

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА (^{222}Rn)
НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Паровик Р.И.¹, Фирстов П.П.²

¹ *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Камчатский край, rotano84@mail.ru*

² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский*

Введение

Исследованию связи между концентрацией радона в подпочвенном воздухе и изменениями напряженно-деформированного состояния с целью прогноза землетрясений усиленно ведутся в течение последних 40 лет. Несмотря на неоспоримый факт выявления предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона перед некоторыми сильными землетрясениями [4, 6, 7, 9, 10], радоновый метод нельзя отнести к методам с большой эффективностью, т.к. довольно высок пропуск «целей». По мнению авторов, это объясняется тем, что на поле подпочвенного радона оказывают сильное влияние вариации метеорологических параметров (осадки, температура воздуха, атмосферное давление), на фоне которых сложно выделить относительно небольшие изменения в динамике подпочвенного радона, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния геосреды.

В работе [8], на основании численных расчетов с использованием диффузионно-конвективного уравнения массопереноса радона показано, что величина плотности потока радона (ППР) с поверхности Земли более чувствительна к изменению напряженно-деформированного состояния геосреды, чем величина объемной активности радона (ОА ^{222}Rn) в подпочвенном воздухе. Это подтверждено экспериментальными данными, полученными на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне [7].

В данной работе предлагается алгоритм расчета ППР при условии регистрации ОА ^{222}Rn на разных глубинах относительно поверхности. Данный алгоритм прошел тестирование на данных, полученных сетью станций радонового мониторинга на территории Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона.

Методика вычисления плотности потока на земной поверхности и обратная задача массопереноса радона

Вычисление ППР на поверхности по экспериментальным данным является обратной некорректной задачей геофизики. В настоящей работе рассматривается алгоритм решения задачи по определению ППР, который основывается на приближенном соответствии (подгонки) между измеренной концентрацией радона и рассчитанной концентрации по диффузионно-конвективной модели для нескольких датчиков [1]. Данный алгоритм можно разделить на следующие этапы:

- 1 - аппроксимация искомой ППР постоянной единичной ППР и решение соответствующей прямой задачи по определению концентрации радона в точках наблюдений;
- 2 - представление решения прямой задачи массопереноса радона как суперпозиции его элементарных блоков с помощью интегральной формулы Дюамеля;
- 3 - минимизация невязки между концентрацией радона, полученной экспериментальным путем, и концентрацией, рассчитанной по модели методом наименьших квадратов.

Постановка обратной задачи массопереноса

Задача нахождения ППР на земной поверхности по измеренным значениям концентраций радона N_M^{obs} на различных глубинах z и в момент времени t имеет следующий вид [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = D_k \frac{\partial^2 N(z,t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial N(z,t)}{\partial z} - \lambda N(z,t) + Q \\ 1. N(z,0) = N_0, t = 0 \\ 2. N(z,t) = N_0, z \rightarrow -\infty \\ 3. -D\eta \left. \frac{\partial N(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = q(t) \\ 4. N(z_i, t_j) = N_M^{obs} \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь $N_0 = \frac{Q}{\lambda\eta}$ - фоновая концентрация радона в Бк/м³ на заданной глубине для данного района мониторинга, Q - скорость образования (эманирования) радона в грунте, Бк/м³·с; η - пористость грунта; λ - постоянная полураспада радона, с⁻¹; D - коэффициент диффузии радона в грунте, м²/с; $D_k = \frac{D}{\eta}$ - кажущейся коэффициент диффузии, м²/с; v - скорость конвективного потока радона, м/с; q_c - постоянная единичная ППР на земной поверхности, Бк/м²·с; N(z, t) - объемная концентрация радона, Бк/м³. В третьем условии не известна ППР, а также не известна концентрация радона N(z, t), поэтому задача (1) является некорректно поставленной. Для ее решения необходимо задать q(t) в виде некоторой функции и решить соответствующую прямую задачу для концентрации радона N(z, t). Применяя метод наименьших квадратов (МНК), минимизируем невязку между измеренной и рассчитанной концентрациями по составляющим компонентам ППР.

Постановка прямой задачи массопереноса радона

Модель массопереноса радона на земную поверхность представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных с начальными и граничными условиями [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = D_k \frac{\partial^2 N(z,t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial N(z,t)}{\partial z} - \lambda N(z,t) + Q \\ 1. N(z,0) = N_0, t = 0 \\ 2. N(z,t) = N_0, z \rightarrow -\infty \\ 3. -D\eta \left. \frac{\partial N(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = q_c \end{array} \right. \quad (2)$$

Задача (2) представляет собой вторую краевую задачу для области $-\infty < z \leq 0$. Здесь ось z направлена вверх, т. е. с возрастанием пространственной координаты z концентрация радона уменьшается. Краевые условия и параметры задачи (2) имеют следующий физический смысл: 1) в начальный момент времени концентрация радона равна постоянной концентрации, 2) на некоторой глубине концентрация радона постоянна, 3) на земной поверхности плотность потока радона постоянна. В данной модели предполагается, что процесс массопереноса радона на земную поверхность в некоторый момент времени является установившимся. Поэтому также предполагается, что параметры модели являются известными константами.

Решение прямой задачи массопереноса

Решение задачи (2) с учетом краевых условий можно получить аналитическим методом (преобразованием Лапласа) и записать его в безразмерном виде (3). Выражение (3) описывает процесс изменения концентрации радона в грунте под воздействием постоянной единичной плотности потока q_c в моменты времени t.

$$N(z,t) = N_0 + q_c \frac{zN^+}{2D\eta},$$

$$N^+ = \sqrt{t_1^+} e^{(c-at)} \left(\frac{e^{-\frac{1}{t_1^+}}}{\pi} - t_2^+ e^{t_2^+ - c} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{t_1^+}} + t_2^+ \right) \right), \quad (3)$$

$$t_1^+ = \frac{4D_k t}{z^2 \eta}, \quad t_2^+ = b \sqrt{t},$$

$$a = \frac{v^2}{4D_k} + \lambda, \quad b = -\frac{v}{2\sqrt{D_k}}, \quad c = \frac{zv}{2D_k}.$$

Интегральная формула Дюамеля

Согласно аппроксимации единичной ППР и теореме Дюамеля о представлении решения в виде суперпозиции элементарных блоков его решений по соответствующим интервалам времени имеем:

$$N(z, t_M) = N_0 + q_1 [\varphi(z, t_M - \lambda_0) - \varphi(z, t_M - \lambda_1)] + q_2 [\varphi(z, t_M - \lambda_1) - \varphi(z, t_M - \lambda_2)] + \dots, \quad (4)$$

$$\dots + q_M [\varphi(z, t_M - \lambda_{M-1}) - \varphi(z, t_M - \lambda_M)], \quad \varphi(z, t_M - \lambda_M) = \varphi(z, 0) = 0, \quad M = 0, 1, 2, \dots, i,$$

где $\varphi(z, t_M)$ - элементарное решение в t_M момент времени. Выражение (4) можно упростить, записав его в следующей дискретной форме:

$$N(z, t_M) = N_0 + \sum_{n=1}^M q_n \Delta \varphi(z, t_{M-n}), \quad \Delta \varphi(z, t_{M-n}) = \varphi(z, t_{M-n+1}) - \varphi(z, t_{M-n}). \quad (5)$$

Выражение (5) называется интегральной формулой Дюамеля, а выражение $\Delta \varphi_{M-n}$ называется коэффициентом чувствительности и представляет собой производную концентрации радона по составляющим компонентам его плотности потока. Если они малы или коррелированы между собой, то задача оценивания ППР становится чувствительной к погрешностям. Опуская индексы, можно переписать выражение (5) в более простой форме:

$$N_M = N_0 + \sum_{n=1}^M q_n \Delta \varphi_{M-n} \quad (6)$$

Решение обратной задачи массопереноса радона

Перепишем выражение (6) для концентрации радона в точке расположения датчика в момент времени t_M в виде:

$$N_M = \bar{N}_M \Big|_{q_M=0} + \Delta \varphi_0 q_M, \quad (7)$$

где $\bar{N}_M \Big|_{q_M=0}$ - вычисленная концентрация радона по модели (1) в момент времени t_M при оцененных значениях компонент плотности потока $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_{M-1}$ и при нулевом значении q_M ; $\Delta \varphi_0 = \varphi_1 - \varphi_0 = \varphi_1$ - изменение концентрации радона в точке расположения датчика в момент времени t_1 для единичного ступенчатого изменения ППР на дневной поверхности в момент времени $t = 0$.

Пусть у нас имеется J датчиков измерения концентрации радона. Оценить q_M с учетом (7) можно методом наименьших квадратов:

$$S = \sum_{j=1}^J \left(N_{jM}^{\text{obs}} - \bar{N}_{jM} \Big|_{q_M=0} - \varphi_{j1} q_M \right)^2 \quad (8)$$

Минимизируем функционал невязки (8) по составляющей плотности потока q_M . Данная задача сводится к нахождению нулей производных по параметру q_M . Для этого делаем замену q_M на оценку \bar{q}_M :

$$\bar{q}_M = \frac{\sum_{j=1}^J \left(N_{jM}^{obs} - \sum_{i=1}^{M-1} q_{ji} \Delta \varphi_{jM-i} - N_0 \right) \varphi_{j1}}{\sum_{k=1}^J \varphi_{k1}^2} \quad (9)$$

Для нахождения φ_{J1} в (9) используем решение модели (1) $\varphi_{J1} = N_{J1}^+ \frac{z}{2De}$, где $q_c = 1, N_0 = 0, \varphi(z, t_i) = N(z, t_i)$.

Методика расчета плотности потока радона на земной поверхности по эмпирической зависимости

В работе [5] предложена эмпирическая формула расчета ППР на земной поверхности:

$$q(z)|_{z=0} = D\eta \frac{N_1}{2 - \frac{N_2}{N_1}} \frac{1}{h_1} \ln \left(\frac{1}{\frac{N_2}{N_1} - 1} \right), \quad (10)$$

где N_1 и N_2 - ОА ^{222}Rn на глубинах h_1 и h_2 соответственно, Методика дала неплохие результаты при расчетах ППР для сейсмических событий в июле-августе 2004 г. [6].

Экспериментальные данные и обсуждение результатов

В пункте «Институт» (ИНС), расположенном рядом со зданием Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, осуществляется регистрация ОА ^{222}Rn в подпочвенном воздухе на глубине 1 м от пола подземного бункера (зона аэрации) и на поверхности пола. Подземный бункер имеет размеры $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$. Над ним на поверхности земли установлен металлический контейнер. Подземный бункер через контейнер и систему труб вентилируется за счет естественной конвекции воздуха. Регистрация концентрации радона осуществляется с помощью двух измерительных приборов ALMEMO 2590-9 с частотой дискретизации данных 6 ч^{-1} . Для расчета ППР использовались параметры для двух датчиков ($J=2$): $h_1 = 0.2 \text{ м}$, $h_2 = 1 \text{ м}$, $D = 5.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\nu = 10^{-5} \text{ м/с}$, $\lambda = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, интервал измерений $\Delta t = 600 \text{ с}$.

Расчеты ППР на земной поверхности проводились с помощью специально разработанной программы «РЭКСЭМ» [3]. Программа реализует рассмотренный выше алгоритм по определению ППР на земной поверхности. В программе есть возможность проводить визуализацию расчетных и экспериментальных данных, а также реализован алгоритм расчета ППР на поверхности по (11). Кроме этого, программа осуществляет подготовку экспериментальных данных для обработки.

На рис. 1а показана динамика ОА ^{222}Rn за период 20 июля – 29 августа 2006 г. в зоне аэрации (2), на поверхности (3) и в воздухе (1). На рис. 1б показаны кривые ППР на поверхности, рассчитанные по методике Яковлевой В.С. [8] (1) и по методике, предложенной в настоящей работе (2).

Как видно на рис. 1, с 13 по 22 августа наблюдается аномалия, амплитуда которой слабо выражена в зоне аэрации, составляя 115% от фона, и на земной поверхности (130% от фона) (рис. 1а). В то же время аномалия наиболее четко выражена в воздухе (более 160% от фона). По сравнению с кривыми ОА ^{222}Rn (рис. 1а), на кривых ППР (рис. 1б) аномалия четко выражена. При этом ее амплитуда составляет более 160% от фона, как при расчете по методике [8], так и по методике, рассмотренной выше. Поэтому регистрация ОА ^{222}Rn в воздухе и расчет ППР с земной поверхности являются перспективными методами выявления аномалий в динамике поведения подпочвенного радона, предшествующих сейсмическим событиям.

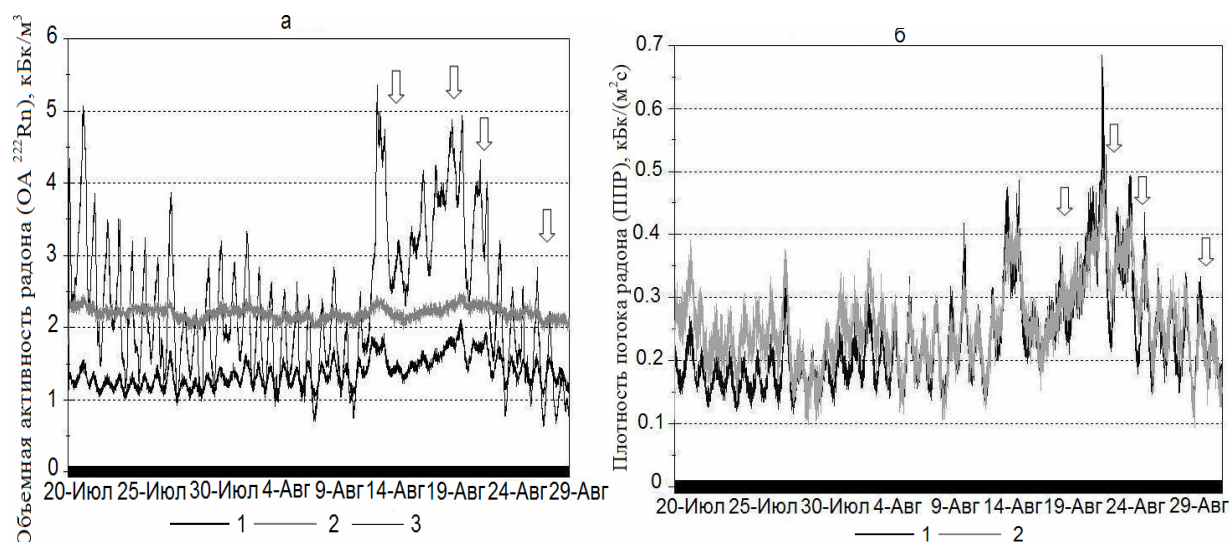


Рис.1. Динамика объемной активности радона в зоне аэрации и на поверхности пола подземного бункера за период 20 июля – 29 августа 2006 г (а): 1- поверхность, 2- воздух, 3- зона аэрации; б - расчетные данные плотности потока радона ППР, полученные: 1- по методике Яковлевой В.С. [8], 2 - по предложенной методике. Стрелками отмечены наиболее сильные землетрясения, произошедшие в районе полуострова Камчатка.

Аномалия 13-22 августа предваряет усиление сейсмичности у берегов полуострова Камчатка. По оперативным данным Камчатского филиала Геофизической службы РАН 24 августа в районе южной Камчатки (51.19° с. ш.) на удалении 190 км от пункта ПРТ произошло сильное землетрясение с $M_L=6.2$, а 1-2 сентября прошла серия землетрясений на юге Кроноцкого залива и в Авачинском заливе. Эпицентр самого сильного толчка с магнитудой $M=5.6$ располагался в 110 км от пункта регистрации.

Оживление сейсмичности на всей протяженности северного фланга Курило-Камчатской островной дуги дало основание предполагать увеличение скорости движения Тихоокеанской плиты, что могло привести к перестройке регионального поля напряжений [6]. Поэтому аномалию, четко выраженную в ППР, можно объяснить увеличением конвективной составляющей в массопереносе радона в рыхлых отложениях.

В дальнейшем планируется использовать предложенную методику расчета ППР в реальном времени с целью оценки изменений напряженно-деформированного состояния среды в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона и прогноза сильных землетрясений.

Список литературы

1. Бек Д., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989. 312 с.
2. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. М.: Недра, 1965. 750 с.
3. Паровик Р.И. Авторское свидетельство №8329 от 17.05.2007 г. Программа обработки геофизических данных «РЭКСЭМ».
4. Рудаков В.П. Сейсмоэманационные эффекты геологических структур // Проблемы геофизики XXI в. Книга 2. М.: Наука, 2003. С. 95-113.
5. Рыжакова Н.К., Яковлева В.С. Патент РФ №2212688 от 20.09.2003. Способ определения плотности потока с поверхности земли.
6. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П., Яковлева В.С., Исаев А.В., Малышева О.П. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле - августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.
7. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997-2000 гг. на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26-41.
8. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 74-77.
9. Dubinchuk V.T. Radon as a precursor of earthquakes. // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna, 1991. P. 6-22.
10. Virk H. S., Baljinder S. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena. // Tectonophysics. V. 227. 1993. P. 215-224.