

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПОТОКА ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА С ПОМОЩЬЮ НАКОПИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Макаров Е.О., Фирстов П.П.

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Петропавловск-Камчатский, ice@emsd.ru*

Рассмотрен процесс накопления подпочвенного радона (^{222}Rn) в накопительной камере в точках, где устанавливаются газоразрядные счетчики (ГС) для мониторинга объемной активности радона (ОА Rn) на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. На основе математического моделирования разработана методика оценки плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта под камерой. В качестве исходных параметров рассматривается время достижения равновесия между Rn и его продуктами распада, а также максимальная величина ОА Rn в накопительной камере. Осуществлена апробация методики, позволяющей делать экспресс оценку величины ППР в точке установки накопительной камеры.

Введение

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 1997 г. ведется регистрация подпочвенного Rn (ПР) с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений [5, 6]. Мониторинг радонового поля в верхней толще грунта представляет интерес как в связи с воздействием вариаций метеорологических величин на сток Rn в атмосферу, так и с влиянием на динамику 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 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 Rn [7, 10], а также изменений (ППР) с поверхности грунта [3, 9].

При организации пунктов мониторинга подпочвенного радона с целью расширения сети необходимо знать величину ППР в выбранной точке, где будет устанавливаться накопительная камера. ППР качественно определяет тензочувствительность выбранной точки, зависящей от ОА Rn и конвективной скорости его миграции к дневной поверхности. Для зон динамического влияния разлома (ЗДВР) характерны участки разуплотнений с повышенным стоком Rn, наиболее приемлемые для установки датчиков и являющиеся чувствительной областью, реагирующей на изменения напряженно-деформированного состояния геосреды [6]. Все это определяет необходимость оперативной оценки ППР простым и доступным методом.

В данной работе с помощью математического моделирования рассмотрен процесс накопления радона в накопительной камере, где устанавливаются ГС с целью мониторинга подпочвенного радона.

Аппаратура и методика расчетов

Основываясь на работе [4] в качестве датчиков концентрации ПР были выбраны ГС, позволяющие вести регистрацию радона по β -излучению его дочерних продуктов распада. Использование ГС для регистрации Rn обеспечивает большую надежность, что очень важно для длительных наблюдений. Высокая чувствительность ГС позволяет регистрировать отдельные кванты ионизирующего излучения, а большой выходной сигнал легко регистрируется пересчетными схемами, что позволяет вести регистрацию концентрации Rn в подпочвенном воздухе с высокой степенью надежности и достаточно простой метрологией. С целью повышения чувствительности ГС размещают в накопительной камере (оцинкованное ведро, емкостью 10 л), которая устанавливается в зоне аэрации грунта на глубине от 0.1 до трех метров. При этом в результате достижения в накопительной камере равновесия Rn с продуктами его распада, происходит увеличение общей радиоактивности.

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].

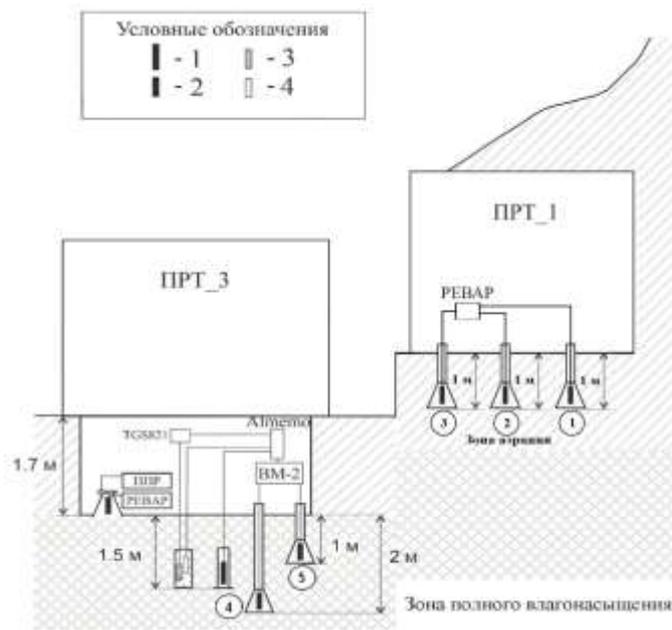


Рис. 1. Схема размещения датчиков для регистрации концентрации подпочвенных газов в опорном пункте ПРТ. 1 – датчик γ -излучения; 2 – газоразрядные счетчики β -излучения; 3 – датчик H_2 ; 4 – датчик CO_2 . Номерами в кружках выделены газоразрядные счетчики согласно табл. 1.

Особенностью всех пунктов является регистрация ПР на разных глубинах зоны аэрации, что позволяет рассчитывать плотность потока радона с поверхности (ППР). В ряде работ [3, 8] 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 ОА Rn. ППР реагирует как на вариации метеорологических величин (атмосферное давление, температура воздуха), так и на изменение напряженно-

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

Накопление в замкнутой камере при стационарном поступлении Rn, представляет собой процесс с выходом на насыщение при достижении его равновесия с продуктами распада. При этом выход значения ОА Rn на равновесие определяется ППР и кратностью воздухообмена (КВО) в условиях, когда отсутствуют резкие изменения вентиляции камеры. Для оценки этих параметров использовано математическое описание процесса изменения ОА Rn во времени, согласно подходу из работы [11].

С допущением, что радон перемешивается мгновенно по всему объему, временная зависимость ОА Rn $A(t)$ в камере может быть представлена в виде дифференциального уравнения первого порядка:

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

где $S(t)$ – функция, описывающая суммарное удельное поступление Rn в единичный объем камеры (скорость поступления), Бк/(м³·ч); $\lambda_v(t)$ – функция, описывающая зависимость значения КВО от времени, ч⁻¹; $\lambda_{Rn} = 0.00755$ ч⁻¹ – постоянная распада радона; $A_{Rn}^{am,m}$ – концентрация радона в наружном воздухе, Бк/м³.

Общее решение уравнения представлено в работе [11]. Там же отмечено, что, поскольку даже полностью закрытое помещение имеет КВО в стационарном режиме эксплуатации на уровне, по крайней мере, 0,05 ч⁻¹, что много больше постоянной распада, то третьим членом уравнения (1) можно пренебречь. Постоянная $A_{Rn}^{am,m}$ также не учитывалась, так как средняя концентрация радона в наружном воздухе много меньше концентрации, накапливающейся в исследуемом объеме. Для оценки ППР в накопительной камере сделаны аналогичные допущения.

Процесс накопления Rn в камере является стационарными, когда отсутствуют резко меняющиеся условия КВО, и ППР под ней постоянна, следовательно $\lambda_v(t)$ и $S(t)$ являются постоянными величинами.

Суммарная скорость поступления радона S обусловлена двумя основными механизмами: диффузионным и конвективным $S = S_D + S_C$, где S_D и S_C соответственно скорости диффузионного и конвективного поступления радона в накопительную камеру, Бк/(м³·ч) [1]. Так как в камере отсутствуют условия создания значительного конвективного потока подпочвенного воздуха с поверхности под ней, скорость конвективного поступления Rn в камеру приравнена к нулю. Скорость диффузионного поступления радона $S_D = (q \cdot \Pi) / V$, где V – объема накопительной камеры, м³; Π – площадь натекания под ней, м²; q – ППР, мБк/(м²·с).

Процесс накопления обусловлен постоянными S_D и КВО с выходом на насыщение: $A_{max} = S_D / \lambda_0$, Бк/м³.

С учетом принятых допущений решение уравнения (1):

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

где λ_0 – постоянный КВО при стационарном режиме накопления в емкости, ч^{-1} ; A_0 – ОА Rn в начальный момент времени $\text{Бк}/\text{м}^3$.

На основании (2), с учетом средней по пяти первым значениям экспериментальной A_0 , рассчитывался ряд модельных кривых с различными значениями λ_0 , из которых по максимуму коэффициента корреляции с экспериментальными (0.93-0.99) выбиралась наиболее подходящая. Время выхода экспериментальных кривых на насыщение оценивалось по достижению минимума мгновенной скорости накопления Rn. Исходя из подобранных значений λ_0 с учетом $V = 0.01 \text{ м}^3$ и $\Pi = 0.05 \text{ м}^2$ для используемых камер, а также осредненной в окнах от получаса до двух часов A_{max} экспериментальных кривых рассчитывалась ППР для четырех пунктов мониторинга подпочвенных газов по формуле:

$$q = (A_{\text{max}} \cdot \lambda_0 \cdot V) / \Pi, \quad (3)$$

Результаты расчетов ППР на опорном пункте ПРТ (Паратунка) для трех одновременно установленных на глубине один метр в зоне аэрации накопительных камер в точке ПРТ_1 (рис. 1, ПРТ_1, ГС1-3), а также для двух датчиков с различным заглублением в пунктах ПРТ_3 (рис. 1, ПРТ_3, ГС 4, 5), МРЗ и ГЛЛ приведены в табл., а расчетные и экспериментальные кривые показаны на рис. 2. Все пункты располагались в речных долинах на аллювиально-делювиальных отложениях.

В работе [9] был предложен оригинальный способ определения ППР на основе диффузионно-адвективной модели переноса по двум значениям объемной активности ПР, измеренным на разных глубинах. Этот метод был апробирован в полевых условиях и показал хорошие результаты [9]. Метод отличается тем, что, не требует знания скорости адвекции, поскольку основан на использовании измеренных значений объемной активности радона в подпочвенном воздухе.

Используя данные объемной активности ПР в камерах на двух глубинах зоны аэрации и метод из работы [9] рассчитывалась значения ППР для пунктов ПРТ, ГЛЛ и МРЗ, которые составили $q_{\text{ПРТ}} = 9.7 \pm 0.3 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $q_{\text{ГЛЛ}} = 2.9 \pm 0.1 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $q_{\text{МРЗ}} = 5.3 \pm 0.5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Эти значения, хотя и несколько меньше, хорошо согласуются с расчетными по формуле (3). так как в процессе миграции Rn к поверхности его ППР уменьшается за счет радиоактивного распада. С целью подтверждения расчетных значений, в точке ПРТ_3 осуществлялась регистрация ППР с поверхности грунта сертифицированным прибором "Прогресс-2000". Полученное значение $q_0 = 9.2 \pm 3.1 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ вполне согласуется с расчетными значениями ППР на глубинах один и два метра для этой точки; $q_1 = 14.9 \pm 1.1 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $q_2 = 27 \pm 1.1 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Меньшее значение q_0 относительно q_1 является следствием радиоактивного распада Rn в процессе его миграции к дневной поверхности.

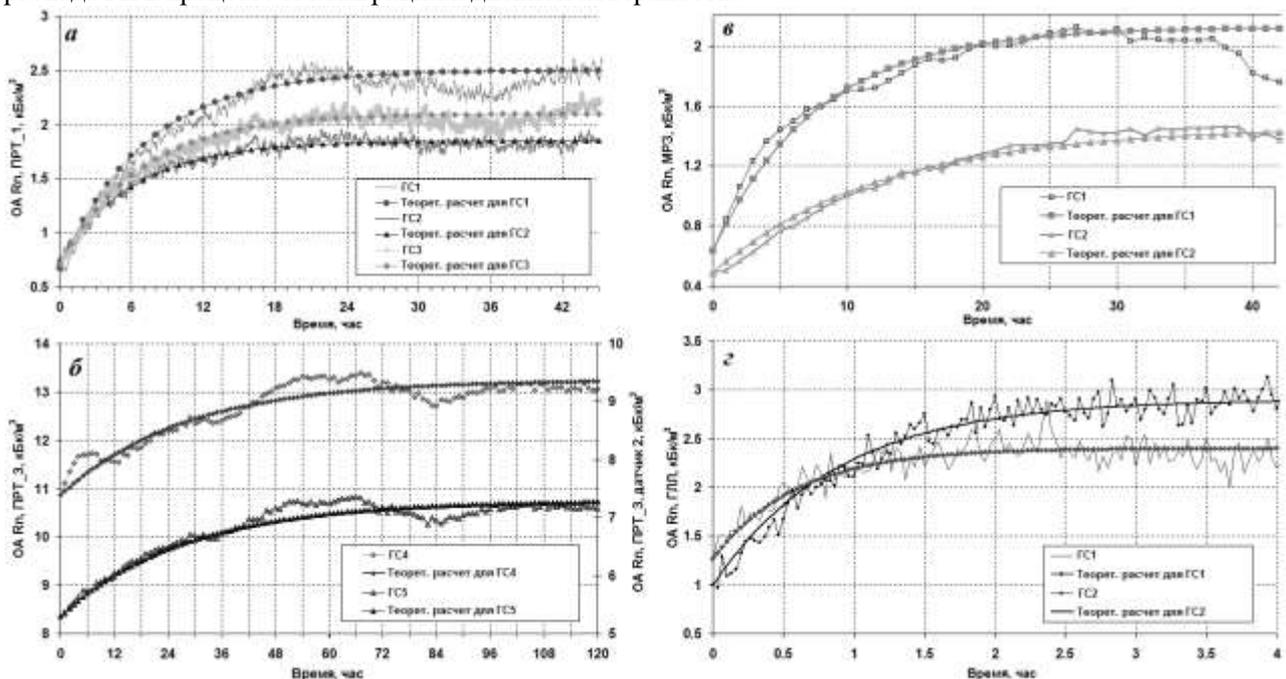


Рис. 2. Расчетные кривые накопление Rn в камере с параметрами, обеспечивающими удовлетворительное совпадение с экспериментальными кривыми: а, б – пункт ПРТ, в – пункт МРЗ, з – пункт ГЛЛ.

Заключение

Следует отметить, что в работе [3] на основании регистрации ОА Rn на двух уровнях в зоне аэрации разработана методика определения ППР, на основании которой для пункта ГЛЛ значение ППР

оценивается $q = 3 \div 6$ мБк/(м²·с), которое совпадает со значением ППР, приведенным в табл. Хорошее совпадение значений ППР полученных по всем методам дает основание говорить о возможности применения предложенной методики для экспресс определения тензочувствительности точек расположения ГС. При необходимости такие оценки можно проводить неоднократно, удаляя Rn и его дочерние продукты распада из камеры путем принудительного вентилирования.

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

Таблица. Экспериментальные и расчетные данные параметров ПР в камерах.

№	Пункты	Экспериментальные данные				Расчетные значения				Характеристика грунтов в месте установки счетчиков	
		h, м	T, час	A ₀ , кБк/м ³	A _{max} , кБк/м ³	S ₃ , Бк/(м ³ ·с)	КВО, 1/ч	ППР, мБк/м ² ·с			
								Нак. кам.	По [9]		
1	ПРТ_1, ГС1	1.0	26.5	0.7	2.5	0.09	0.140	19.8±1.2	9.7±0.3	ЗДВ ручья Коркина, точка на левом склоне, камеры устанавливались на глубине метр от поверхности	
2	ПРТ_1, ГС2	1.0	24	0.7	1.9	0.08	0.160	16.8±1.1			
3	ПРТ_1, ГС3	1.0	25	0.7	2.1	0.09	0.150	17.9±1.3			
4	ПРТ_3, ГС4	2.0	74	10.9	13.2	0.13	0.036	27.0±1.1			Камеры устанавливались в бункере глубиной 1.7 м
5	ПРТ_3, ГС5	1.0	74	5.3	7.3	0.07	0.036	14.9±1.1			
6	МРЗ, ГС1	1.0	27	0.6	2.1	0.08	0.130	15.7±0.6	5.3±0.5	Долина ручья	
7	МРЗ, ГС2	0.2	39	0.5	1.5	0.03	0.080	6.6±0.4			
8	ГЛЛ, ГС1	0.9	2.4	1.3	2.4	0.02	0.028	3.8±0.9	2.9±0.1	Долина реки Паратунка	
9	ГЛЛ, ГС2	1.8	3.3	1.0	2.9	0.01	0.019	3.1±0.8			

Примечание: h – глубина установки накопительной камеры; A₀ – начальное значение ОА Rn; A_{max} – максимальное значение ОА Rn; S – скорость диффузионного поступления Rn; КВО – кратностью воздухообмена; ППР – плотность потока Rn; T – время выхода на насыщение.

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. Паровик Р.И., Фирстов П.П. Апробация новой методики расчета плотности потока радона с поверхности (на примере Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2009. № 3. С. 52-57.
4. Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ// Автореферат на соискание степени доктора физико-математических наук. М. 1992 г. с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
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. Яковлева В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов. Томск: Томский политехнический университет, 2011. 174 с.
10. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beittton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. N 476. P.371–396.
11. 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.