

ФИЗИКА

УДК 550.835.2

ПОЛЕВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ РАДОНА И ТОРОНА В ГРУНТЕ

В.С. Яковлева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г.Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Разработан простой и достоверный полевой метод измерения эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте и других пористых материалах. Анализ результатов численных исследований переноса радона и торона в поверхностных слоях грунта показал, что плотность потока торона с поверхности грунта практически не зависит от скорости адвекции почвенных газов и изменяется только с изменением коэффициента диффузии. Этот результат показал преимущества использования торона по сравнению с радоном в предлагаемом методе. Приведено сравнение нового метода с существующими, разработанными ранее. Метод может быть полезен при решении задач массопереноса радона в пористых средах и газообмена между почвой и атмосферой.

Ключевые слова: радон, торон, коэффициент диффузии, грунт, полевой метод, плотность потока.

© Яковлева В.С., 2014

PHYSICS

MSC 76R50

IN-SITU MEASURING METHOD OF RADON AND THORON DIFFUSION COEFFICIENT IN SOIL

V.S. Yakovleva

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk c., Lenin st., 30,
Russia

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

A simple and valid in-situ measurement method of effective diffusion coefficient of radon and thoron in soil and other porous materials was designed. The analysis of numerical investigation of radon and thoron transport in upper layers of soil revealed that thoron flux density from the earth surface does not depend on soil gas advective velocity and varies only with diffusion coefficient changes. This result showed the advantages of thoron using versus radon using in the suggested method. The comparison of the new method with existing ones previously developed. The method could be helpful for solving of problems of radon mass-transport in porous media and gaseous exchange between soil and atmosphere.

Key words: radon, thoron, diffusion coefficient, soil, in-situ method, flux density

© Yakovleva V.S., 2014

Введение

Актуальность радоновой тематики в различных областях науки и практики до сих пор продолжает расти [1]-[3]. Это связано с замечательными индикаторными свойствами радиоактивного газа радона, а также его изотопа торона.

Результаты моделирования процессов переноса радона и торона в грунте имеют большое значение не только в области радиоэкологии, в основном для построения карт радоноопасности территорий, но и в строительстве, геологоразведке и геофизике, например, при изучении литосферно-атмосферных связей, или поиске предвестников землетрясений [2]-[6]. При решении подобного рода задач коэффициент диффузии радона в грунте необходимо знать непосредственно для той точки, или на той территории, которая представляет интерес.

Коэффициент диффузии радона в пористой среде

Согласно исследованиям, произведенным в работе [7], коэффициент диффузии определяется содержанием воды в порах грунта и его пористостью

$$D_e = \eta \cdot D_0 \cdot e^{-6m\eta - 6m^{14}\eta} \quad (1)$$

где D_0 – коэффициент молекулярной диффузии радона (торона) в воздухе ($D_0=0,11$ см²/с); m – коэффициент водонасыщения, т.е. степень влажности или заполнения объема пор водой, η – пористость грунта, отн. ед.

Выражение (1) было получено на основе анализа результатов измерений коэффициента диффузии в 1073 образцах грунта разного типа (от песчано-гравийных до глинистых) с различной влажностью (от полностью водонасыщенных до сухих), пористостью и плотностью.

Известно, что коэффициент диффузии радона/торона для рыхлых поверхностных отложениях изменяется незначительно, со средним значением 0,03 см²/с. Содержание влаги в поверхностных грунтах при нормальных условиях находится, в основном, в пределах от 10 до 30%, что соответствует диапазону изменения коэффициента диффузии от 0,02 до 0,04 см²/с. При полном заполнении пор водой коэффициент диффузии снижается до значения 10⁻⁵ см²/с, а в сухом грунте – достигает 0,05 см²/с.

Однако, если учитывать геолого-географические различия исследуемых территорий, это выражение не всегда может давать точный результат. Например, в работе [8] получено существенное расхождение экспериментально определенных значений коэффициента диффузии с рассчитанными из выражения (1) при $m \geq 19\%$. Поэтому, для получения более надежных результатов желательно параллельно использовать полевые методы измерения коэффициента диффузии.

Метод измерения коэффициента диффузии

К настоящему времени известно не так много полевых методов измерения эффективного коэффициента (молекулярной) диффузии D_e радона в грунте [9]-[10], и они имеют ряд существенных недостатков. Например, метод [9] заключается во введении мощного мгновенного источника радона на определенную глубину с последующим измерением изменения во времени активности радона в точке детектирования. Затем

фиксируют момент времени, в который измерена максимальная активность радона и рассчитывают эффективный коэффициент диффузии радона. При этом имеются следующие недостатки:

- 1) необходимость использования достаточно мощного источника радона;
- 2) использование специального устройства для мгновенного введения радона на заданную глубину грунта;
- 3) большая продолжительность одного измерения (не менее суток);
- 4) большая погрешность определения коэффициента диффузии, связанная с конечными размерами используемых в опыте источника радона и детектора.

Другой метод [10], основанный на диффузионной модели переноса радона в пористых средах, заключается в том, что одновременно измеряют объемную активность (ОА) радона в двух точках, расположенных на расстоянии от 0,2 м до 1 м друг от друга. Измерение в первой точке производят на глубине h_1 от 0,2 м до 0,5 м, а во второй – на удвоенной глубине. Этот метод обладает существенным ограничением – он применим только при скорости адвективного переноса радона $v=0$ см/с, поскольку используется упрощенная диффузионная модель переноса и игнорируется адвективный процесс переноса, хотя в реальных условиях v может достигать $4 \cdot 10^{-4}$ см/с и более [11]. При наличии адвективных потоков в грунте со скоростью, например, $v = 4 \cdot 10^{-4}$ см/с оценки D_e получаются заниженными в ~ 80 раз по сравнению с истинным значением, что указывает на один из основных недостатков метода [10] – огромная погрешность оценок эффективного коэффициента диффузии радона.

Задачей настоящей работы являлась разработка простого и достоверного полевого метода измерения эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте. Поскольку физико-химические свойства радиоактивных газов радона и торона практически не отличаются [12], коэффициенты диффузии радона и торона являются при одних и тех же физико-геологических условиях одинаковыми. Из-за различий в ядерно-физических характеристиках радона и торона, а именно, в периодах полураспада, торон обладает большим преимуществом для использования его в предлагаемом методе, по сравнению с радоном. Согласно исследованиям [13] было получено, что плотность потока торона (ППТ) с поверхности грунта практически не зависит от скорости адвекции v почвенных газов (не более 2,6% в широком диапазоне значений $0 < v < 10^{-3}$ см/с) и изменяется только с изменением коэффициента диффузии.

Таким образом, для определения D_e можно использовать диффузионную модель переноса изотопов радона в пористых средах и рассчитывать эффективный коэффициент диффузии радона и торона в грунте из простого аналитического соотношения

$$D_e = \left(\frac{q_{Tn}}{\eta \cdot A_{Tn}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\lambda_{Tn}}, \quad (2)$$

где q_{Tn} – ППТ с поверхности грунта, Бк $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$; A_{Tn} – ОА торона в почвенном воздухе, Бк м^{-3} ; D_e – эффективный (объемный) коэффициент диффузии радона и торона, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$; η – пористость грунта, отн. ед.; λ_{Tn} – постоянная распада торона, с^{-1} .

В предлагаемом методе (2) существует ограничение на минимальную глубину измерения: она должна быть не менее 15 см. Это ограничение обусловлено тем, что ОА торона в почвенном воздухе на глубине ~ 10 см достигает своего равновесного значения, при котором торон находится в радиоактивном равновесии с материнским

радионуклидом ^{224}Ra , образующимся в природной цепочке ^{232}Th , и далее не изменяется с глубиной и не зависит от v . При измерениях на меньших глубинах увеличивается погрешность оценки эффективного коэффициента диффузии. Таким образом, разработанный метод является:

1) простым, постольку не требует использования мощного источника радона и специального устройства для мгновенного ведения радона на заданную глубину грунта;

2) достоверным, поскольку не содержит погрешностей, связанных с влиянием скорости адвективного переноса почвенных газов на результат измерения.

Метод был апробирован на экспериментальной площадке ТПУ-ИМКЭС [3]. Плотность потока торона определяли способом измерения плотности потока радона и торона с поверхности грунта по α -излучению, описанным в работе [14].

Объемную активность торона в почвенном воздухе на глубине 15 см измеряли с помощью радиометра радона и торона RTM 2200 (SARAD GmbH, Германия) в соответствии с инструкцией по измерению радона и торона в грунте. На площадке также произвели отбор пробы поверхностного грунта для последующего измерения пористости грунта в лабораторных условиях в соответствии со стандартными методиками. Значение эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте D_e составило, в среднем, $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, что хорошо согласуется с литературными данными для подобных типов поверхностных грунтов.

Заключение

Разработан простой и достоверный полевой метод измерения эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте и других пористых материалах, который может быть полезен при решении задач массопереноса радона в пористых средах, газообмена между почвой и атмосферой, и пр. При небольшой доработке его можно модифицировать в метод неразрушающего контроля для измерения коэффициента диффузии радона и торона в (монолитных) строительных конструкциях.

Библиографический список

1. Паровик Р.И., Макаров Е.О., Фирстов П.П. Математическое моделирование фрактальной размерности геосреды и сейсмическая активность Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2011. №2(3). С. 42-49.
2. Паровик Р.И. Фирстов П.П. Фазовый анализ временных рядов геофизических полей // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2013. №1(6). С. 23-29.
3. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В., Фирстов П.П., Паровик Р.И. Скоординированный многофакторный эксперимент по анализу процессов поступления почвенного радона в приземный слой атмосферы // АНРИ. 2009. № 4. С. 55-60.
4. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: монография / В.С. Яковлева; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 174 с.
5. Firstov P.P., Yakovleva V.S., Shirokov V.A., Rulenko O.P., Filippov Yu.A., Malysheva O.P. The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone // Annals of Geophysics. 2007. V. 50. № 4. P. 547-556.

6. Паровик Р.И., Фирстов П.П. Апробация новой методики расчета плотности потока радона с поверхности (на примере Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона) // АНРИ. 2009. № 3. С. 52-57.
7. Rogers V.C., Nielson K.K. Multiphase radon generation and transport in porous materials // Health Phys. 1991. V. 60. P. 807-815.
8. Hosoda M., Shimo M., Sugino M., Furakawa M., Fukushi M. Effect of Soil Moisture Content on Radon and Thoron Exhalation // J. Nucl. Sci. Technol. 2007. V. 44. № 4. P. 664-672.
9. Булашевич Ю.П., Карташов Н.П. Определение коэффициента диффузии радона в горных породах методом мгновенного источника // Изв. АН СССР. Сер. физика земли. 1967, №10, С.71-76.
10. Патент РФ №2332687. G01T1/178. опубл. 27.08.2008.
11. Яковлева В.С., Рыжакова Н.К. Оценка скорости конвекции радона в грунтах по измеренным значениям поровой активности // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2003. №5. С. 466-469.
12. Сердюкова А.С., Капитанов Ю.Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1979. 294 с.
13. Яковлева В.С. Моделирование влияния состояния атмосферы и литосферы на динамику плотности потока радона и торона с поверхности земли // Известия ТПУ. 2010. Т. 317. №2. С.162-166.
14. Яковлева В.С. Методы и приборы контроля полей α -, β -, γ излучений и радона в системе "грунт-атмосфера"[Электронный ресурс]: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук; спец. 05.11.13 / В. С. Яковлева; НИ ТПУ; науч. конс. П. М. Нагорский. Томск, 2013. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/a/2013/71.pdf>.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 20.05.2014