

УДК 551.510.535:551.501.8

СПОСОБ СОВМЕСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКОВ РАДОНА И ТОРОНА С ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА ПО АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЮ

В.С. Яковлева, А.В. Вуколов

Томский политехнический университет

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Разработан способ совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта. Способ включает регистрацию альфа-детектором скорости счета импульсов от альфа-частиц, образующихся при распаде радона, торона и дочерних продуктов распада, накопленных внутри накопительной камеры, установленной на поверхность грунта. Способ основан на анализе кривой роста скорости выхода альфа-излучения внутри накопительной камеры. Способ предложен в двух вариантах, первый – удобен при использовании автоматизированных устройств регистрации с целью длительного мониторинга, второй – для разовых измерений в присутствии оператора.

Ключевые слова:

Радон, торон, объемная активность, плотность потока, способ, метод измерения, альфа-излучение, альфа-частица, грунт, накопительная камера.

Key words:

Radon, thoron, volumetric activity, flux density, means, measuring method, alpha-radiation, alpha-particle, soil, accumulative chamber.

Введение

Еще 10 лет назад детальными исследованиями изотопа радона ^{220}Rn – торона, его активностью в воздухе помещений и атмосфере, а также плотностью потока с поверхности земли практически не занимались. Это было связано с тем, что торон не рассматривали как радиационно-опасный фактор. К тому же почвенный торон не успевает попадать внутрь здания из-за короткого времени жизни. Торон представлял интерес, в основном, как фактор, влияющий на точность измерений активности радона.

В последнее десятилетие интерес к плотности потока торона (ППТ) с поверхности земли был инициирован учеными, занимающимися вопросами радиационной экологии и физики атмосферы, ее электрическими свойствами [1]. Появились также исследования, результаты которых показывают, что продукт распада торона ^{212}Pb с периодом полураспада 10,6 ч может накапливаться в значительных количествах внутри помещений [2, 3] и представлять определенный риск при вдыхании. Причем, согласно работам [3–6], доза от торона и дочерних продуктов его распада (ДПР) может быть равной или даже в несколько раз превышать дозу от радона и его ДПР.

В связи с возросшим интересом к торону появились и задачи, связанные с разработкой методов измерения ППТ, и оценкой их достоверности. Обычно измерения ППТ производят одновременно с измерением плотности потока радона (ППР) с использованием метода накопительной камеры (НК). Назначение НК, которую устанавливают на поверхность грунта на определенное время, накапливать газы, выходящие из грунта. После накопления следует процесс измерения. Здесь возникают различные проблемы, связанные с разделением аппаратных сигналов от радона и торона, а также продуктов их распада, накопленных внутри НК. Короткий период полураспада торона ($T_{1/2}=56$ с) в

методах совместного измерения ППР и ППТ с поверхности грунта также представляет определенную сложность.

Метод статической накопительной камеры

Суть метода статической накопительной камеры состоит в том, что поток радона из грунта увеличивает концентрацию радона в накопительной камере, экспонируемую на исследуемом участке. По геометрическим размерам НК, времени экспозиции и накопленной активности радона можно оценить ППР с поверхности грунта.

В общем случае, плотность потока радона q , $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, в этом методе рассчитывают из выражения

$$q = \frac{A(t)V}{St}, \quad (1)$$

где $A(t)$ – объемная активность радона в воздухе накопительной камеры, измеренная через время t , $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$; S – площадь поверхности основания НК, м^2 ; t – время накопления радона, с; V – объем накопительной камеры, м^3 .

В выражении (1) не учтен радиоактивный распад радона, поскольку период его полураспада ($T_{1/2}=3,823$ сут.) намного больше, чем время накопления (не более 3 ч). В случае торона необходим учет процесса радиоактивного распада. Также, в реальной ситуации внутри НК, установленной на грунт, всегда присутствуют радиоактивные газы в небольшой (фоновой) концентрации. Поэтому, для точных расчетов необходим учет начальной активности радона и торона. В итоге, величины ППР и ППТ рассчитывают из выражения, которое получается при решении уравнения баланса активности радона и торона внутри НК с учетом интенсивности поступления почвенного радона внутрь камеры и его радиоактивного распада, при начальном условии, что фоновая активность внутри НК не равна нулю.

$$q = \frac{V\lambda(A(t) - A_0 e^{-\lambda t})}{S(1 - e^{-\lambda t})}, \quad (2)$$

где A_0 – объемная активность радона (торона), измеренная в начальный момент времени, Бк/м³; $A(t)$ – конечная объемная активность радона (торона), измеренная в момент времени t , Бк/м³; λ – постоянная распада радона (торона), с⁻¹.

Способы совместного измерения плотности потоков радона и торона по альфа-излучению

Существующие способы совместного измерения плотности потока радона и торона с поверхности грунта по альфа-излучению основаны на регистрации измерительным устройством альфа-излучения радона и торона, накопленных внутри НК, установленной по поверхность грунта или другого пористого материала. При условии радиоактивного равновесия между материнским и дочерними радионуклидами определить активности радона и торона можно по продуктам их распада, измеряя спектр альфа-излучения. Альфа-спектрометрию обычно применяют в сочетании с электростатическим осаждением положительно-заряженных продуктов распада для повышения эффективности регистрации и снижения погрешности, возникающей при наложении пиков от разных радионуклидов. Поэтому, вполне заслуженно, методы спектрометрии считают самыми эффективными, однако и самыми дорогими.

Уходящие в прошлое методы с использованием дискриминаторов импульсов также позволяли разделять регистрируемые от альфа-излучения импульсы по амплитуде (энергии) на несколько энергетических диапазонов, соответствующих определенным энергетическим линиям радионуклидов.

Например, в работе [7] способ измерения плотности потока радона и торона по альфа-излучению реализован с использованием НК и полупроводникового альфа-детектора, расположенного внутри измерительного объема и работающего в спектрометрическом режиме. НК объемом 4,3 л, изготовленная из поливинилхлорида в форме куба, соединяется через виниловые шланги с осушающим газ модулем, заполненным осушителем (CaSO₄ с 3%-м CoCl₂), и, затем, с радиометром радона RAD7 (Niton Corporation of Bedford, США). Радиометр с помощью встроенной воздуходувки тянет воздух из НК через осушитель и фильтр, предназначенный для отсекания продуктов распада радона и торона, внутрь измерительной камеры радиометра. Затем воздух возвращается по замкнутому виниловому шлангу назад в НК.

Поиск других способов совместного измерения ППР и ППТ с использованием НК и альфа-детекторов, работающих с счетном режиме, привел к разработке оригинального технического приема, основанного на отделении торона задерживающим объемом.

Например, в работе [8] были использованы НК и два сцинтилляционных альфа-детектора, распо-

ложенные внутри измерительных объемов, соединенных между собой задерживающим торон объемом. Радон и торон, выходящие из грунта, поступают в накопительную камеру, затем внутрь первого измерительного объема, где регистрируется альфа-излучение радона и торона, после этого газовая смесь проходит через задерживающий объем, в котором торон полностью распадается, соответственно во второй измерительный объем попадает только радон. По разности показаний первого (радон + торон) и второго (только радон) сцинтилляционных детекторов определяют количество импульсов, обусловленных торонном. Подсчитанные импульсы переводят в объемные активности и, затем, по выражениям (1) и (2) пересчитывают в плотности потока радона и торона. Этот метод является менее дорогим, поскольку не используется спектрометрическое оборудование, однако, суммарная неопределенность результата измерения таким методом увеличивается из-за использования двух детекторов и 4-х разных объемов.

В описанных выше способах совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по альфа-излучению измерительное устройство (радиометр или детектор) располагается снаружи НК. При переводе накопленных газов из НК в измерительное устройство используют задерживающие аэрозольные продукты распада радона и торона фильтры, для устранения их влияния на результат измерения. Из существующих к настоящему времени методов измерения ППР известен только один с расположением измерительного устройства внутри НК – метод с использованием ионизационной камеры, в качестве которой используют широко известный в мире радиометр радона AlphaGUARD (Genitron Instruments, Германия) [9]. Однако этот метод позволяет измерение только плотности потока радона.

Способ совместного измерения ППР и ППТ с расположением детектора внутри накопительной камеры

Задачей настоящей работы являлся поиск простого, без использования дорогостоящего спектрометрического оборудования, способа совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта. Способ в дальнейшем планировалось реализовать в измерительном комплексе, способном длительно и надежно работать на станциях мониторинга в условиях резко континентального климата без присутствия оператора. Известные методы с расположением измерительного устройства снаружи НК не удовлетворяют установленным требованиям, поэтому был детально рассмотрен метод измерения с расположением измерительного устройства (детектора), работающего в счетном режиме, внутри накопительной камеры. Было предварительно произведено моделирование динамики накопления радона, торона и продуктов их распада внутри НК, а также динамики вторичных признаков: выхода (скорости образования)

альфа-, бета-частиц и гамма-излучения; скорости образования ионов в воздухе внутри НК [10].

Простое решение задачи было найдено после анализа кривой роста скорости счета импульсов от альфа-излучения, образующегося при распаде накопленных внутри НК изотопов радона и продуктов его распада (рисунок). Видно, что кривая роста выхода альфа-частиц от торона и продуктов его распада имеет специфическую форму и определяется физическими свойствами радионуклидов, а именно, соотношением периодов их полураспада. В момент времени, равный 6...7 мин после начала накопления кривая (α Tn) выходит на насыщение (равновесное состояние) и далее практически не изменяется. Рост выхода альфа-частиц от радона и продуктов его распада (α Rn) имеет практически линейную форму.

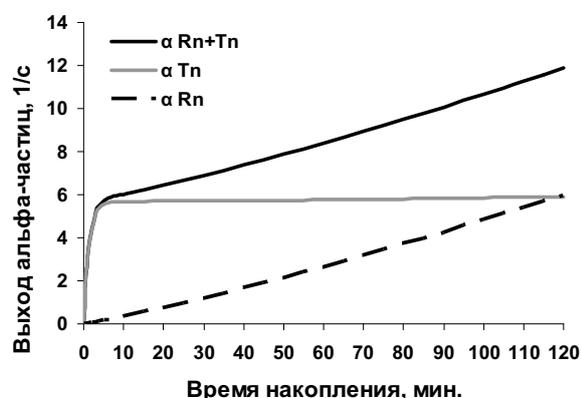


Рисунок. Динамика выхода альфа-частиц внутри накопительной камеры, образующихся при радиоактивном распаде радона и дочерних продуктов его распада (Rn), торона и дочерних продуктов его распада (Tn)

Анализ данных расчетов (рисунок) показал, что разделение радона и торона при их совместном измерении возможно по форме кривой роста скорости счета импульсов от альфа-излучения внутри НК. В итоге был разработан простой способ совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта, основанный на регистрации альфа-излучения радона, торона и продуктов их распада, накопленных внутри накопительной камеры.

Измерение скорости счета импульсов в данном способе производят установленным внутри накопительной камеры альфа-детектором, работающим в счетном режиме. Разделение аппаратурных сигналов от радона и торона производят по форме кривой роста скорости счета импульсов одним из следующих двух вариантов:

1. Производят измерение скорости счета импульсов в течение времени 40...60 мин от начала накопления. Далее обработку кривой накопления производят с использованием соответствующих алгоритмов, позволяющих выделить линейный участок, угол наклона которого пропорционален плотности потока радона q_{Rn} и высоту пьедестала, на которую поднят линейный участок,

которая соответствует равновесному значению скорости счета импульсов от торона и продуктов его распада и пропорциональна плотности потока торона q_{Tn} с поверхности грунта.

2. Производят всего два измерения скорости счета импульсов, первое — в момент времени $t_1=6$ мин, после начала накопления, а второе — в момент времени t_2 от 40 до 60 мин, а затем q_{Rn} и q_{Tn} , $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, определяют из выражений

$$q_{Rn} = \frac{K_{Rn}(t_2)}{60\varphi S(t_2 - t_1)}(N_{t_2} - N_{t_1}), \quad (3)$$

$$q_{Tn} = \frac{6,3 \cdot 10^{-3} N_{t_1}}{\varphi S}, \quad (4)$$

где N_{t_1} — измеренная в момент времени t_1 , мин, после начала накопления скорость счета импульсов, $\text{имп.}/\text{с}$; N_{t_2} — измеренная в момент времени t_2 , мин, после начала накопления скорость счета импульсов, $\text{имп.}/\text{с}$; $K_{Rn}(t_2)$ — вклад радона (^{222}Rn) в суммарный выход альфа-частиц от радона и продуктов его распада внутри накопительной камеры в момент времени t_2 , зависящий от t_2 , отн. ед. ; φ — коэффициент счета, который учитывает эффективность регистрации счетчика и геометрический фактор, $\text{имп.}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}$; S — площадь основания накопительной камеры, м^2 ; $6,3 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент, учитывающий вклад торона (^{220}Rn) в суммарный выход альфа-частиц от торона и продуктов его распада внутри накопительной камеры, а также накопление торона и его радиоактивный распад за 6 мин, с^{-1} .

Выбор первого времени измерения t_1 обусловлен тем, что на 6-й мин (рисунок) суммарная скорость счета соответствует равновесному (область насыщения) значению скорости счета от торона и его альфа-излучающих продуктов распада.

Рекомендуемое минимальное время второго измерения t_2 равно 40 мин, определяется требованием к объему статистики, поскольку при меньшем времени измерения сложно достоверно выделить сигнал от радона из суммарного сигнала. Ограничение на максимальное время второго измерения t_2 , равное 60 мин, связано с возможностью нарушения условия стационарности, т. е. изменением потока радона с поверхности земли, что приведет к увеличению неопределенности результата измерения.

Ограничение на расстояние чувствительной поверхности детектора от поверхности грунта, равное 10 см, позволяет избавиться от «фона», который может быть обусловлен регистрацией альфа-частиц, образующиеся при распаде радионуклидов, содержащихся в грунте.

Коэффициент $K_{Rn}(t_2)$ в выражении (3) и коэффициент $6,3 \cdot 10^{-3}$ в выражении (4) рассчитываются на основе решения системы уравнений баланса объемной активности радона, торона и продуктов их распада внутри накопительной камеры [10]. Изменение значений коэффициента $K_{Rn}(t_2)$ в зависимости от времени второго измерения t_2 представлены в таблице.

Разработанный способ может быть использован для измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта, строительных материалов в лабораторных и полевых условиях в 2-х вариантах. 1-й вариант способа осуществляется с использованием автоматизированных измерительных устройств, а 2-й – удобен, когда выполнение измерений и запись результатов невозможна без участия оператора.

Таблица. Значения коэффициента $K_{rn}(t_2)$ в зависимости от времени t_2

t_2 , мин	40	45	50	55	60
$K_{rn}(t_2)$, отн.ед.	0,5013	0,4925	0,4844	0,4770	0,4700

Предлагаемый способ измерения плотности потока радона и торона с поверхности грунта по альфа-излучению является простым и недорогим, поскольку не требует использования сложной спектрометрической аппаратуры, технических приемов и средств для разделения сигналов от торона и радона. Способ является достоверным, поскольку: 1) не требуется разделять сигналы от радона, торона и продуктов их распада различными техническими средствами, использование которых приводит к увеличению суммарной погрешности; 2) статистика увеличивается за счет того, что регистрируется суммарная скорость счета импульсов от

радона, торона и альфа-излучающих продуктов их распада, которая приблизительно в 4...5 раз выше, чем в отдельности от радона или торона.

Заключение

Разработан способ совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта, основанный на регистрации альфа-излучения радона, торона и продуктов их распада, накопленных внутри накопительной камеры. Определение накопленной активности отдельно для радона и торона при их совместном измерении в данном способе предложено осуществлять по форме кривой роста скорости счета импульсов от альфа-излучения. Предлагаемый способ является простым в осуществлении, поскольку не требуется использование спектрометрической аппаратуры, и удобен как для целей длительного мониторинга, так и для однократных измерений.

Предлагаемый способ может быть использован в области радиоэкологии для оценок радионормы территорий, планируемых под застройку, а также в научных целях, например, на станциях мониторинга для изучения предвестников сильных землетрясений, или в области геофизики при изучении радиоактивности атмосферы и ее электрических свойств.

Работа выполнена при поддержке Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1/544.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yakovleva V.S., Karataev V.D., Zukau V.V., Vukolov A.V., Nagorsky P.M., Smirnov S.V. Vertical profile of ion generation rate in atmosphere due to radon, radium and other radionuclides // Abstracts of the International Conference on radium and radon isotopes as environmental tracers. – Jerusalem, Israel, 14–19 March 2010. – Jerusalem: Hebrew University, 2010. – P. 75.
2. Kochowska E., Kozak K., Kozłowska B., Mazur J., Dorda J. Test measurements of thoron concentration using two ionization chambers AlphaGUARD vs. radon monitor RAD7 // Nukleonika. – 2009. – V. 54. – № 3. – P. 189–192.
3. Giargoni E., Honing A., Rottger A. Development of a calibration facility for measurements of the thoron activity concentration // Nuclear instruments and methods in physics research Section A. – 2003. – № 506. – P. 166–172.
4. Mjones L., Falk R., Mellander H., Nyblom L. Measurements of thoron and thoron progeny indoors in Sweden // Radiation Protection Dosimetry. – 1992. – № 45. – P. 249–352.
5. Nuccitelli C., Bochicchio F. The thoron issue: monitoring activities, measuring techniques and dose conversion factors // Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – № 78. – P. 59–64.
6. Zhuo W., Iida T., Yang X. Environmental radon and thoron progeny concentrations in Fujian province of China // Radiation Protection Dosimetry. – 2000. – № 87. – P. 137–140.
7. Tuccimei P., Moroni M., Norcia D. Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration // Applied Radiation and Isotopes. – 2006. – № 64. – P. 254–263.
8. Zaborowski W., Whittlestone S. A fast portable emanometer for field measurements of radon and thoron flux // Radiation Protection Dosimetry. – 1996. – № 67. – P. 109–120.
9. Ferry C., Beneito A., Richon P., Robe M.-C. An automatic device for measuring the effect on meteorological factors on radon-222 flux from soils in the long term // Radiation Protection Dosimetry. – 2001. – V. 93. – № 3. – P. 271–274.
10. Яковлева В.С. Динамика радона, торона и продуктов их распада внутри накопительной камеры // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2010. – № 2. – С. 56–63.

Поступила 17.06.2010 г.