

**ВАРИАЦИИ РАДОНОВЫХ ЭМАНАЦИЙ
КАК ХАРАКТЕРИСТИКА СТЕПЕНИ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ
РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ**

А.А. Спивак, В.В. Шувалов

Для повышения достоверности картирования разломных зон земной коры и оценки их современной активности при выборе участков под строительство особо ответственных сооружений предлагается одновременно с пространственными характеристиками поля радоновых эманаций привлекать данные о временных вариациях объемной активности подпочвенного радона. Показано, что наиболее слабые участки разломных зон, характеризующиеся повышенной деформируемостью и, следовательно, предрасположенностью к потере механической устойчивости в процессе строительства и долговременной эксплуатации крупномасштабных объектов характеризуются повышенными временными вариациями радоновых эманаций в результате воздействия лунно-солнечного прилива и барических вариаций в атмосфере. Сравнение результатов численных расчетов и данных инструментальных наблюдений свидетельствует о заметных изменениях как проницаемости разломных зон, так и характеристик фильтрационного потока в приливной волне.

Введение

Нарушения сплошности земной коры в виде разломных зон или крупных трещин являются наиболее важным объектом исследований как при выборе мест под строительство, так и в процессе геодинамического обеспечения долговременной безопасной эксплуатации особо ответственных объектов повышенного риска (АЭС, подземные захоронения радиоактивных отходов промышленности, крупные гидроузлы и т.д.). Помимо этого значительный интерес к разломным зонам, характеризующимся, как правило, повышенной проницаемостью, связан с исследованием проблем освоения нефте- и газоносных залежей.

Более высокая нарушенность горных пород в разломных зонах, повышенная подвижность их внутренней блоковой структуры, интенсивное преобразование вещества вследствие деформирования в условиях постоянно действующих внешних возмущений и, наконец, изменение геометрических и структурных свойств со временем – все это оказывает влияние на динамические характеристики разломных зон. Именно динамическую реакцию разломных зон на внешние возмущения следует рассматривать в качестве основного фактора, определяющего положение активных разломов.

Одним из действенных способов картирования разломов является радоновая съемка, основанная на регистрации объемной активности R изотопа радона ^{222}Rn в атмосфере почв [Семинский, Бобров, 2009; Спивак и др., 2009; Уткин и др., 2008]. Газовые эманации, интенсивность которых определяется проницаемостью среды, напрямую характеризуют степень ее нарушенности [Спивак, Шувалов, 2008].

В настоящей работе анализируются особенности эманаций природного радона с целью установления разломных зон и оценки их деформируемости при слабых внешних воздействиях.

Особенности радоновых эманаций в разломных зонах

Особенности пространственных характеристик эманаций радона, как и любого другого газа, определяются распределением подземных источников радона в приповерхностных массивах горных пород и пространственными характеристиками фильтрационных свойств среды. Можно предполагать, что большинство разломных зон, для которых вещество-заполнитель отличается повышенной нарушенно-

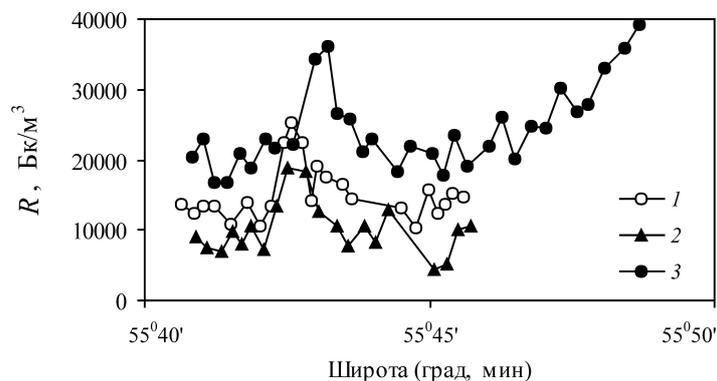


Рис. 1. Пространственные вариации объемной активности подпочвенного радона вдоль профилей 1–3, пересекающих Ногинский разлом в субмеридианном направлении

стью по сравнению с серединными участками структурных блоков земной коры, для которых они служат границами, характеризуется повышенной проницаемостью. Это означает, что наиболее интенсивная миграция подземных газов, включая радон, происходит по разломным зонам.

Действительно, анализ результатов инструментальных наблюдений свидетельствует о повышенных значениях объемной активности подпочвенного радона R в разломных зонах [Спивак и др., 2009; Спивак, 2010; Moussa, El-Arabi, 2003]. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты регистрации R вдоль нескольких профилей, субмеридианально пересекающих Ногинскую тектоническую структуру (Московская синеклиза). Ногинский разлом характеризуется хорошо выраженным субширотным простираанием [Локтев, Спивак, 2006]. По этой причине локальные максимумы на экспериментальных зависимостях, приведенных на рис. 1, в районе $55^{\circ}42' N$ (профили 1–3) и в районе $55^{\circ}47' N$ (профили 1 и 2) допустимо рассматривать как серединные участки разломных зон.

Однако здесь следует особо подчеркнуть, что наличие локальных максимумов на пространственных распределениях R является необходимым, но недостаточным условием для картирования разломов и оценки их современной активности. Более интенсивная эманация радона может быть связана, например, с неравномерностью распределения источников по глубине и вдоль исследуемого профиля [Локтев, Спивак, 2006].

Существенно более достоверные результаты дает способ, на основе которого определяется динамика активных зон в сопоставлении с серединными участками структурных блоков земной коры [Спивак и др., 2009]. Действительно, основным характерным признаком активности разлома на современном этапе является его повышенная деформируемость по сравнению с окружающим массивом. Указанное свойство проявляется реакцией разломной зоны на внешние слабые возмущения, например, приливную деформацию земной коры либо барические вариации в приземном слое атмосферы.

Реакцию поля радоновых эманаций на лунно-солнечный прилив хорошо демонстрирует рис. 2, на котором приведены результаты долговременных наблюдений в период высокой стабильности метеоусловий (малые вариации атмосферного давления и незначительные осадки). Из приведенных данных следует, что объемная активность подпочвенного радона в разломной зоне превышает активность радона на серединном участке структурного блока в течение всего периода измерений. Одновременно с этим необходимо отметить и то, что амплитуда временных вариаций величины R в разломной зоне существенно выше амплитуды вариаций R в структурном блоке.

Характер временных вариаций R , совпадающий по периодам и двухнедельной цикличности с изменением приливной силы F , а, главное, – высокосignимая корреляция между величинами R и F [Спивак и др., 2009] позволяет сделать вывод о том, что основной причиной вариаций объемной активности подпочвенного радона является лунно-солнечный прилив. При этом величину изменения интенсивности радоновых эманаций вследствие действия приливной силы допустимо характеризовать коэффициентом приращения R :

$$K_R = \frac{R_{\max}}{R_{\min}},$$

где R_{\max} и R_{\min} – соответственно максимальное и минимальное суточное значение объемной активности подпочвенного радона, зарегистрированные в конкретном пункте за вычетом тренда, связанного с вариацией атмосферного давления.

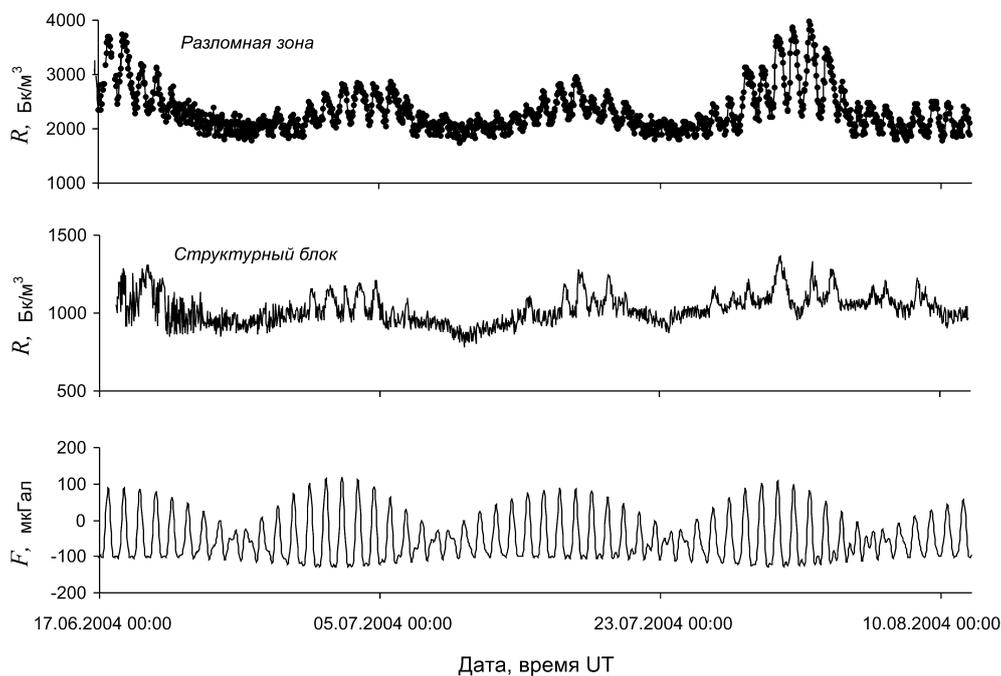


Рис. 2. Временные вариации объемной активности подпочвенного радона в период высокой стабильности метеоусловий в пунктах, расположенных в зоне Нелидово-Рязанской тектонической структуры (верхняя панель) и на серединном участке структурного блока земной коры (средняя панель); F – вертикальная составляющая приливной силы (нижняя панель)

Повышенный коэффициент приращения R в приливной волне деформаций (увеличение деформации среды с ростом приливной силы приводит к более интенсивной эманации газа), а также его сильная изменчивость во времени (рис. 2) определяет жесткие условия на проведение профильной радоновой съемки. При сопоставительных площадных и профильных измерениях регистрация объемной активности (а также концентрация радона) в разных измерительных пунктах должна выполняться в периоды времени, соответствующие одинаковым фазам приливной деформации с учетом околосуточных периодичностей и двухнедельной цикличности приливной силы (рис. 2), либо в периоды минимальных вариаций F (в этом случае сравниваются средние значения за время регистрации).

Сравнение коэффициентов приращения R в результате действия прилива для разных измерительных пунктов позволяет существенно повысить достоверность картирования активных разломных зон.

Как уже упоминалось выше, при картировании разломов данные по пространственному распределению объемной активности подпочвенного радона должны дополняться результатами анализа отклика эманационного поля в каждом пункте наблюдений на слабые внешние возмущения. Это хорошо демонстрирует рис. 3, на котором в качестве примера приведены совместно результаты определения величины R вдоль субмеридианного профиля I , пересекающего Ногинский разлом, и относительный коэффициент приращения K_R в приливной волне деформации.

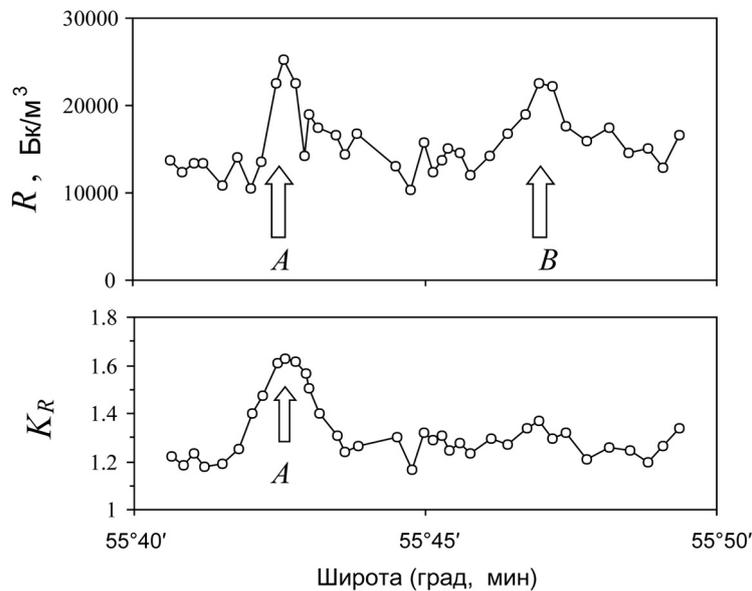


Рис. 3. Вариация R и относительный коэффициент приращения объемной активности подпочвенного радона в приливной волне вдоль одного из профилей, пересекающих Ногинскую разломную зону [Локтев, Спивак, 2006]

Из данных рис. 3 видно, что при наличии двух ярко выраженных максимумов A и B на распределении R вдоль профиля регистрации (обозначены вертикальными стрелками), которые в первом приближении допустимо интерпретировать как положения серединной линии разломных зон [Семинский, 2009; Уткин, 2008], на графике относительного коэффициента приращения K_R наблюдается один локальный максимум A .

Результаты дополнительного геологического анализа подтверждают наличие проявлений разломной зоны на широте, соответствующей максимуму A . Таким образом, привлечение дополнительной информации о временных вариациях интенсивности радоновых эманацй позволяет с большей точностью определять положение серединных (наиболее проницаемых) участков разломных зон.

Расчет радоновых эманацй через разломную зону

Количество мигрирующего из недр природного радона определяется интенсивностью его генерации в урансодержащих геологических формациях и временем миграции, которое, в свою очередь, определяется проницаемостью грунтов и горных пород. Это связано с тем, что активность радона зависит от времени его распространения от источника, поскольку количество радиоактивных распадов в единицу времени N уменьшается со временем t согласно зависимости:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где N_0 – начальная активность радона в источнике; $\lambda = \ln 2 / T_0$, T_0 – время полураспада радона-222.

В рамках модели диффузионно-конвективного переноса газа в проницаемой среде уравнение, описывающее концентрацию радона, имеет вид [Новиков, Копков, 1993]:

$$\frac{dR}{dt} = D \frac{d^2 R}{dx^2} + v \frac{dR}{dx} - \lambda R + \frac{Q}{m}, \quad (2)$$

где в данном случае R выражено в $\text{Ки}/\text{м}^3$, m – пористость среды (материала-заполнителя канала миграции, представленного в нашем случае разломной зоной), D – эффективный коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$), v – скорость конвективного переноса радона ($\text{м}/\text{с}$), Q – функция источника радона (скорость выделения эманаций в поровое пространство в единице объема среды) в $\text{Ки} \cdot \text{с}/\text{м}^3$, x и t – соответственно путь и время фильтрации газа.

В подавляющем большинстве случаев перенос эманаций осуществляется в среде, не обогащенной радием и, таким образом, можно принять $Q = 0$ (перенос подпочвенного радона осуществляется от источника, расположенного на глубине¹).

Будем рассматривать задачу о миграции радона с глубины в следующем приближении.

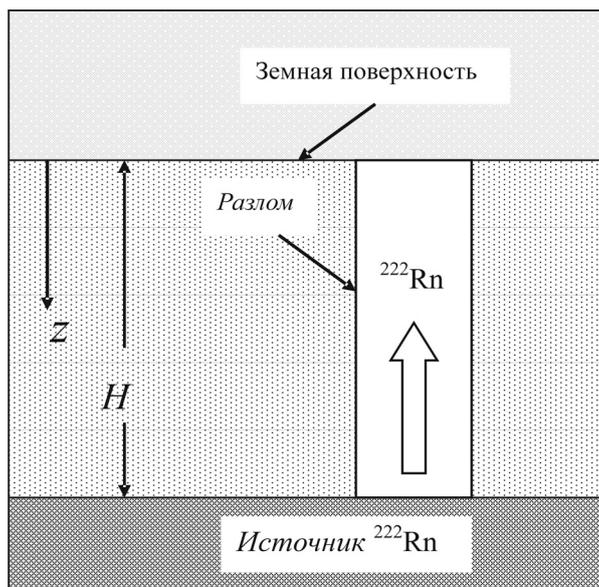


Рис. 4. Схема миграции радона по разлому

Примем, что источник радона расположен на глубине $z = H$ и характеризуется постоянной во времени активностью радона R_0 (рис. 4). Канал миграции в виде разломной зоны представляет собой щель вертикального падения, которая заполнена дробленным материалом [Wibberly et al., 2008]. Параметры фильтрационного течения газа описываются уравнением (2) и определяются двумя параметрами: D и v .

¹ Для Московской синеклизы источники радона в виде отложений Бобриковской свиты визейского яруса нижнего карбона представлены в основном глинами и серыми песками, расположены на глубине около 200 м [Спивак, 2006].

В настоящей работе уравнение (2) решалось для случая одномерного потока газа методом Монте-Карло [Metropolis, Ulam, 1949]¹. Специальный анализ, связанный с выбором величин D и ν не проводился [Schery et al., 1982]. Параметры задачи варьировались в широких пределах. Окончательный выбор значений D и ν определялся сравнением результатов расчета и данных инструментальных наблюдений. При этом, как это и ожидалось, отмечается заметная зависимость решения от величины используемых параметров D и ν .

На первом этапе определялось распределение R с глубиной в отсутствие внешних возмущений (случай установившейся фильтрации).

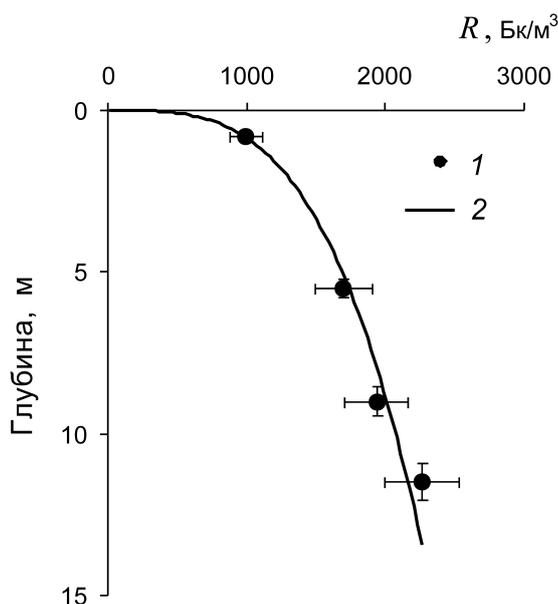


Рис. 5. Изменение объемной активности радонных эманаций с глубиной; 1 – данные регистрации, 2 – результаты расчета для случая $D^* = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$; $H = 200 \text{ м}$; $\nu = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $\alpha = \pi/2$.

Результаты решения в виде зависимости относительной объемной активности радона от глубины z приведены на рис. 5. Там же для сравнения представлены результаты регистрации объемной активности подпочвенного радона для одного из участков земной коры Московской синеклизы [Спивак и др., 2008]. Данные рис. 5 свидетельствуют о том, что при соответствующем выборе параметров задачи результаты расчетов совпадают с данными инструментальных наблюдений.

Влияние прилива на радоновые эманации

Влияние приливной деформации на характеристики канала миграции связано с периодическим изменением его раскрытия, причем по мере увеличения приливной силы F возникает и увеличивается деформация растяжения твердой среды. Это приводит в первую очередь к увеличению раскрытия разлома, а, следовательно, росту пористости вещества, его заполняющего, и как результат – увеличению эффективного коэффициента диффузии D (здесь следует отметить, что в реальном случае

¹ Метод расчета выбран из соображений дальнейшего использования численной программы при более сложных условиях фильтрации газа.

величины D , m и ν не являются константами и в отсутствие возмущающих воздействий; однако при таких условиях решение уравнения (2) отсутствует).

В дальнейшем будем полагать, что внешнее возмущающее воздействие описывается некоторой функцией времени $h(t)$. С учетом этого примем:

$$D = D_0\{1 + h(t)\}, \quad (3)$$

где D_0 – эффективный коэффициент диффузии в невозмущенном состоянии.

Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о сложном характере диффузионного процесса в земной коре. Анализ распределения радоновых эманацій с глубиной [Спивак и др., 2008] свидетельствует, в частности, о том, что зависимость объемной активности радона от глубины скорее соответствует случаю нелинейной диффузии (когда коэффициент диффузии определяется концентрацией газа). Поскольку объемная активность радона падает по мере приближения к свободной поверхности, это означает, что коэффициент D должен зависеть от глубины, причем с глубиной его значение увеличивается.

Рассматривая задачу в первом приближении, будем для простоты задаваться зависимостью эффективного коэффициента диффузии D_0 не от величины R , а от глубины в виде:

$$D_0 = D_* f(z). \quad (4)$$

Объединяя зависимости (3) и (4) получаем:

$$D = D_*\{1 + h(t)\}f(z). \quad (5)$$

Величину скорости конвективного переноса ν будем считать постоянной вдоль пути миграции.

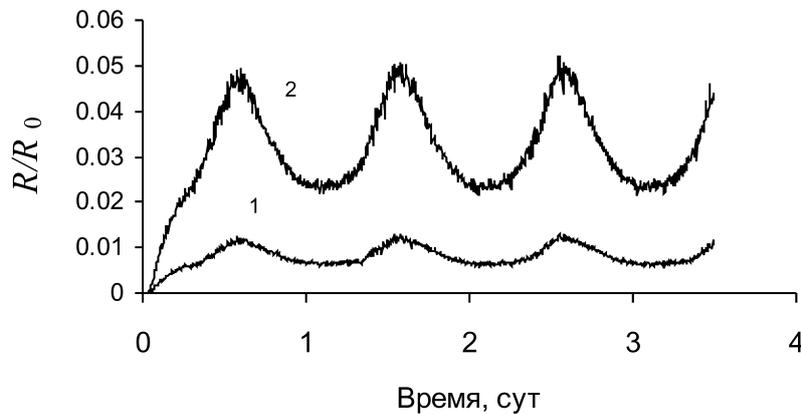


Рис. 6. Характер временных вариаций R на глубинах 1 (1) и 5 (2) м, полученный при расчетах для случая: $D_* = 0,5$; $B = 0,7$; $H = 200$ м; $T = 24$ час; $\nu = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м/с; $\alpha = \pi/2$.

В качестве примера на рис. 6 приведен вид зависимости $R(t)$, полученный в результате расчетов для конкретного вида функций $h(t)$ и $f(z)$:

$$h(t) = B \left[\cos \left(\frac{t}{T} \right) \right], \quad (6)$$

$$f(z) \sim \left\{ 1 + \left[\frac{z - H}{H} \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

где B – постоянный коэффициент, T – характерный период возмущающего воздействия¹.

Из данных рис. 6 видно, что, если исключить начальный этап формирования потока, составляющий в данном случае около 12 ч, временные вариации R выходят на установившийся режим, который характеризуется хорошо выраженной периодичностью. При этом ход вариаций R полностью соответствует результатам наблюдений (рис. 2). Последнее позволяет сравнивать результаты вычислений с данными инструментальных наблюдений и, таким образом, определять параметры D и ν для конкретных условий.

В качестве примера на рис. 7 приведены совместно результаты расчетов и данные регистрации объемной активности подпочвенного радона R в зоне субвертикального Тункинского разлома (Байкальская рифтовая зона). При вычислениях принималось

$$h(t) = AF(t),$$

где в качестве функции $F(t)$ выбиралась функция, описывающая вертикальную компоненту приливной силы [Wenzel, 1994]. Значения функции $f(z)$ выбиралось в соответствии с зависимостью (7).

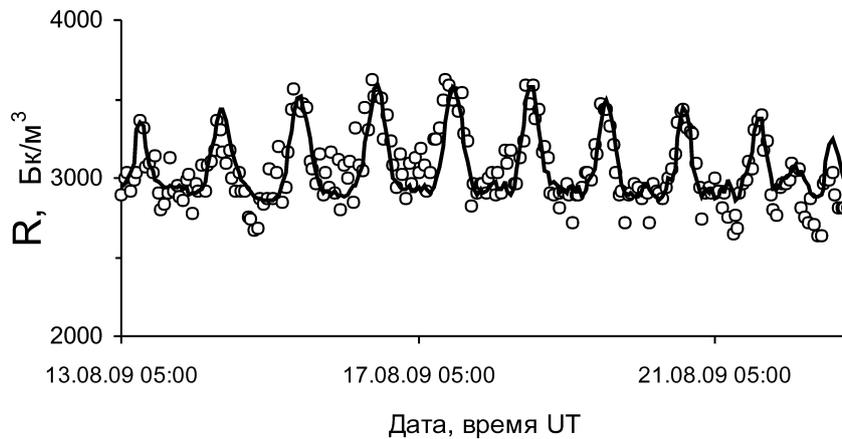


Рис. 7. Временные вариации объемной активности подпочвенного радона в зоне Тункинского разлома: сплошная кривая – результаты вычислений для случая $D_* = 0,6$; $A = 0,15 \frac{1}{\text{мкГал}}$; $H = 200$ м; $\nu = 2 \cdot 10^{-3}$ м/с; $\alpha = \pi/2$.

Представленные на рис. 7 данные свидетельствуют о том, что предложенная простая модель адекватно описывает вариации объемной активности подпочвенного радона, вызванные приливной деформацией.

¹ Каждая из приливных волн представлена гармонической функцией [Магницкий, 2006]. Инерциальность процесса фильтрационного течения приводит к «объединению» близких по периодам групп приливных волн, в связи с чем, сделанное допущение с известной точностью представляется корректным [Спивак и др., 2009].

Заключение

Предложенная феноменологическая модель миграции радона вполне адекватно описывает реальные особенности эманационного процесса по разломным зонам. Модель позволяет оценивать параметры фильтрационного течения газа в виде эффективного коэффициента диффузии D и скорости конвективного переноса v путем совмещения результатов вычислений с данными инструментальных наблюдений. Полученные при этом величины D и v могут служить основой для оценки геометрических характеристик проницаемых разломов, а также механических и гидродинамических параметров материала-заполнителя [Кочарян, Спивак, 2003; Спивак, Шувалов, 2008; Schery et al., 1982].

Исследования выполнены по Программе 7 ОНЗ РАН «Внутреннее строение и физические поля Земли. Динамика взаимодействующих геосфер» при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00096-а).

Литература

- Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.
- Локтев Д.Н., Спивак А.А.* Вариации объемной активности подпочвенного радона в зоне влияния Ногинской тектонической структуры // *Динамические процессы во взаимодействующих геосферах*: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2006. С. 205–211.
- Локтев Д.Н., Спивак А.А., Харламов В.А.* Влияние слабых возмущений на эманацию радона в Тункинской рифтовой зоне. Настоящий сборник. 2011.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Наука, 2006. 390 с.
- Новиков Г.Ф., Копков Ю.Н.* Радиоактивные методы разведки. М.: Наука, 1993. 564 с.
- Семинский К.Ж., Бобров А.А.* Радоновая активность разнотипных разломов земной коры // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 8. С. 881–896.
- Спивак А.А.* Приповерхностная геофизика и взаимодействие геосфер // *Динамические процессы во взаимодействующих геосферах*: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2006. С. 186–195.
- Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Особенности эманации радона ^{222}Rn с глубиной // *Доклады академии наук*. 2008. Т. 240. № 6. С. 825–828.
- Спивак А.А., Шувалов В.В.* Вариация фильтрационных свойств тектонических нарушений в результате твердого прилива // *Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы*: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 30–43.
- Спивак А.А., Кожухов С.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. 2009. № 2. С. 34–48.
- Спивак А.А.* Особенности геофизических полей в разломных зонах // *Физика Земли*. 2010. № 4. С. 55–66.
- Уткин В.И., Юрков А.К., Косякин И.И.* Радон как детерминированный индикатор геодинамических процессов // *Изменение окружающей среды и климата*. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы / Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 303–313.
- Metropolis N., Ulam S.* The Monte Carlo Method, // *J. Amer. statistical assoc.* 1949. Vol. 44, No. 247. P. 335–341.
- Moussa M.M., El-Arabi A.-G.M.* Soil radon survey for tracing active fault: a case study along Qena-Safara road, Eastern Desert, Egypt // *Radiation measurements*. 2003. Vol. 37. P. 211–216.
- Schery S.D., Gaeddeert D.H., Wilkening M.H.* Transport of radon from fractured rock // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. No. B 4. P. 2969–2976.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0// Bull.d'Inf. Marees Terrestr. 1994. No. 118. P. 8719–8721.

Wibberly A.J., Yielding G., Di Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review // The internal structure of fault zones: implications for mechanical and fluid-flow properties. Geological Society: London. 2008. Vol. 299. P. 5–33.