

УДК 551.510.535:551.501.8

**МЕТОД МОНИТОРИНГА ПЛОТНОСТИ НЕВОЗМУЩЕННОГО ПОТОКА РАДОНА
С ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА**

В. С. Яковлева¹, П. М. Нагорский², Г. А. Яковлев³

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина 30,

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, г. Томск, пр. Академический, 10 / 3,

³ Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение средняя
общеобразовательная школа «Эврика-Развитие», 634050, г. Томск,
пер. Юрточный 8, стр. 1.

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

В работе изложены результаты анализа существующих методов измерения плотности потока радона с поверхности грунта, с указанием выявленных недостатков. Приведено описание разработанного нового метода мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта, пригодного для работы в широком диапазоне метеорологических условий. Разработанный метод заключается в регистрации α -излучения продуктов распада радона, накопленных внутри установленной на поверхность грунта накопительной камеры. В корпусе накопительной камеры выполнены отверстия для частичного выхода почвенного газа. Описана процедура калибровки и определения поправочных коэффициентов. Обсуждаются результаты апробации метода и сравнения данных мониторинга, полученных разными методами. Новый метод отличается от своих аналогов тем, что позволяет исследовать внутрисуточные вариации плотности потока радона.

Ключевые слова: радон, плотность потока, невозмущенный поток

© Яковлева В. С., Нагорский П. М., Яковлев Г. А., 2016

MSC 81V35

**METHOD OF MONITORING OF UNDISTURBED RADON FLUX DENSITY FROM
THE SOIL SURFACE**

V.S. Yakovleva¹, P.M. Nagorskiy², G.A. Yakovlev³

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Lenin st., 30 Russia,

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 634055, Tomsk,
Akademicheskaya st., 10 / 3., Russia,

³ Municipal budget educational institution, Secondary School "Eureka-Development",
634050, Tomsk, Yrtochny side st. 8, build. 1., Russia.

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

The results of analysis of existing measurement methods of radon flux density from the soil surface were presented in this work, and the revealed disadvantages of the methods were indicated. A new method of monitoring of undisturbed radon flux density from the soil surface, which is applied for its using in the large range of meteorological conditions, was developed. Outline of the method was given. The method is based on registration of α -radiation of radon decay products collected inside the accumulative chamber, which is installed on the soil surface. The accumulative chamber has some small vent holes for partial soil gas emission. The calibration procedure for determination of correction coefficient is described. The results of the method approbation and monitoring data, which was obtained by different methods, are discussed. The new method differs from its analogues in that it allows investigating daily variations of radon flux density.

Key words: radon, flux density, undisturbed flux

© Yakovleva V. S., Nagorskiy P. M., Yakovlev G. A., 2016

Введение

Величина плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта широко используется для решения прикладных задач в различных областях науки. ППР является ключевым параметром, определяющим интегральную величину концентрации радона, торона и дочерних продуктов их распада в приземной атмосфере, что, в свою очередь, влияет на радиационный фон [1]-[3]. Величина ППР может успешно использоваться в качестве одного из прогностических параметров, на основе которого можно строить прогнозы изменения напряженно-деформированного состояния земной коры [4]-[7]. Также, плотность потока радона может быть полезна при изучении влияния радона, выходящего из грунта на электрические свойства приземного слоя атмосферы, поскольку радон и продукты его распада являются ионизатором воздуха и, согласно работе [8], определяют временную составляющую динамики электричества атмосферы.

Первые работы по разработке методов измерения ППР с поверхности земли появились еще в 1-й половине прошлого столетия. В эти годы разработали основной принцип определения величины ППР с помощью статической накопительной камеры (НК) и первые приборы, которые впоследствии совершенствовались и модифицировались.

В конце 80-х годов, с появлением электречных детекторов, метод накопительной камеры был видоизменен из статического в динамический [9],[10], таким образом, появилась возможность измерять и контролировать невозмущенный поток радона.

Большой распространенностью отличается статический метод, в котором НК закрыта от внешней атмосферы в течение определенного времени накопления радона, затем она проветривается перед началом нового измерения. Основным преимуществом статического метода [3],[11] является более простой пересчет в величину ППР, по сравнению с динамическим методом. К тому же, сочетание статического метода накопления почвенных газов с мгновенными методами измерения накопленной активности позволяет контролировать временные вариации величины ППР в течение суток. Недостаток статического метода заключается в том, что при увеличении концентрации радона внутри НК, снижается градиент концентрации и, соответственно, поток радона из грунта. Это значит, что при увеличении концентрации радона внутри НК до 25% и более от концентрации радона в почвенном воздухе, расчетное значение плотности потока может быть недооценено [11]. Следовательно, время экспонирования НК следует подбирать в зависимости от характеристик обследуемого участка, что может существенно усложнить всю процедуру.

В динамическом методе накопительная камера "приоткрыта к атмосферному воздуху т.е. имеет небольшие отверстия для выхода воздушно-газовой смеси в атмосферу (и наоборот), поэтому, этот метод предназначен для измерения "невозмущенного" потока. Преимущество динамического метода заключается в отсутствии фоновой концентрации радона (торона) внутри накопительной камеры. Еще одно существенное преимущество состоит в том, что для проведения длительных мониторинговых исследований не требуется автоматизации процесса открывания-закрывания накопительной камеры, который существенно усложняет конструкцию измерительного комплекса и увеличивает суммарную методическую погрешность. Основным недостатком динамического метода – сложный пересчет результатов измерений накопленной объемной активности (ОА) радона в величину ППР, который требует длительной калибровки.

Другими недостатками динамического метода [9],[10] являются:

- большая длительность одного измерения, которая зависит от толщины тефлонового диска и составляет от 2 суток до 12 месяцев, что не позволяет проводить исследование внутрисуточных вариаций величины плотности потока радона;

- невозможность использования для автоматизированного мониторинга, т.е. проведения непрерывных последовательных измерений без участия оператора;

- необходимость периодически менять диффузионный фильтр в основании накопительной камеры, что приводит к изменению условий измерения.

В результате анализа литературы по методам измерения ППР, а также патентных исследований, было выявлено, что существующие методы не пригодны для их использования в комплексном радиационном мониторинге [2],[12], не обладают в полном объеме необходимыми функциями, а лишь частично их реализуют.

Вышесказанным была обусловлена основная цель настоящей работы – разработка метода мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта.

Метод измерения плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта

В ходе создания новой технологии радиационного мониторинга [2], внедряемой в Томской обсерватории радиоактивности и ионизирующих излучений (ТОРИИ), были сформулированы требования к методу мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта, который должен:

- а) быть простой в обслуживании и эксплуатации;
- б) позволять получать данные с высокой достоверностью;
- в) иметь способность к непрерывной длительной (не менее года) надежной работе в полевых условиях в широком диапазоне изменения атмосферного давления, относительной влажности (от 0 до ~ 100%), температуры (минус 45 °С до 50 °С);
- г) иметь наличие автоматизированной системы управления и записи данных;
- д) позволять получать временные ряды данных с большой частотой дискретизации, не более 30 мин., для изучения внутрисуточных вариаций величины;
- е) иметь низкую стоимость для возможности массового тиражирования и оборудования сетей мониторинга в разных регионах РФ. Кроме этого, в методе мониторинга ППР с поверхности грунта должно быть предусмотрено:

- а) отсутствие влияния торона на результат измерения;
- б) отсутствие системы открывания-закрывания накопительной камеры, которая увеличивает длительность одного измерения до 2 часов и более, что недостаточно для изучения внутрисуточных вариаций величины ППР, а также существенно снижает длительность работы до отказа.

Анализ результатов моделирования влияния состояния атмосферы и литосферы на динамику плотности потоков радона и торона с поверхности земли [13] показал, что плотность потока торона с поверхности грунта (рис. 1) почти не изменяется при изменении скорости адвекции (не более 2,6% в широком диапазоне значений $0 < v < 10^{-5}$ м/с) почвенных газов. Это значит, что торон, будет выходить из грунта внутрь НК с постоянной скоростью и, следовательно, будет вносить постоянный вклад в суммарное количество зарегистрированных детектором импульсов.

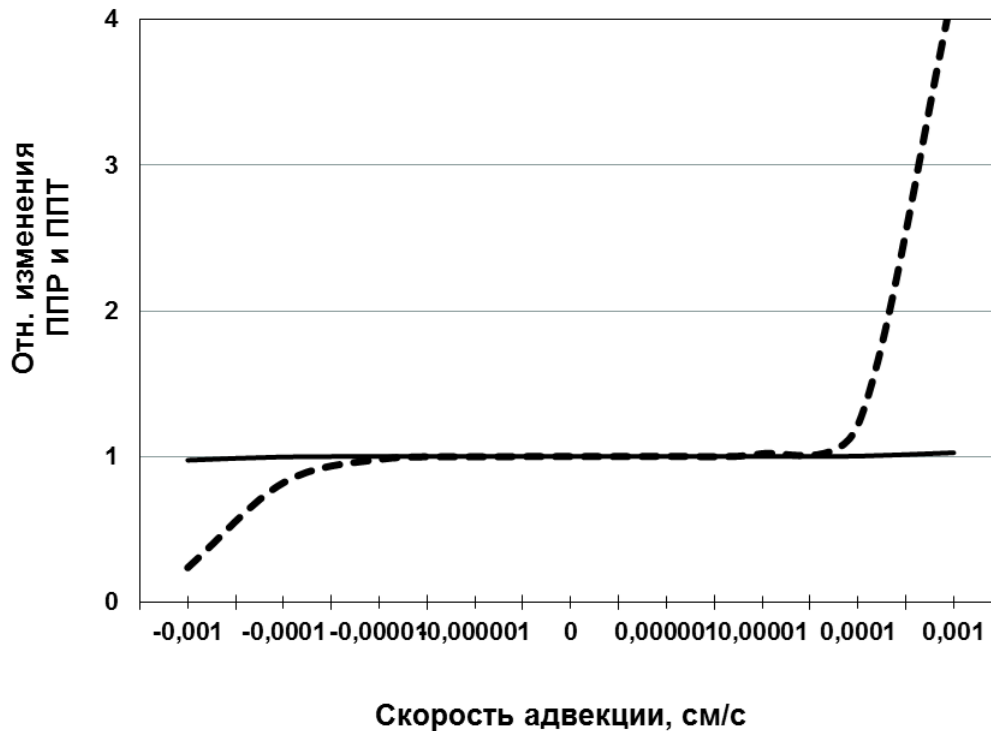


Рис. 1. Зависимость плотности потока радона (пунктирная линия) и торона (сплошная линия) от скорости адвекции

Этот результат позволил разработать простой и экономичный метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта. Метод заключается в использовании сцинтилляционного (или полупроводникового) детектора α -частиц и накопительной камеры (рис.2). Внутри НК установлен детектор α -частиц таким образом, чтобы его чувствительная поверхность была расположена не ближе 10 см к поверхности грунта. Такое ограничение позволяет избавиться от «фона», который может быть обусловлен регистрацией α -частиц, образующихся при распаде радионуклидов, содержащихся в грунте.

В корпусе НК выполнены отверстия для частичного выхода почвенного газа, а также для сохранения внутри накопительной камеры полуравновесной концентрации радона. Количество и размер отверстий выбирается исходя из условия, что скорость счета импульсов внутри накопительной камеры должна быть не менее чем в 10 раз выше, чем скорость счета импульсов в открытой атмосфере при том же расстоянии чувствительной поверхности сцинтилляционного α -детектора от поверхности грунта. Это позволяет снизить статистическую погрешность (среднее квадратическое отклонение) результата измерений. Плотность потока радона определяется из выражения:

$$q_{Rn}(t) = K_{Rn} \frac{N_{Rn+Tn}(t) - N_{Tn}}{\tau}, \quad (1)$$

где q_{Rn} — плотность потока радона с поверхности грунта в момент времени t , Бк $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$; K_{Rn} — поправочный коэффициент для перевода скорости счета импульсов от радона и α -излучающих дочерних продуктов его распада в единицы измерения плотности потока радона, (Бк $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$)/(имп. с^{-1}); N_{Rn+Tn} — суммарное количество зарегистрированных за длительность одного измерения τ импульсов от радона, то-

рона и α -излучающих дочерних продуктов их распада в момент времени t , имп.; N_{Tn} – количество импульсов от торона и α -излучающих дочерних продуктов его распада за длительность одного измерения τ , имп., которое, согласно [13] является постоянной величиной для конкретного места мониторинга, и не зависит от времени. τ – длительность одного измерения, с.

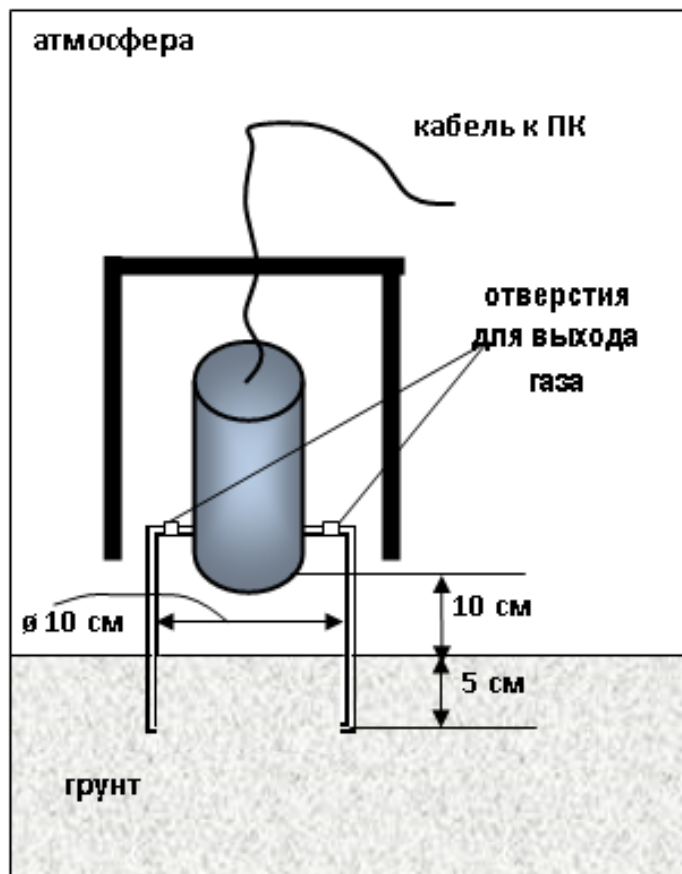


Рис. 2. Схема установки прибора для мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта

Рекомендуемая длительность одного измерения τ составляет от 60 до 900 с и определяется требованием к неопределенности результата измерения. Величина τ зависит от технических характеристик выбранного детектора α -частиц, а именно – эффективности его регистрации, а также от величины ОА радона внутри накопительной камеры. Если детектор α -излучения работает в счетном режиме с большой частотой дискретизации данных, это позволяет контролировать внутрисуточные вариации ППР.

Выбор динамической накопительной камеры в разработанном методе был обусловлен ее существенным преимуществом – не требуется автоматизации процесса открывания-закрывания накопительной камеры при проведении длительного контроля в режиме мониторинга. Таким образом, существенно упрощается конструкция накопительной камеры, поскольку не нужны сложные механизмы для отрывания-закрывания НК, а также программы управления этим процессом, синхронизация работы НК и измерительного устройства. Следовательно, снижается суммарная методическая погрешность, увеличивается срок работы прибора до отказа, а также существенно снижается общая стоимость прибора.

Таким образом, разработанный метод мониторинга плотности потока радона с поверхности грунта является:

а) достоверным, поскольку измеряется плотность именно невозмущенного потока радона с поверхности грунта вследствие использования накопительной камеры с небольшими отверстиями;

б) простым и достоверным, т.к. основание накопительной камеры не нужно закрывать диффузионным фильтром, предотвращающим попадание торона из грунта, использование которого могло бы приводить к увеличению методической погрешности, связанной с нарушением условий измерения при периодической замене фильтра;

в) экономичным, поскольку не требует использования сложной спектрометрической аппаратуры, технических приемов и средств для разделения сигналов от торона и радона;

г) достоверным, поскольку в заявленном методе статистика увеличивается за счет того, что регистрируется суммарный сигнал от радона, торона и дочерних продуктов их распада внутри накопительной камеры.

Процедура калибровки

Для осуществления мониторинга ППР в ТОРИИ было разработано 2 прибора RadEx-01 и RadEx-005, в которых чувствительная поверхность сцинтилляционного α -детектора расположена, соответственно на 10 см и 5 см выше поверхности грунта. Накопительная камера была изготовлена из непроницаемого для радона материала - поливинилхлорида. Диаметр каждого из 6-ти отверстий составлял 4 мм. В качестве детектора выбрали сцинтилляционный блок детектирования БДПА-01 (АТОМТЕХ, Республика Беларусь), работающий под управлением заводского программного обеспечения. Оба прибора были установлены на экспериментальной площадке ТОРИИ.

Предварительно, перед установкой накопительной камеры на поверхность грунта производятся измерения плотности потоков радона $q_{Rn}(t)$.

Затем, определяется количество импульсов N_{Tn} от торона и α -излучающих дочерних продуктов его распада за длительность одного измерения τ .

Далее производится измерение скорости счета импульсов внутри накопительной камеры при длительности одного измерения τ , предварительно удостоверившись, что скорость счета импульсов внутри накопительной камеры удовлетворяет условию, что она должна быть не менее, чем в 10 раз выше, чем скорость счета импульсов в открытой атмосфере на той же высоте от поверхности грунта.

Затем определяется поправочный коэффициент K_{Rn} для перевода скорости счета импульсов от радона и α -излучающих дочерних продуктов его распада в единицы измерения плотности потока радона из выражения:

$$K_{Rn} = \frac{q_{Rn}(t) \tau}{N_{Rn+Tn}(t) - N_{Tn}}. \quad (2)$$

Для начала процедуры мониторинга определенное из выражения (2) значение K_{Rn} вносят в программу компьютера для расчета плотности потока радона. Устанавливают начальное время отсчета и длительность одного измерения.

Результаты измерения ППР

Анализ результатов мониторинга плотности потока радона с поверхности грунта в приземную атмосферу позволил выявить ряд особенностей и закономерностей. Получено, что величина ППР подвержена сильной временной изменчивости. В течение года выявлены сезонные изменения величины ППР. Погодные условия существенно изменяют форму и длительность аномалий в рядах ППР, связанных с установлением и сходом снежного покрова.

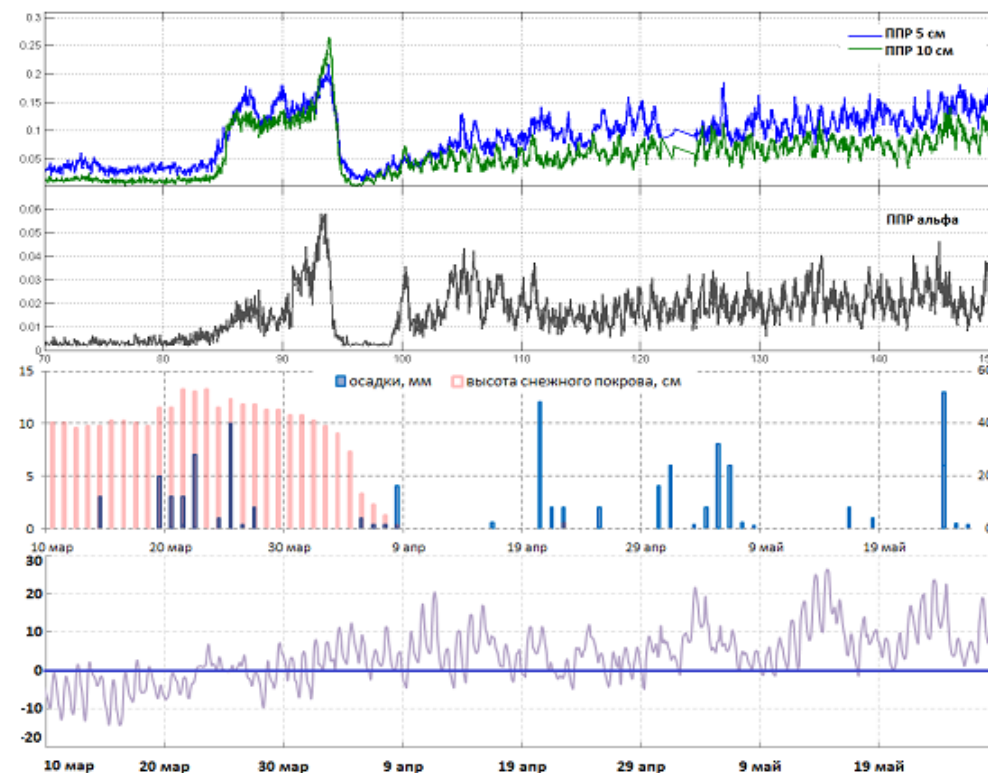


Рис. 3. Динамика ППР и метеорологических величин весной 2012 г.

На рис. 3 приведены экспериментальные ряды ППР, измеренной разными методами, высота снежного покрова, температура воздуха, количество снежных и дождевых осадков за период с 10 марта по 28 апреля 2012 г. Метод, основанный на использовании статической НК и сцинтилляционного α -детектора (ППР альфа) подробно описан в работе [14]. Данные, полученные приборами RadEx-005 и RadEx-01, обозначены «ППР 5 см» и «ППР 10 см», соответственно.

Все три прибора, основанные на разных методах, показали схожую динамику, с небольшими различиями, и аномальное поведение в период таяния снега. Аномальный рост ППР начался приблизительно за 2 недели до полного схода снежного покрова (24–25 марта) и закончился резким падением ППР до минимально регистрируемых значений в момент интенсивного таяния снега.

Такое необычное поведение ППР в период таяния снега обнаружено впервые и не отмечалось ранее в научной литературе, не смотря на большое количество экспериментальных работ по влиянию влажности грунта на величину ППР.

Получено, что максимальные значения наблюдаются в осенний период, в конце лета, и перед началом таяния снега (рис. 3), а минимальные значения – в зимний сезон. Эта закономерность хорошо согласуется с результатами, полученными на

территории РФ [15], где было отмечено, что в сезонной изменчивости минимальные значения ППР наблюдались в зимний период. Выявлена сильная временная изменчивость величины ППР в одной точке контроля – более, чем на один порядок величины в течение года.

В условиях «хорошей погоды» явно прослеживаются суточные вариации с максимумом – в полночь и минимумом – в полдень. Различие между ночными и дневными значениями доходит, в среднем, до 2 раз. Эти данные находятся в хорошем согласии с результатами работ [16]-[18]. Форма суточных вариаций ППР может изменяться от «пилообразной» до «почти ступенчатой» в разные периоды. Чаще наблюдается медленное нарастание величины ППР до максимального значения, и затем следует почти резкий спад.

Учет особенностей суточного хода ППР важен при проведении радиационно-гигиенического обследования территорий, планируемых под строительство, и определения степени их потенциальной радоноопасности. Если учесть, что контролирующие организации производят измерения плотности потока радона, как правило, в рабочее (дневное) время и используют при этом мгновенные методы, то учитывая, что минимальные значения ППР наблюдаются в дневное время, результаты измерений могут получиться существенно заниженными. В итоге, заключение о степени радоноопасности данной территории может быть ошибочным.

Разработанный метод пригоден для использования при решении широкого спектра прикладных задач: оценки радоноопасности территорий, плотности ионизации приземного слоя атмосферы; изучения предвестников землетрясений; процессов и механизмов газообмена между грунтом и атмосферой, литосферно-атмосферных связей.

Заключение

Разработан метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта. По сравнению со своими аналогами, этот метод имеет ряд преимуществ: а) позволяет измерять плотность именно невозмущенного потока радона вследствие использования динамической накопительной камеры; б) является довольно простым в использовании, т.к. не требует использования диффузионных фильтров для отсека торона, а также автоматизации процесса открывания-закрывания накопительной камеры; в) является экономичным, поскольку не требует использования сложной спектрометрической аппаратуры, технических приемов и средств для разделения сигналов от торона и радона.

По результатам апробации метода получено, что величина ППР подвержена сильной временной изменчивости. Максимальные значения наблюдаются в осенний период, в конце лета, и перед началом таяния снега, а минимальные значения – в зимний сезон. Аномальный рост ППР наблюдается в период схода снежного покрова.

Выявлена сильная временная изменчивость величины ППР в одной точке контроля – более, чем на один порядок величины в течение года. В условиях «хорошей погоды» устанавливается «стандартный» суточный ход с максимумом – в полночь и минимумом – в полдень. Различие между ночными и дневными значениями доходит, в среднем, до 2 раз.

Работа выполнена при поддержке ФЦП № 14.575.21.0105.

Список литературы

- [1] Яковлева В. С., Нагорский П. М., Черепнев М. С., “Формирование α -, β - и γ -полей приземной атмосферы природными атмосферными радионуклидами”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2014, № 1(8), 86–96.
- [2] Яковлева В. С., Каратаев В. Д., Вуколов А. В., Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Нагорский П. М., “Развитие технологии радиационного мониторинга в городской среде”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2015, № 1(10), 65–71.
- [3] Яковлева В. С., *Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов*, Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 174 с.
- [4] Firstov P. P., Yakovleva V. S., Shirokov V. A., Rulenko O. P., Filippov Yu. A., Malysheva O. P., “The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone”, *Annals of Geophysics*, **50**:4 (2007), 547–556.
- [5] Yakovleva V. S., “The radon flux density from the Earth’s surface as an indicator of a seismic activity”, 7th International Conference on gas geochemistry (ICGG7) (Freiberg, Germany, 2003), 2003, 28–30.
- [6] Паровик Р. И., Фирстов П. П., “Апробация новой методики расчета плотности потока радона с поверхности (на примере Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона)”, *АНРИ*, 2009, № 3, 52–57.
- [7] Фирстов П. П., Паровик Р. И., Яковлева В. С., Малышева О. П., “Связь скорости адвекции и плотности потока радона с сильными землетрясениями южной Камчатки в 2000-2008 гг.”, *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений*, V международная конференция (Камчатский край, Петропавловск-Камчатский, 2010), ИКИР ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2010, 50–51.
- [8] Чалмерс Дж. А., *Атмосферное электричество*, Л., Гидрометеиздат, 1974, 420 с.
- [9] Паровик Р. И., Ильин И. А., Фирстов П. П., “Обобщенная одномерная модель массопереноса радона и его эксхалация в приземный слой атмосферы”, *Математическое моделирование*, **19**:11 (2007), 43–50.
- [10] Kotrappa P., Dempsey J. C., Hickey J. R., Stieff L. R., “An electret passive environmental Rn-222 monitor based on ionization measurement”, *Health Phys.*, 1988, № 54, 47–56.
- [11] Kotrappa P. et al., “A Practical E-PEPM System for Indoor ²²²Rn Measurement”, *Health Physics*, **81**:58 (1990), 461–467.
- [12] Hartman B., “How to collect reliable soil-gas data for upward risk assessments”, *Surface flux-chamber method*, Bulletin 44. V. 2, LUSTLine, 2003, 14–34.
- [13] Яковлева В. С. и др., “Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе «литосфера–атмосфера»”, *АНРИ*, 2009, № 4, 55–60.
- [14] Яковлева В. С., “Моделирование влияния состояния атмосферы и литосферы на динамику плотности потока радона и торона с поверхности земли”, *Известия ТПУ*, **317**:2 (2010), 162–166.
- [15] Яковлева В. С., Вуколов А. В., «Способ измерения плотности потока радона и торона с поверхности грунта по α -излучению», Патент РФ на изобретение №2419817 от 03.03.10..
- [16] Роголис В. С., Кузьмич С. Г., Польский О. Г., “Исследования влияния временных и погодных условий на потоки радона на строительных площадках г. Москвы”, *АНРИ*, 2001, № 4, 57–61.
- [17] Reiter E. R., *Atmospheric Transport Processes - Part 4: Radiactive Tracers*, Technical Information Center, US Department of Energy, 1978.
- [18] Сисигина Т. И., “Колебания эксхалации радона из почвы в атмосферу в связи с изменением метеорологических условий”, *Радиоактивность атмосферы, почвы и пресных вод*, Москва, Труды института экспериментальной метеорологии, М., Московское отделение гидрометеиздата, 1970, 3–15.