

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДОНА В ВЛАГОНАСЫЩЕННОМ ГРУНТЕ

¹Паскарь С.Ю., ^{1,2}Паровик Р.И.

¹Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д.4, e-mail: paskarysy@mail.ru

²Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, e-mail: romanparovik@gmail.com

Данная статья посвящена математическому моделированию процесса переноса радона в влагонасыщенной геологической среде (геосреде) с целью изучения динамических характеристик, например, изменения концентрации радона в условиях сжатия или растяжения горных пород. Были рассмотрены математические модели Огильви и Дубинчука, которые характеризуют переноса радона в влагонасыщенном слое грунта. Найдены аналитические решения исследуемых моделей, которые были реализованы в компьютерной среде символьной математики Maple. Построены расчетные кривые согласно полученным решениям в зависимости от скорости эманирования радона в поровое пространство влагонасыщенного грунта. Рассмотрен случай импульсного воздействия на процесс переноса радона, которое может интерпретироваться как предвестниковая аномалия, предшествующая сильным землетрясениям, например, таким которые происходят в районе Южной Камчатки.

Ключевые слова: радон, трещиновато-пористая среда, математическая модель, сжатие, растяжение.

MATHEMATICAL MODELING OF THE TRANSPORT OF RADON IN SOIL MOISTURE SATURATION

¹Paskar S.Y., ^{1,2}Parovik R.I.

¹ Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, St. Pogranichnaya, 4

² Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Kamchatckiy kray, p. Paratunka st. Mirnaya, 7

This article deals with mathematical modeling of radon in the subsurface moisture saturation in order to study the dynamic characteristics, such as changes in the concentration of radon in a compression or stretching of rocks. Mathematical models were reviewed Ogilvy and Dubinchuk that characterize the transfer of radon in soil moisture saturation layer. Analytical solutions investigated models that was been implemented in a computer environment, symbolic mathematics Maple. Constructed according to the calculated curves obtained solutions depending on the speed of the emanation of radon in the pore space of the soil moisture saturation. The case of pulse impact on the process of transfer of radon, which can be interpreted as a predictive anomaly, previous strong earthquakes, for example, such that occur in the South Kamchatka.

Keywords: radon fractured porous media, mathematical model, compression, tension.

Введение. Процесс переноса радона является одним из важных природных процессов и исследуется в таких научных направлениях как радиоразведка урановых руд [2], перенос радиоактивных веществ в жилых и промышленных помещениях и атмосфере [7], горные удары в шахтах и землетрясения [1,6].

Важное значение имеет перенос радона в геологической среде (грунте), так как она содержит изотопы радия (^{226}Ra) продуктом распада которых являются изотопы радона (^{222}Rn). Геологическая среда является неоднородной, слоистой, с заметно различающимися физико –

геологическими характеристиками для каждого слоя, что должно учитываться при моделировании переноса радона в геологических средах, максимально приближенных при их описании к реальным природным системам. Однако моделирование процесса переноса радона является достаточно сложным, так как на него влияют различные факторы, например, структура геосреды, деформационные возмущения, метеоусловия и т.д. Поэтому не существует универсальных математических моделей, которые бы полно описывали процесс переноса радона. Но, если пренебречь малозначимыми факторами влияния на процесс переноса радона, то можно построить математическую модель этого процесса в некотором приближении. Таких моделей существует множество, некоторые из них хорошо описаны в работах [2, 4, 8, 9].

Если геосреда обладает слоистой структурой, то можно использовать многослойную математическую модель переноса радона [8, 10]. В общем случае коэффициенты модели могут являться функциями от пространственной координаты и координаты времени, более того, они могут меняться скачкообразно на границе двух соседних слоёв, т.е. быть разрывными на границах каждого слоя за счёт сильно различающихся параметров грунтов (плотность, пористость, содержание радия, коэффициенты диффузии и эманирования) [8]. В работе [5] показано, что такой слоистой структурой обладает геосреда в районе геодинамического полигона на Камчатке, где расположена сеть станций мониторинга радона. Регистрация подпочвенного радона на сети в основном ведется в трех разноглубоких точках, одна из которых расположена в зоне полного влагонасыщения [6]. В этой точке наблюдались предвестники в виде однополярного импульса перед двумя землетрясениями.

Используя математическую модель переноса радона в зоне влагонасыщения и экспериментальные данные в пункте «Паратунка» сети мониторинга мы сможем оценить деформационное возмущение, предваряющее сильное землетрясение в районе Южной Камчатки.

Математическая модель Огильви переноса радона в водной среде. Для эффективного описания и прогноза поведения изотопных элементов (эманаций) в грунтовых водах разрабатывают соответствующую физико-математическую модель функционирования данной природной водной системы (ПВС) и переноса в ней исследуемых компонентов (модель Огильви) [3]. Будем использовать следующие обозначения для описания физико-математической модели: M , A , C и a – суммарные содержания и активность на единицу объема среды V , концентрация и удельная активность радона в среде соответственно, $\lambda_p = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ - константа радиоактивного распада радона, $\tau_p = \lambda_p^{-1}$ – среднее время жизни атома радона. Между величинами A , M , C и a существуют следующие соотношения: $M = CV$, $A = \lambda_p M = \lambda_p CV = a$, $a = \lambda_p C$. Следует также

пояснить некоторые важные термины, которые мы будем использовать при описании данной модели.

Эманирование – процесс выделения в открытые поры породы или во внешнее пространство свободной эманации, которая в природных условиях может мигрировать в газовой или растворённой фазе. Основным явлением, вызывающим эманирование, служит отдача атомов радона ${}^{86}\text{Rn}$, образующихся при α -распаде атомов радия ${}^{86}\text{Ra}$ [2]. Эманирование пород зависит от физического состояния, вещественного и минерального состава.

Рассмотрим некоторые важные моменты процесса эманирования радона в подземных водах. Эманирование радона в грунтовую воду со скоростью v м/с по каналу, который имеет площадь поперечного сечения $S = \pi r^2$ м² и пересекающему участок длиной l^* , сложенному породой с породой повышенной и постоянной удельной скоростью эманирования q г·см/с (см. рис. 1).

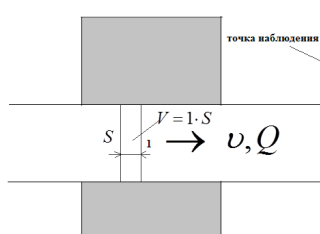


Рис.1 Эманирование радона в одномерный поток флюида, движущегося по каналу сечением S со скоростью v см с⁻¹ и расходом Q

На рис. 1 представлено эманирование в одномерный поток флюида, движущегося по каналу сечением S , скоростью v м/с и расходом Q . Мы видим, что поток пересекающий активный участок длиной l^* в котором скорость эманирования q см²·с⁻¹. Длина пассивного участка l составляет расстояние от границы активной зоны до точки наблюдения. Расход воды в канале $Q = v S$ м³/с. Элементарный единичный по длине объём воды V , движущийся со скоростью v , содержит эманацию в количестве $M(t = x/v)$, которое может измениться только за счёт поступления эманации в водную среду из породы (скелета породы, стенок канала) и её радиоактивного распада. Тогда

$$\frac{dM(x)}{dx} = \frac{qS}{v} - \frac{\lambda_p M(x)}{v}, x = vt \quad (1)$$

Данная модель (1) в неявном виде предполагает мгновенное полное поперечное перемешивание эманации и отсутствие перемешивания в продольном направлении. Скорость эманирования определим следующим образом:

$$q = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ q_0 = \text{const}, & 0 \leq x \leq l^* \\ 0, & x > l^* \end{cases} \quad (2)$$

Для концентрации радона $C = M/V$ с учётом того, что $V = l \cdot S$ из уравнения (1) с нулевой начальной концентрацией, получаем следующую задачу:

$$\frac{dC(t)}{dt} = q - \lambda_p C(t), \quad C(0) = 0, \quad (4)$$

решение, которой, при условии (2), имеет вид:

$$C\left(t = \frac{x}{v}\right) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ C_\infty [1 - \exp(-\lambda_p t)], & 0 \leq x \leq l^*, \\ C_\infty [1 - \exp(-\lambda_p t^*)] [\exp(-\lambda_p (t - t^*))], & x > l^*, \end{cases} \quad (4)$$

здесь $C_\infty = q_0/\lambda_p$, $t = V_{\text{вод}}/Q = \tau_{\text{п}}(x)$ – время пребывания воды и радона в системе на участке длиной x ; $t^* = l^*/v = V_{\text{вод}}/Q = \tau_{\text{п}}^*$ – время пребывания воды и радона в активной зоне; $t - t^* = (x - l^*)/v = l/v = V_{\text{вод}}/Q = \tau_{\text{д}}$ – время добега воды и компонента до точки наблюдения, находящейся на расстоянии l от края активной зоны; $V_{\text{вод}}(x) = xSn$ – объём (запас) воды в системе; $V(x)$ – объём системы; n – пористость. Рассмотрим расчетные кривые концентрации радона, полученные согласно решению (4) при значении параметров $l^* = 25$ см и $x = 75$ см в системе компьютерной математике Maple (рис. 2).

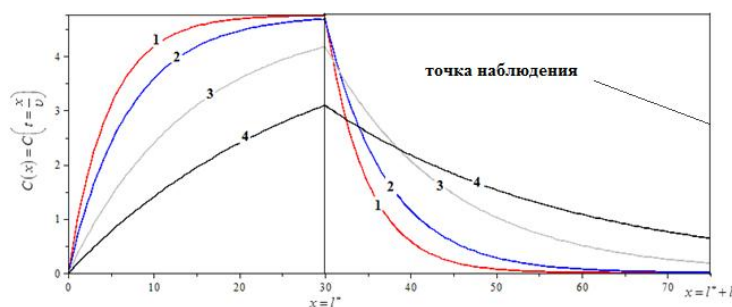


Рис. 2 Распределение концентраций радона компонента для различных отношений времени пребывания грунтовой воды в активной зоне к среднему времени распада радона $\theta = \tau_{\text{п}}^*/\tau_p$: кривая 1 - $\theta_1 = 6.3$; кривая 2 - $\theta_2 = 4.2$; кривая 3 - $\theta_3 = 2.1$; кривая 4 - $\theta_4 = 1.05$

На рис. 2 приведены расчетные кривые распределения концентраций радона в активной и неактивной областях с различными значениями скорости потока грунтовых вод ν : 1- $\nu_1 = 10^{-5}$ см/с; 2- $\nu_2 = 1.5 \cdot 10^{-5}$ см/с; 3- $\nu_3 = 3 \cdot 10^{-5}$ см/с; 4- $\nu_4 = 6 \cdot 10^{-5}$ см/с. В относительных единицах зависимость можно представить через отношение $\theta = \tau_{п}^* / \tau_p$ времени пребывания воды и радона в активной зоне к среднему времени распада радона, причем выполняется условие $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$. Из анализа рис.2 видно, что концентрация радона зависит от соотношения между временем пребывания грунтовой воды с радоном в активной $\tau_{п}^*$, неактивной зоне τ_d и временем распада радона τ_p . Это и есть основные параметры моделирования.

Модель Дубинчика как модификация модели Огильви. Выше отмечалось, что скорость эманирования горных пород зависит от их физического состояния. Например, в лабораторных условиях установлено, что измельчение монолитных штупфов до порошка приводит к увеличению коэффициента эманирования $K_{эм}$ в 1.2-2 раза [4]. Это означает, что скорость эманирования q может зависеть от деформации горных пород. В работе [9] В.Т. Дубинчук предложил модификацию модели Огильви. В решении (5) в качестве максимального значения концентрации было взято соотношение $C_{\infty} = \tau \gamma \sigma_0 / \tau_w$, τ_w и τ - среднее время пребывания грунтовых вод и радона в системе, γ - коэффициент переноса радона из твердой фазы в жидкую, σ_0 - импульс деформационного возмущения.

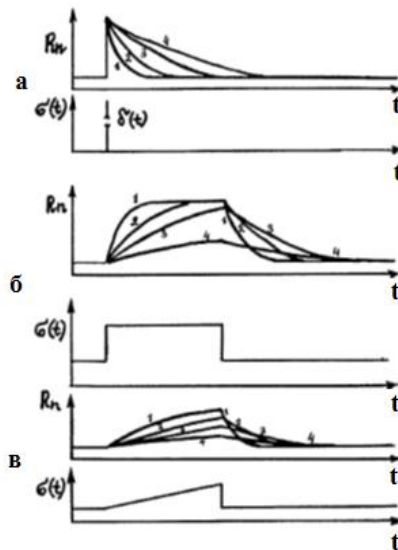


Рис. 3 Динамика концентрации Rn от t и виды деформационных возмущений $\sigma(t)$ по модели В.Т. Дубинчука [9]

На рис. 3 представлены различные виды возмущений σ_0 и соответствующие им расчетные кривые концентрации радона полученные по модели Дубинчука [9]. Необходимо отметить, что некоторые возмущения вида рис. 3б встречаются в динамике временных рядов радоновых полей на Петропавловске-Камчатском геодинамическом полигоне в районе Южной Камчатки и в ряде случаев предшествуют землетрясениям.

Математическое моделирование переноса радона и сейсмическая активность Южной Камчатки. Рассмотрим пример экспериментальных данных, полученных на опорном пункте сети радонового мониторинга «Паратунка» (ПРТ) на Петропавловске-Камчатском геодинамическом полигоне, расположенном в зоне динамического влияния разлома, трассируемого ручьем Коркина [6]. Экспериментальные данные, взятые за февраль 2015 г. с частотой дискретизации 30 минут в второй разноглубокой точке зоны влагонасыщения (рис. 4).

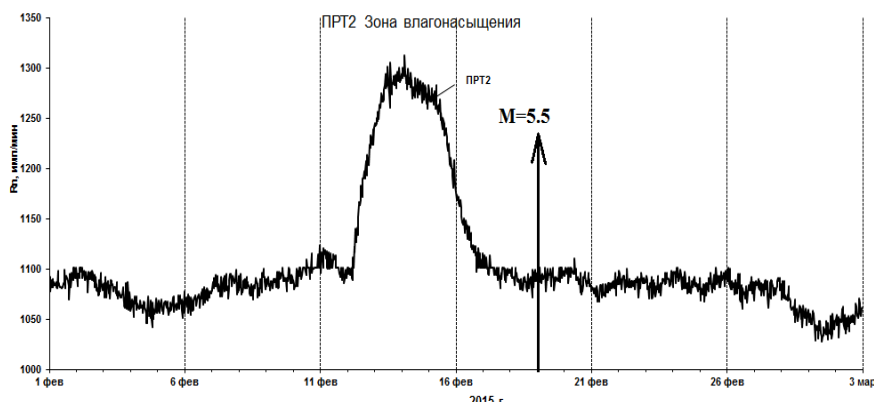


Рис. 4 Экспериментальные данные динамики радона за февраль 2015 г., полученные из пункта регистрации ПРТ в зоне влагонасыщения. Стрелочкой отмечено землетрясение $M=5.5$, которое произошло 19 февраля.

На рис. 4 четко видна аномалия в динамике радона (имп/мин), которая начала проявляться 12 февраля ростом концентрации радона с 1100 имп/мин до 1300 имп/мин 14 февраля, потом наблюдается спад до 1100 имп/мин, который закончился 17 февраля, а 19 февраля произошло землетрясение с $M=5.5$ в Авачинском заливе (гр. с.ш. 52.6930, гр. в.д. 159.3057) недалеко от краевого центра г. Петропавловска-Камчатского.

Вид аномалии на рис. 4 похож на тип возмущения на рис. 3а, рассчитанный по модели Дубинчука. Используя, решение (4) и подбирая должным образом параметры моделирования - скорость эманации радона v найдем расчетную кривую концентрации радона, которая наиболее близко аппроксимировала аномалию на рис. 4. Результаты моделирования приведены на рис.5.

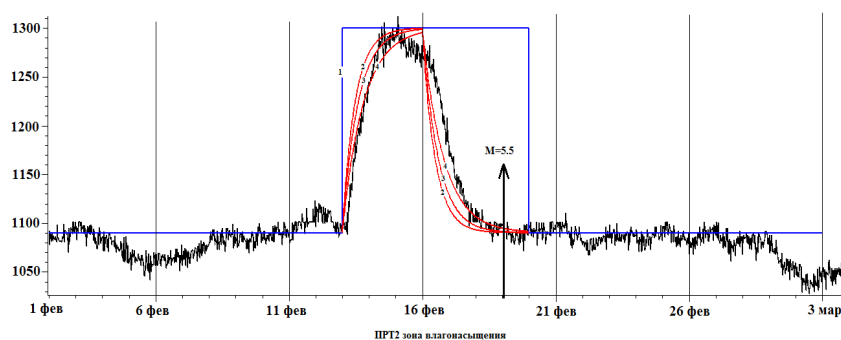


Рис. 5 Расчетные кривые концентрации радона, полученные с помощью формулы (6) 1- возмущение; 2 - $\nu = 10^{-6}$ см; 3- $\nu = 8 \cdot 10^{-5}$ см; 4 - $\nu = 6 \cdot 10^{-5}$ см

На рис.5 представлены расчетные кривые по модели Дубинчука. Можно заметить, что расчетная кривая 4 ($\nu = 6 \cdot 10^{-5}$ см) наиболее близко аппроксимирует аномалию в поле почвенного радона на пункте ПРТ.

Заключение. В этой работе с помощью математического моделирования процесса переноса радона в влагонасыщенном грунте исследованы экспериментальные данные динамики радона в пункте ПРТ на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне Южной Камчатке с ярко выраженной аномалией, предшествующей сильному землетрясению $M=5.5$. Можно отметить, что с помощью известных моделей Огильви и Дубинчука, можно корректно описывать такие аномалии. Продолжением статьи может являться разработка многослойной модели переноса радона с учетом зоны аэрации и согласования результатов моделирования с экспериментальными данными и классификация выявленных в них аномалий, предшествующих сильным землетрясениям Южной Камчатки.

Список литературы

1. Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К., Николаев В. В. Изменение концентрации радона как предвестник горных ударов в глубоких шахтах // Горный журнал. 1996. № 6. С. 19–22.
2. Новиков Г. Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989. 407 с.
3. Огильви А.Н. О каптаже радиоактивных вод и о колебаниях их радиоактивности в зависимости от дебита // Изд. Бельнеологич. ин-та КМВ. 1928. Т.6. С. 85 – 93.
4. Паровик Р.И. Математическое моделирование классической теории эманационного метода. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2014. 120 с.

5. Фирстов П.П., Паровик Р.И., Акбашев Р.Р., Макаров Е.О. Строение верхней части геологических разрезов в пунктах мониторинга почвенного радона на Петропавловск—Камчатском геодинамическом полигоне. Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню Вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». г. Петропавловск-Камчатский, 27-28 марта 2014. С. 242–250.
6. Фирстов П. П., Рудаков В. П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканонология и сейсмология. 2002. № 6. С. 99–107.
7. Цапалов А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2011. Т. 61. № 3. С. 52–64.
8. Яковлева В.С., Паровик Р.И. Численное решение уравнения диффузии – адвекции радона в многослойных геологических средах // Вестник КРАУНЦ. Физ. – мат. науки. 2011. №1 (2). С. 45 – 55.
9. Dubinchuk V. T. Radon as a precursor of earthquakes // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, 9-12 September 1991. Vienna, Austria: IAEA, 1993. P. 6–22.
10. Yakovleva V. S., Parovik R. I. Solution of diffusion-advection equation of radon transport in many-layered geological media // Nukleonika. 2010. Vol. 55, no. 4. P. 601–606.