

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО - ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЧАГА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЗАТУХАЮЩЕМ ВО ВРЕМЕНИ РЕЖИМЕ ВЫДЕЛЕНИЯ РАДОНА

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

**Аннотация.** Решена задача по описанию миграции радона в трещиновато-пористой среде для случая, когда интенсивность его выделения в очаге разрушения падает во времени. Полученные результаты позволяют повысить эффективность алгоритма решения обратной задачи по определению пространственно-временных характеристик очага разрушения.

*Трещиновато-пористая среда, разрушение, миграция радона.*

## DETERMINATION OF THE SPACE - TIME CHARACTERISTICS OF DESTRUCTION AREA FOR THE DAMPING IN TIME REGIME OF RADON EXHALATION

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

**Abstract.** The problem for description of radon migration in the crack porous medium is solved for a case when intensity of radon exhalation in the destruction area falls in time. The received results allow increasing the efficiency of algorithm of the inverse problem decision by determination of the space-time characteristics of the destruction area.

*Crack porous medium, rock failure, radon migration.*

### **Введение**

Временные аномалии концентрации радона несут информацию об изменении физических характеристик геосреды и параметров миграции радон содержащего флюида, являясь индикаторами процессов, приводящих к их появлению. С этой точки зрения информативными являются, в частности, высокоамплитудные аномалии концентрации радона (как правило, связанные с разрушением горных пород), и поэтому они могут быть использованы для восстановления соответствующих изменений структурно-петрофизических характеристик разрушающейся геосреды. Количественная интерпретация временных аномалий концентрации радона позволяет полнее изучить характер протекания процессов разрушения в геосреде и вплотную подойти к выявлению причин и условий, влияющих на осуществление того или иного режима их развития.

Разработана количественная физическая модель и построена система уравнений для описания миграции радона в разрушающейся трещиновато-пористой среде (ТПС), а также предложен механизм обра-

зования высокоамплитудных аномалий его концентрации (Беликов, Шестаков, 1997а; б). Основной модели является предположение о том, что причиной появления указанных аномалий является вскрытие недоступных до разрушения пор и трещин, а также блоков пород, содержащих радон.

Иными словами, по мере протекания процессов разрушения радон высвобождается из изолированных пор, поступая в открытое пористое пространство из которого берутся пробы газа на анализ. В результате проведения количественной интерпретации экспериментального материала по временным вариациям концентрации радона перед горными ударами в шахтах было изучено относительное изменение открытой пористости и удельной внутренней поверхности в процессе разрушения, определены пространственно-временные характеристики очага разрушения (его характерный размер, расстояние от точки наблюдения, время события). Кроме того, были получены такие параметры, как скорость фильтрации флюида и коэффициент диффузии радона в нем, а также коэффициент инжекции (отношение выделившегося в очаге количе-

ства радона к фоновой его концентрации в ТПС) (Беликов, Шестаков, 1997а; б; 2000).

При определении пространственно-временных характеристик предполагалось, что в очаге разрушения в проницаемую ТПС мгновенно вбрасывается некоторое количество (импульс) радона. Возникшая аномалия затем эволюционирует в пространстве и времени. В результате сравнения импульса концентрации радона в точке наблюдения с экспериментальной кривой его временных вариаций были определены указанные выше характеристики. Следует отметить, что, вообще говоря, такая модель не совсем адекватно описывает процесс возникновения долговременной аномалии концентрации радона, так как не учитывает растянутость во времени процесса разрушения. А именно, гораздо естественнее и правильнее предположить, что генерация импульса концентрации радона в очаге происходит в течение некоторого конечного временного интервала. При этом важно также учитывать и характер режима выделения (инъекции) радона в процессе разрушения. В работе (Беликов, Шестаков, 2007) предполагалось, что процесс высвобождения радона в очаге, порождающем аномалию, происходит равномерно (прямоугольный импульс концентрации радона) в течение промежутка времени  $T$  (длительность работы очага), равного периоду активизации процессов разрушения. На самом же деле, инъекция радона происходит неравномерно, затухая к концу периода  $T$ . Поэтому целесообразно рассмотреть более правдоподобный с физической точки зрения случай, когда интенсивность высвобождения радона в очаге разрушения падает во времени по тому или иному закону.

Таким образом целью данной работы является разработка алгоритма, и проведение количественной интерпретации высокоамплитудных аномалий концентрации радона при затухающем во времени режиме выделения радона в очаге разрушения.

#### **Постановка и решение задачи**

Уравнение, описывающее миграцию радона в ТПС, в одномерном случае, имеет вид (Беликов, Шестаков, 2007):

$$\frac{\partial U}{\partial t} - D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + v \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U}{\tau} = b \Omega_0, \quad (1)$$

где  $U$  – содержание радона в открытых порах (из которых берутся пробы газа на анализ);  $b$  – поток радона в открытые поры из скелета;  $\Omega_0$  – удельная внутренняя поверхность (предполагаемая постоянной), разделяющая открытые поры и скелет горной породы;  $v$  – скорость фильтрации флюида;  $D$  – коэффициент диффузии радона во флюиде;  $t=1/l$  – время жизни радона ( $l$  – постоянная распада).

Данное уравнение описывает процесс миграции радона по проницаемой зоне из очага разрушения в точку наблюдения. До начала периода активизации процессов разрушения концентрация радона в открытых порах стационарна, однородна по пространству и определяется равновесием между его распадом и притоком из скелета горной породы. Такую концентрацию мы будем называть фоновой  $U_\phi$ .

Таким образом с учетом (1)  $U_\phi$  может быть представлена в виде

$$U_\phi = b \Omega_0 \tau = B. \quad (2)$$

В момент активизации процессов разрушения в проницаемое открытое пористое пространство в очаге инжектируется дополнительное количество радона при ликвидации перемычек, отделяющих указанное пространство от изолированных до разрушения отдельных пор или групп таких пор и трещин (блоков). Возникшая аномалия затем эволюционирует в пространстве и времени в процессе движения (по проницаемой зоне) импульса радона вместе с флюидом по закону Дарси в точку наблюдения с одновременным его размыванием за счет диффузии и падением концентрации за счет естественного распада.

Будем искать решение уравнения (1) в виде суммы

$$U = U_1(x,t) + U_\phi, \quad (3)$$

где  $U_\phi$  определяется соотношением (2), а  $U_1(x,t)$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} - D \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} + v \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{U_1}{\tau} = 0 \quad (4)$$

и представляет собой концентрацию радона, обусловленную процессами разрушения. Ранее нами было показано, что диффузионная составляющая потока радона мала по сравнению с конвективной (Беликов, Шестаков, 2007), поэтому уравнение (4) упрощается:

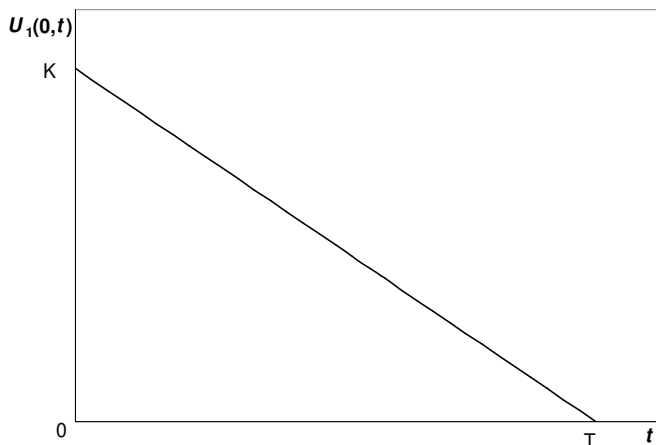
$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + v \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{U_1}{\tau} = 0 \quad (5)$$

Граничное условие, соответствующее случаю, когда интенсивность выделения радона в очаге разрушения падает во времени по линейному закону, выглядит так:

$$U_1(0, t) = \begin{cases} K \left(1 - \frac{t}{T}\right), & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (6)$$

где  $K$  – некоторая постоянная, равная количеству радона, инжектированного в открытое трещиновато-пористое пространство в очаге в момент времени  $t=0$ .

Графическая иллюстрация краевого условия (6) приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость аномальной концентрации радона в очаге разрушения  $U_1(0, t)$  от времени. Иллюстрация краевого условия (6)

Начальное условие, в силу предположения о том, что процессы разрушения начинают происходить лишь при  $t > 0$ , будет следующим:

$$U_1(x, 0) = 0 \quad (7)$$

Решение уравнения (5) с граничными и начальными условиями (6) и (7) было получено с использованием преобразования Лап-

ласа по времени. Тогда, в соответствии с (2) и (3), решение уравнения (1) примет вид:

$$U(x, t) = B + K \exp\left(-\frac{x}{v\tau}\right) \times \left[ \eta\left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{T} \left(t - \frac{x}{v}\right) \eta\left(t - \frac{x}{v}\right) + \frac{1}{T} \left(t - T - \frac{x}{v}\right) \eta\left(t - T - \frac{x}{v}\right) \right] \quad (8)$$

В выражении (8) использована функция Хевисайда  $\eta(t)$ , определяемая следующим образом:

$$\eta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

С использованием решения (8) может быть получено выражение для полного потока радона в ТПС

$$J = vU. \quad (9)$$

Затем следует определить общее количество радона  $P$ , поступающего в полость, где происходит его регистрация. Величина  $P$  имеет вид (Беликов, Шестаков, 2000)

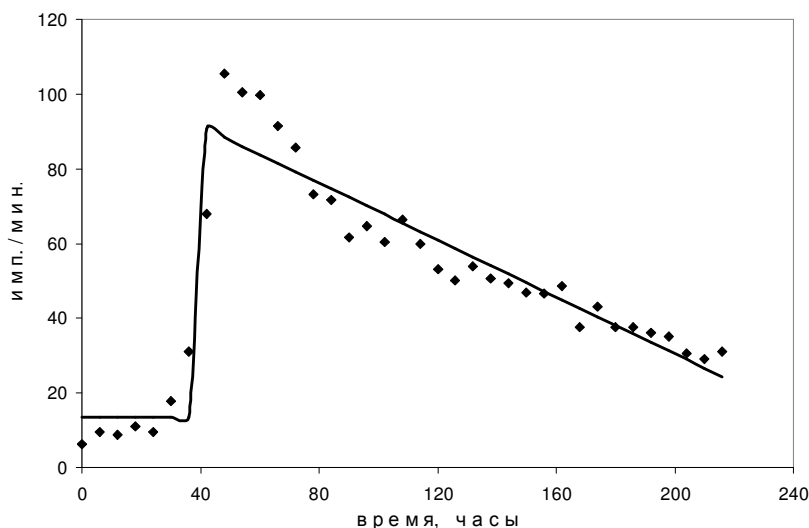
$$P = \varepsilon \Delta S \Delta t J. \quad (10)$$

Здесь  $\varepsilon$  – коэффициент пропорциональности, определяемый методикой эксперимента,  $\Delta S$  – поверхность, через которую поступает радон в полость,  $\Delta t$  – промежуток времени, в течение которого происходит накопление радона. Далее должно быть вычислено относительное количество радона, регистрируемого в полости (величина  $P/P_0$ ), где  $P_0 = \varepsilon (\Delta S) (\Delta t) v B$  характеризует фоновое значение  $P$ .

### Численные расчеты и обсуждение результатов

Определение пространственно-временных характеристик очага разрушения и параметров миграции радона может быть осуществлено на основе сравнения экспериментальных данных по относительной (в сравнении с фоном) концентрации радона с теоретическими значениями отношения  $P/P_0$ , рассчитанного согласно (8-10).

На рис. 2 приведены результаты процедуры минимизации, основанной на сравнении экспериментальных данных по временным вариациям концентрации радона, взятым из работы (Булашевич и др., 1996), с теоретическими (сплошная линия), полученными в соответствии с (8)-(10).



**Рис. 2.** Сравнение наблюдаемых значений временных вариаций концентрации радона (маркеры) с теоретическими (сплошная линия) для модели (6)

Определялись следующие параметры:  $H=K/B$ ,  $x/v$  и  $T$ . Первый из них ( $H=K/B$ ), который, как и в (Беликов, Шестаков, 2000; 2007), мы назовем коэффициентом инъекции,  $H=7,9$ . Второй параметр  $x/v$  равен 42 ч, где  $x$  в данном случае принимает фиксированное значение, равное расстоянию от очага разрушения до точки наблюдения. Длительность работы очага  $T=202,7$  ч.

Следует отметить, что коэффициент инъекции  $H$  имеет значение, меньшее того, которое мы получили ранее (Беликов, Шестаков, 2000). Тем не менее, и в данном случае, рассчитанное значение  $H$  нельзя объяснить только увеличением удельной внутренней поверхности в процессе разрушения и, следовательно, необходимо допустить, что в породе имеются включения других минералов с другой, повышенной по сравнению с вмещающей средой, генерацией радона и другим потоком с единицы поверхности. Иными словами, в результате процессов разрушения в открытое трещиновато-пористое пространство в очаге попадает радон из изолированных пор с повышенным (по сравнению с вмещающей средой) его содержанием. Такие включения, как правило, отличающиеся по своим упругим свойствам от основной породы, являются концентраторами напряжений и в первую очередь именно в их окрестности развиваются процессы разрушения. Расстояние от источника до точки наблюдения  $x$  в данной модели непосредственно не определяется, а входит в отношение  $x/v$ . Следовательно, значение  $x$

может быть получено только в том случае, когда известна скорость фильтрации  $v$ . К сожалению, определение величины  $v$  при проведении радонового мониторинга не производилось. Отсутствуют также данные о проницаемости горных пород в месте наблюдения, которые позволили бы оценить скорость фильтрации флюида  $v$ , в соответствии с законом Дарси. Если же использовать значение  $v=0,0096$  см/сек, полученное нами ранее на основе того же экспериментального материала (Беликов, Шестаков, 2000), то (с учетом значения  $x/v=42$  ч) расстояние до очага разрушения  $x$  составит в данном случае 14,5 м. С другой стороны, отношение  $x/v$  (при фиксированном значении  $x$ ) определяет время события (промежуток времени, прошедший от начала функционирования очага до момента появления радоновой аномалии в точке наблюдения).

Из сравнения величин  $x/v=42$  ч и  $T=202,7$  ч следует, что в момент, когда рассматриваемая радоновая аномалия появилась в точке наблюдения, очаг еще продолжал функционировать (период активизации процессов разрушения еще не завершился). Полученное значение величины расстояния от точки наблюдения до очага разрушения  $x$  говорит о том, что область зондирования радоновым мониторингом имеет характерные размеры меньшие тех, которые мы получили ранее.

Следует отметить, что решение уравнения (5) может быть получено (с использованием преобразования Лапласа или метода

характеристик) для произвольного граничного условия  $U_1(0, t)$

$$U_1(x, t) = e^{-\frac{x}{vT}} U_1\left(0, t - \frac{x}{v}\right) \eta\left(t - \frac{x}{v}\right). \quad (11)$$

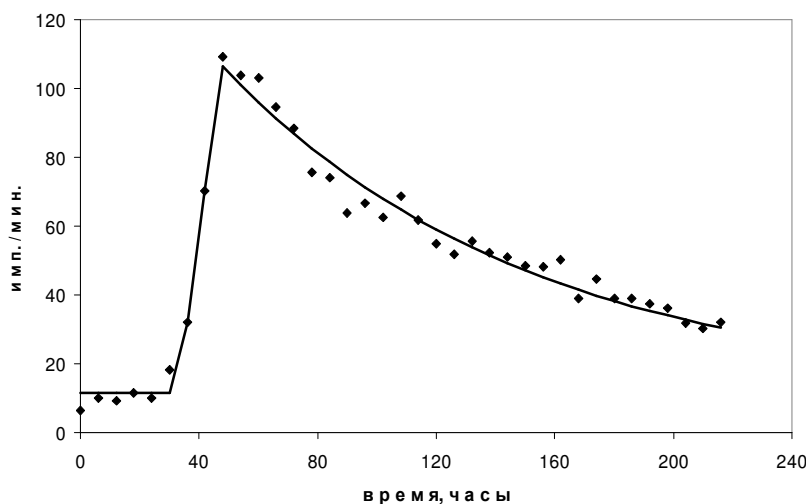
Однако среди всех формально возможных вариантов конкретного вида функции  $U_1(0, t)$  необходимо использовать только тот, который адекватно описывает затухающий режим высвобождения радона в очаге разрушения. С этой точки зрения, наряду с (6), можно рассмотреть, например, релаксационный (экспоненциально убывающий во времени) режим падения темпов выделения радона, аналитически описываемый выражением

$$U_1(0, t) = Ke^{-\frac{t}{T}}. \quad (12)$$

Величину  $T$  в (12) уже нельзя трактовать, как длительность работы очага разрушения. В данном случае  $T$ , по физическому смыслу, определяет время релаксации процессов выделения радона в очаге. Если  $t/T \ll 1$ , то выражение (12) переходит в (6). Таким образом, лишь в том случае, когда  $t/T < 1$ , параметр  $T$  по порядку величины сравним с периодом активизации процессов разрушения. При граничном условии (12) с учетом (11) решение уравнения (1) будет иметь вид

$$U(x, t) = B + K \exp\left(-\frac{x}{vT}\right) \exp\left(-\frac{t - \frac{x}{v}}{T}\right) \eta\left(t - \frac{x}{v}\right). \quad (13)$$

С использованием (13), решение обратной задачи с целью определения пространст-



венно-временных характеристик очага разрушения дало следующие результаты:

$H=K/B=9,1$ ;  $x/v=36,9$  ч;  $T=115,1$  ч;  $x=12,8$  м (при  $0,0096$  см/сек). Сравнивая их с полученными выше для случая (6) и (8) видим, что значения параметров  $H=K/B$  и  $x/v$ , а также расстояния до очага разрушения  $x$  получились близкими. Более существенное отличие в величинах  $T$  обусловлено тем, что физический смысл параметра  $T$  в (6) и (12) различен.

И, наконец, отметим еще одно важное обстоятельство, касающееся режима высвобождения радона. Очевидно, что с момента активизации процессов разрушения темпы выделения радона в очаге вначале возрастают, достигая максимума, а затем падают по тому или иному закону. Иными словами, периоду затухания процессов высвобождения радона в очаге должен предшествовать конечный промежуток времени  $t_0$ , когда темпы выделения радона увеличиваются, например, по линейному закону. Изложенные соображения дают основание рассмотреть следующее граничное условие для уравнения (5), более адекватно описывающее характер развития процессов разрушения в очаге:

$$U_1(0, t) = \begin{cases} K \frac{t}{t_0}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ K \exp\left(-\frac{t-t_0}{T}\right), & t > t_0 \end{cases}. \quad (14)$$

Решив уравнение (1), при условии (14) и используя полученный результат (который мы для краткости не приводим) в обратной задаче, мы получили, что  $t_0=14,2$  ч;  $T=104,1$  ч;  $x/v=32,8$  ч;  $H=K/B=10,4$ ;  $x=11,3$  м (при  $v=0,0096$  см/сек). Период активизации процессов разрушения приблизительно совпадающий в данном случае с величиной  $t_0+T$ , порядка  $118,3$  ч.

Результаты процедуры минимизации представлены на рис. 3.

**Рис. 3.** Сравнение наблюдаемых значений временных вариаций концентрации радона (маркеры) с теоретическими (сплошная линия) для модели (14)

Немаловажно отметить, что использование условия (14) и введение дополнительного параметра  $t_0$  позволило значительно (более, чем в два раза) уменьшить среднеквадратичное отклонение теоретических от экспериментальных данных (рис. 2, 3) по сравнению с моделями (6) и (12). Кроме того, само по себе знание величины  $t_0$ , дает дополнительную информацию о характере развития процессов разрушения и режиме выделения радона в очаге.

#### **Заключение**

Главный вывод, который можно сделать в результате проведенного исследования состоит в том, что результаты решения обратной задачи по определению пространственно-временных характеристик очага разрушения зависят от используемой физической модели для описания процессов выделения радона в очаге разрушения. Выбор последней, в свою очередь определяется степенью полноты информации о процессах разрушения горных пород и их физических характеристиках.

Таким образом, для того, чтобы повысить достоверность результатов количественной интерпретации временных аномалий концентрации радона, необходимо кроме радоновых измерений, проводить синхронные натурные геофизические исследования, для получения дополнительной информации о структурно-петрофизических свойствах горных пород. В частности, полученные экспериментальные данные по проницаемости

горных пород, могли бы позволить непосредственно (и независимо) определять скорость фильтрации флюида и, следовательно, как мы сказали выше, расстояние до очага разрушения.

Работа поддержана программой № 16 Президиума РАН и программой № 6 Отделения наук о Земле РАН.

#### **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. Использование временных вариаций концентрации радона для определения структурных характеристик геосреды. II // Дефектоскопия. 1997. № 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 // Изв. РАН. Физика земли. 2007. № 5. С. 80–87.
- 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.