

**Оценка потока подпочвенного радона на одном из пунктов сети регистрации подпочвенных газов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона  
Е.О. Макаров, П.П. Фирстов**

*Камчатский филиал Федерального научного центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, e-mail: [ice@emsd.ru](mailto:ice@emsd.ru)*

С помощью математического моделирования рассмотрен процесс накопления радона в накопительной камере, где устанавливаются газоразрядные счетчики с целью мониторинга подпочвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) на Камчатке. Выполнена оценка плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта под камерой. Основой для моделирования служили время достижения равновесия между  $\text{Rn}$  и его продуктами распада и максимальная величина объемной активности  $\text{Rn}$  в накопительной камере. Рассмотренная методика дает возможность, в первом приближении, оперативно оценивать величину ППР в месте установки накопительной камеры.

**Введение**

Мониторинг радонового поля в верхней толще грунта представляет интерес как в связи с воздействием вариаций метеорологических величин на сток  $\text{Rn}$  в атмосферу, так и с влиянием на динамику  $\text{Rn}$  изменений напряженно-деформированного состояния геосреды с целью прогноза сильных землетрясений. Предшествующие землетрясения вариации регионального поля напряжений находят отклик в верхней толще грунта, что приводит к изменениям пористости, градиентов температуры и давления, а, следовательно, к изменению скорости миграции  $\text{Rn}$  к дневной поверхности. Поэтому мониторинг параметров радонового поля на границе «литосфера - атмосфера» позволяет говорить о процессах, происходящих в земной коре, которые могут стать причиной аномальных вариаций концентрации  $\text{Rn}$ , а также изменений величины ППР с поверхности грунта [6, 8].

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 1997 г. ведется регистрация подпочвенного  $\text{Rn}$  (ПР) с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений [4, 5]. В данной работе с помощью математического моделирования рассмотрен процесс накопления радона в накопительной камере, где устанавливаются газоразрядные счетчики с целью мониторинга подпочвенного радона (ПР).

**Аппаратура и методика расчетов**

Основываясь на работе [3] в качестве датчиков концентрации ПР были выбраны газоразрядные счетчики (ГС), позволяющие вести регистрацию радона по  $\beta$ -излучению его дочерних продуктов распада. Высокая чувствительность ГС позволяет регистрировать отдельные кванты ионизирующего излучения, а большой выходной сигнал легко регистрируется пересчетными схемами, что позволяет вести регистрацию концентрации  $\text{Rn}$  в подпочвенном воздухе с высокой степенью надежности и достаточно простой метрологией, что очень важно для длительных наблюдений. С целью повышения чувствительности ГС помещаются в накопительную камеру (оцинкованное ведро, емкостью 10 л), которая помещается в грунт на глубину от 0.1 до трех метров.

В настоящее время на всех пунктах регистрация ПР осуществляется с помощью разработанного в КФ ФИЦ ЕГС РАН аппаратного комплекса для регистрации концентрации подпочвенных газов (РКПГ) [2]. Особенностью всех пунктов является регистрация ПР на разных глубинах зоны аэрации, что позволяет рассчитывать плотность потока радона с поверхности (ППР).

В работе [7] теоретически и экспериментально показано, что величина ППР с поверхности земли чувствительна к изменениям скорости адвекции подпочвенного радона, поэтому ее регистрация более предпочтительна по сравнению с регистрацией объемной активности радона (ОА  $\text{Rn}$ ). ППР реагирует как на вариации метеорологических величин (атмосферное давление, температура воздуха), так и на изменение напряженно-

деформированного состояния геосреды, за счет его влияния на проницаемость грунта зоны аэрации.

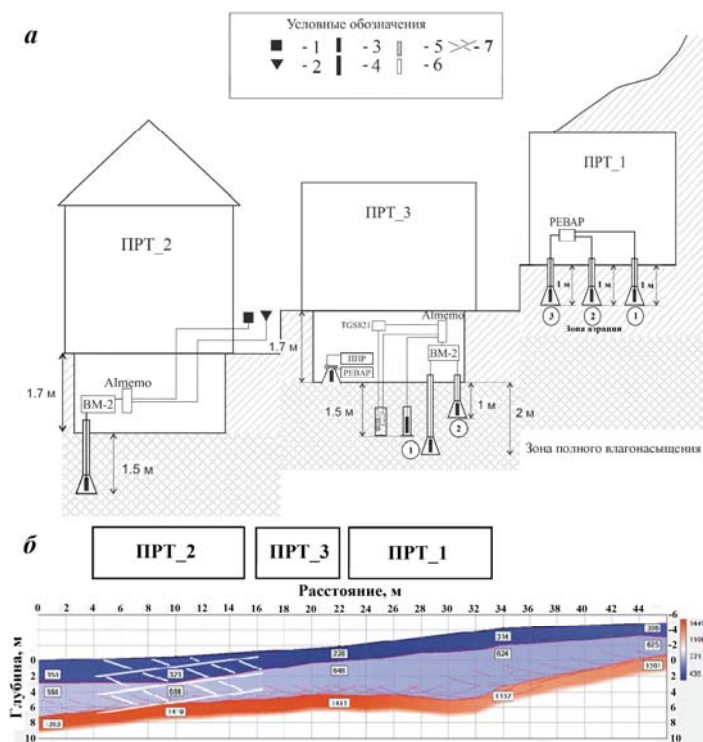


Рис. 1. Схема размещения датчиков для регистрации концентрации почвенных газов в опорном пункте ПРТ (а), скоростной разрез Р-волн по данным сейсморазведочного профиля, пройденного вблизи пункта ПРТ (б): 1 – датчик давления; 2 – датчик температуры; 3 – датчик  $\gamma$ -излучения; 4 – газоразрядные счетчики  $\beta$ -излучения; 5 – датчик  $H_2$ ; 6 – датчик  $CO_2$ ; 7 – участок разуплотнения, выделенный на георадарном профиле. Номерами в кружках выделены газоразрядные счетчики, использованные в работе

пункте ПРТ (рис. 1, ПРТ\_1, датчики 1, 2, 3), а затем проводилась регистрация в течение двух суток с временем дискретизации две минуты. Через 18-24 ч. после начала эксперимента на всех каналах четко выделялся период достижения равновесного режима с амплитудой 1,9, 2,1, 2,5 кБк/м<sup>3</sup>, т.е. относительный разброс каналов составлял ~ 30%, который отражал не идентичность параметров радонового поля и в меньшей мере разброс чувствительности ГС.

По данным сейсморазведочных и георадарных работ в пункте ПРТ в строении верхней толщи выделено три слоя. В первых двух слоях рыхлых отложений со средней мощностью 2,3 и 4,5 м миграция  $Rn$  осуществляется за счет адвекции и диффузии. Уровень грунтовых вод находится на глубине ~6 м. Подложкой для второго слоя является крупнообломочный материал с песчаным заполнителем аллювиально-флювиогляциального происхождения. Миграция  $Rn$  из третьего и подлежащих слоев осуществляется по выделенным в результате сейсморазведочных работ зонам разуплотнения [5].

Накопление  $Rn$  в замкнутой камере при его стационарном притоке представляет собой процесс с выходом на насыщение при достижении его равновесия с продуктами распада. При этом, время выхода значения ОА  $Rn$  на равновесие определяется скоростью поступления радона и вентилированием камеры, то есть кратностью воздухообмена (КВО). Для оценки этих параметров необходимо сделать математическое описание процесса изменения ОА  $Rn$  во времени. Для этого по принципу подобия был использован подход, описанный в работе [9].

Принято, что накопительная камера находится в стационарном режиме воздухообмена, когда отсутствуют резко меняющиеся условия вентилирования и КВО постоянна. В связи с особенностями установки камеры естественный воздухообмен в ней очень мал. При обработке измерений использовалось не достигнутое максимальное значение ОА  $Rn$ , а вся кривая накопления. Такой подход близок к методу, описанному в работе [1].

Для исследования процесса накопления  $Rn$  три накопительные камеры размещались одновременно на глубину один метр в опорном

Временная зависимость концентрации Rn  $A(t)$  в камере может быть представлена в виде дифференциального уравнения первого порядка (предполагается, что радон перемешивается мгновенно по всему объему [9]):

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{Rn}^{amm}) \cdot \lambda_v(t) - (A(t) - A_{Rn}^{amm}) \cdot \lambda_{Rn} \quad (1),$$

где:  $S(t)$  – функция, описывающая суммарное удельное поступление Rn в единичный объем камеры (скорость поступления), Бк/(м<sup>3</sup>·ч);  $\lambda_v(t)$  – функция, описывающая зависимость значения КВО от времени, ч<sup>-1</sup>;  $\lambda_{Rn} = 0.00755$  ч<sup>-1</sup> – постоянная распада радона;  $A_{Rn}^{amm}$  – концентрация радона в наружном воздухе, Бк/м<sup>3</sup>. Решением этого уравнения с учетом некоторых допущений является [9]:

$$A(t) = A_{max} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) + A_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t} \quad (2).$$

Процесс накопления обусловлен скоростью поступления радона в камеру и КВО в стационарном состоянии, с выходом на насыщение  $A_{max} = S / \lambda_0$ .  $A_{max}$  – максимальная ОА Rn, которая может быть достигнута в камере при заданных условиях, Бк/м<sup>3</sup>;  $S$  – скорость диффузионного поступления Rn, зависящая от объема камеры, площади поверхности грунта под ней и ППР с этой поверхности. В нашем случае  $S = 0.049$  м<sup>2</sup>,  $V = 0.01$  м<sup>3</sup>.

Используя выражение (2) оценку КВО и ППР в емкости можно сделать методом подбора наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной кривых. Исходя из этих условий, рассчитаны ППР и КВО на опорном пункте ПРТ (Паратунка) для трех каналов в ПРТ\_1 и двух в ПРТ\_3 (рис. 1, таблица).

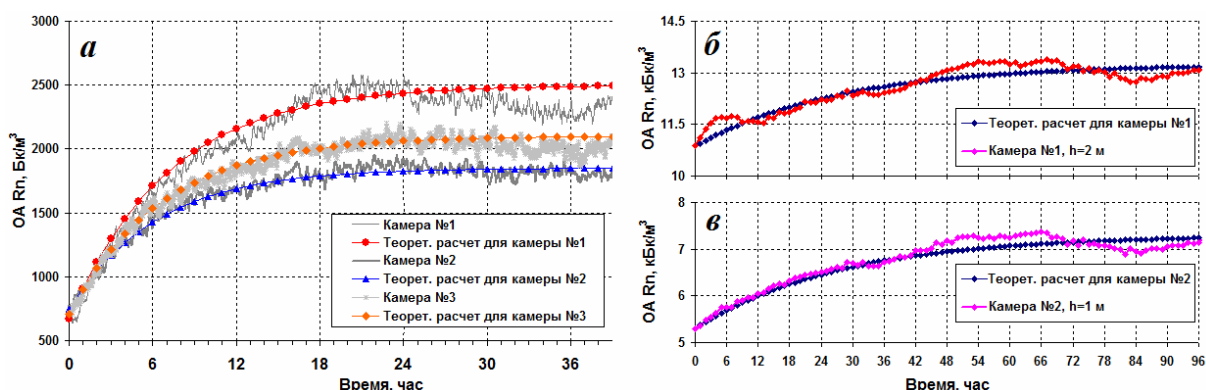


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные кривые, иллюстрирующие накопление радона в накопительных камерах в пункте ПРТ: а – три накопительные камеры в точке ПРТ\_1; б, в – накопительные камеры в точке ПРТ\_3

Из таблицы видно, что для двух камер в ПРТ\_1 к.2 и к.3 значения ППР близки. Накопительная камера к.1 (ПРТ\_1) показала большую величину ППР, что может быть связано с возможным наличием зон разуплотнения и увеличенным стоком радона в районе ее установки [5]. В точке ПРТ\_3 ППР закономерно уменьшается с уменьшением глубины в следствии радиоактивного распада Rn, мигрирующего с более глубоких слоев [5]. При этом обе камеры имеют равный и достаточно малый КВО, что говорит о схожести условий их установки.

### Заключение

Представленная методика в первом приближение дает возможность оценить величину ППР в точке установки накопительной камеры. По форме кривой и времени выхода на равновесное состояние можно эмпирически оценить степень воздействия воздухообмена камеры с атмосферным воздухом на процесс накопления Rn и его ДПР в ней. В некоторых случаях такие оценки можно проводить неоднократно, удаляя Rn и ДПР

**Таблица. Экспериментальные и расчетные данные накопления ПР в заборных емкостях**

| № | Камера     | Экспериментальные данные |                               |                                   | Расчетные значения              |                |                                  |
|---|------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------------------------|
|   |            | h, м                     | $A_0$ ,<br>кБк/м <sup>3</sup> | $A_{max}$ ,<br>кБк/м <sup>3</sup> | $S$ ,<br>Бк/(м <sup>3</sup> ·с) | $KBO$ ,<br>1/ч | $ППР$ ,<br>мБк/м <sup>2</sup> ·с |
| 1 | ПРТ_1, к.1 | 1                        | 0.7                           | 2.5                               | 0.09                            | 0.140          | 19.8                             |
| 2 | ПРТ_1, к.2 | 1                        | 0.7                           | 1.9                               | 0.08                            | 0.160          | 16.8                             |
| 3 | ПРТ_1, к.3 | 1                        | 0.7                           | 2.1                               | 0.09                            | 0.150          | 17.9                             |
| 4 | ПРТ_3, к.1 | 2                        | 10.9                          | 13.2                              | 0.13                            | 0.036          | 27.0                             |
| 5 | ПРТ_3, к.2 | 1                        | 5.3                           | 7.3                               | 0.07                            | 0.036          | 14.9                             |

Примечание: h – глубина установки накопительной камеры;  $A_0$  – начальное значение ОА Рn;  $A_{max}$  – максимальное значение ОА Рn;  $S$  – скорость диффузионного поступления Рn;  $KBO$  – кратностью воздухообмена;  $ППР$  – плотность потока Рn.

из камеры путем принудительного вентилирования. Полученные в результате расчетов значения  $ППР$  на глубинах 1 и 2 м в точке ПРТ\_3 хорошо согласуются со значением  $ППР=9.2$  мБк/м<sup>2</sup>·с, зарегистрированным с поверхности грунта в этой точке сертифицированным прибором "Прогресс-2000" с помощью методики угольных абсорберов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00162.

#### Список литературы

1. Жуковский М.В., Донцов Г.И., Шориков А.О., и др. Модификация метода накопительной камеры для измерения плотности потока радона с поверхности почвы // АНРИ. 1999. № 3. С. 9-20.
2. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Волошин В.Н. Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки. // Сейсмические приборы, 2012. Т. 48. № 2. С. 5-14.
3. Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ// Автореферат на соискание степени доктора физико-математических наук. М. 1992 г. с.
4. 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.
5. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашиев Р.Р. Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 1, С. 60-80.
6. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 4. С. 58-80.
7. 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.
8. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beittton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. N 476. P.371–396.
9. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room // J Environ Radioact. 2013. № 124. P. 185-190.