ — фоновая концентрация радона в открытых порах до разрушения [Беликов, Рывкин, 2011], 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 скорость относительного изменения открытой пористости и УВП открытого пористого пространства соответственно [Беликов, Шестаков, 2008; Беликов, Рывкин, 2011] за весь период времени $t_3 - t_0$, когда развиваются процессы разрушения в образце. В полученной системе трех уравнений (выражение (1) и аналогичные ему соотношения для моментов времени t_2 и t_3) параметры $P_1, P_2, P_3, P_0, \alpha, t_1, t_2, t_3$ считаются заданными. Неизвестными являются величины γ, ν и t_0 . Открытая пористость ϕ_1 и УВП открытого пористого пространства горной породы Ω_1 к моменту образования первой аномалии (при $t = t_1$) в соответствии с [Беликов, Рывкин, 2011] могут быть определены из соотношений

$$\phi_1 = \phi_0 e^{\gamma(t_1 - t_0)}, \quad \Omega_1 = \Omega_0 e^{\nu(t_1 - t_0)}, \quad (2)$$

где ϕ_0 и Ω_0 — значения этих величин в момент времени t_0 . Такие же выражения можно записать и для t_2 и t_3 , когда образуются вторая и третья аномалии. Для определения величин γ, ν и t_0 решалась система трех трансцендентных уравнений типа (1) при значениях параметров $P_1, P_2, P_3, P_0, \alpha, t_1, t_2, t_3$, соответствующих экспериментальным. Значения открытой пористости и УВП в моменты возникновения каждой

из аномалий определялись из (2) и аналогичных ему соотношений. При этом учитывалось, что скорость относительного изменения открытой пористости γ по своему физическому смыслу всегда положительна [Беликов, Шестаков, 1997; Беликов, Рывкин, 2011], в то же время скорость относительного изменения УВП ν может быть и меньше нуля [Беликов, Шестаков, 2008; Беликов, Рывкин, 2011]. В процессе разрушения такая ситуация возникает в том случае, когда происходит укрупнение и слияние трещин [Беликов, Рывкин, 2011]. Исходные данные для расчетов были следующими: $P_1/P_0 = 1.71$, $P_2/P_0 = 2.25$, $P_3/P_0 = 5.93$, $t_1 = 29.45$ сут, $t_2 = 32.59$ сут, $t_3 = 34.65$ сут, $\varphi_0 = 0.05$, $\alpha = 189.7$, $\tau = 5.52$ сут. Времена t_1 , t_2 , t_3 определялись как моменты максимума соответствующей аномалии ОАР и отсчитывались от даты 0 ч 1 июля 2012 г. Численное решение указанной системы уравнений дало следующие результаты: $\gamma = 0.0026$ сут⁻¹, $\nu = -0.1659$ сут⁻¹, $t_0 = 29.37$ сут. Тогда с учетом (2), $\varphi_1/\varphi_0 = 1.0004$, $\varphi_2/\varphi_0 = 1.0086$, $\varphi_3/\varphi_0 = 1.0141$, $\Omega_1/\Omega_0 = 0.9754$, $\Omega_2/\Omega_0 = 0.5789$, $\Omega_3/\Omega_0 = 0.4108$. Относительно полученного значения величины ν можно сказать следующее.

Выше мы уже говорили о том, что γ и ν являются средними за промежуток времени, в течение которого продолжаются процессы разрушения в образце горной породы. Величина ν имеет отрицательное значение и это говорит о том, что в среднем (за время $t_3 - t_0$) процессы слияния и укрупнения трещин превалируют над процессами, приводящими к увеличению УВП открытого пористого пространства на начальной стадии развития процессов разрушения. Количественно момент перехода от роста УВП к ее падению, по данным проведенных экспериментов, определить не удастся. Полученное значение $\Omega_1/\Omega_0 = 0.9754$ (при этом УВП уменьшается в 1.03 раза) указывает на то, что укрупнение трещин может начаться уже к моменту появления первого скачка ОАР. В течение промежутка времени между появлением первой и второй аномалии УВП уменьшается в 1.68 раза ($\Omega_2/\Omega_1 = 0.594$). Между второй и третьей аномалией еще в 1.41 раза ($\Omega_3/\Omega_2 = 0.710$). В итоге к моменту окончательного разделения образца на части УВП уменьшается в 2.43 раза по сравнению с ее первоначальным значением до начала развития процессов разрушения. В то же время открытая пористость все время монотонно увеличивается. К моменту появления первой аномалии этот рост незначителен — 0.04 % ($\varphi_1/\varphi_0 = 1.0004$). Затем за период времени между появлением первого и второго скачка ОАР открытая пористость увеличивается более существенно, на 0.8 % ($\varphi_2/\varphi_1 = 1.008$). И, наконец, между второй и третьей аномалией, открытая пористость растет еще на 0.5 % ($\varphi_3/\varphi_2 = 1.005$). Общий ее рост к моменту времени $t = t_3$ составляет 1.4 % по сравнению с первоначальным значением при $t = t_0$.

Полученные данные говорят о том, что в процессе разрушения образца вариации открытой пористости менее значительны, чем изменение УВП. Следует отметить, что и по результатам интерпретации данных радонового мониторинга в естественных условиях наблюдается аналогичная тенденция, а именно при разрушении горных пород УВП изменяется в большей степени, чем открытая пористость [Беликов, Рывкин, 2011].

ВЫВОДЫ

Процессы разрушения горных пород приводят к перераспределению 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, объединение которых приводит к образованию магистральных трещин. В некоторых случаях последние могут возникать одномоментно, что сразу приводит к отделению фрагментов от образца. Иногда развитие магистральной трещины может происходить поэтапно с образованием у ее краев участков, выходящих на поверхность образца, с раскрытием, обеспечивающим свободный выход флюида вместе с содержащимся в нем радоном в измерительную камеру. При этом каждое из таких событий приводит к появлению аномалии ОАР, регистрируемой в эксперименте. Количество отделившихся от образца фрагментов, а также число этапов в развитии магистральной трещины может быть различным. Оно определяется структурно-петрофизическими особенностями горной породы, величиной и скоростью увеличения нагрузки. В обсуждаемом нами эксперименте после окончательного разрушения образца было обнаружено три отделившихся от него фрагмента. Это означает, что соответствующие магистральные трещины сформировались без задержек, в один этап.

Таким образом, 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 [Булашевич и др., 1996; Trigue et al., 1999]. Более высокие амплитуды аномалий, наблюдающиеся при этом, в основном обусловлены

большими характерными размерами области разрушения, из которой происходит аккумуляция радона. Кроме того, полученные данные свидетельствуют о том, что в лабораторных условиях не удастся проследить характер относительного изменения открытой пористости и УВП горной породы на протяжении всего процесса разрушения. В данном случае оказалось возможным оценить относительное изменение этих параметров лишь к моменту возникновения той или иной аномалии ОАР.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проекты 12-Т-5-1004, 12-П-5-1018 и 12-С-5-1029).

ЛИТЕРАТУРА

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации радона 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, т. 49 (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 // ДАН, 1996, т. 346, № 1, с. 245—248.

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

Bergelt H., Militzer H., Stolz W. Die Radonexhalation von Festgesteinsproben 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.

*Рекомендована к печати 24 января 2014 г.
В.Н. Шаратовым*

*Поступила в редакцию
11 марта 2013 г.*