УДК 551.510;539.163

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТИ АТМОСФЕРЫ И ЛИТОСФЕРЫ НА ПЛОТНОСТЬ ПОТОКОВ РАДОНА И ТОРОНА С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

В.С. Яковлева

Томский политехнический университет
E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Проведены оценки диапазона изменения плотности потоков радона и торона с поверхности земли при воздействии внешних факторов, а также в зависимости от изменения физико-геологических характеристик поверхностных грунтов. Изменение состояния атмосферы и литосферы моделировалось изменением скорости адвекции и коэффициента диффузии радона и торона в грунте. Учтено, что изменение вертикальных градиентов температуры и давления, турбулентности приземной атмосферы, а также напряженно-деформированного состояния земной коры влияет на скорость адвекции почвенных газов. Осадки, которые приводят к повышению влажности грунта, и изменение температурного режима, соответственно, влияют на коэффициент диффузии почвенных газов. Оценки произведены по диффузионно-адвективной модели переноса радона в пористых средах.

Ключевые слова:
Радон, торон, плотность потока, литосфера, атмосфера, моделирование, грунт, диффузия, адвекция.

Key words:
Radon, thoron, flux density, lithosphere, atmosphere, simulation, soil, diffusion, advection.

В конце 90-х гг. прошлого столетия существенно возрос научный интерес к исследованию величины плотности потока радона (^{222}Rn) (ППР) с поверхности земли. В основном, это было связано с использованием величины ППР для оценки потенциальной радоноопасности территорий в таких областях, как радиоэкология, геоэкология, строительство. На основе данных об измеренных значениях ППР строили карты радонового потенциала территорий с целью последующих оценок радиационного риска для населения [1]. После проведения ряда экспериментальных исследований временной и пространственной изменчивости плотности потока радона некоторые российские [2] и зарубежные [3] специалисты пришли к заключению, что эта величина сильно изменчива и, в основном, отражает локальные погодные условия, что несколько снизило интерес к этой величине со стороны радиоэкологии.

Результаты теоретических исследований позволили установить [4], что величина ППР более чувствительна к изменению состояния геологической среды и атмосферы, по сравнению с объемной активностью радона в почвенном воздухе, традиционно используемой в качестве предвестника землетрясений и рассматриваемой как один из прогностических параметров. Это было позднее подтверждено экспериментально [5].

Плотность потока радона представляет научный интерес для изучения электрических свойств приземной атмосферы, поскольку определяет вертикальный профиль объемной активности радона и продуктов его распада, являющихся основными ионизаторами воздуха приземной атмосферы над континентами [6].

Анализ опубликованных экспериментальных данных по ППР позволил выявить:

1. **Изменчивость**:
   a) в пределах большой территории с одним типом грунта – на 1 порядок величины;
   b) в пределах города – более чем на 2 порядка величины;
   c) в одной точке в течение длительного времени – в пределах 1-го порядка величины.
2. **Закономерности:**
   a) суточные вариации (в 1,5...2 раза) с максимумом – ночью и минимумом – до заката, иногда наблюдаются 2 максимума – в полдень и ночью;
   b) сильные отклонения от среднего значения в период резкой смены погоды;
   c) аномальное поведение за несколько суток до возникновения сейсмического случая.
3. **Влияющие факторы:**
   a) метеорологические условия: скорость и направление ветра; температура почвы и воздуха (градиент); атмосферное давление (градиент); прохождение циклонов; осадки (влажность грунта);
   b) геологическая структура и физико-геологические характеристики грунтов, особенно в приповерхностном слое;
   c) сейсмичность.

Исследованию плотности потока торона (^{220}Rn) (ППТ) с поверхности земли посвящено гораздо меньше научных работ [7, 8]. Это объясняется тем, что торон не представляет опасности для здоровья населения, вследствие его малого периода жизни. Однако, недавно, теоретическими расчетами было показано, что торон, выходящий с поверхности земли, и продукты его распада могут вносить сопоставимый с радоном, а при некоторых условиях даже больший, вклад в ионизацию приповерхностного слоя атмосферы [6].

Несмотря на солидную, накопленную мировой практикой, базу экспериментальных данных, остается нерешенным ряд принципиальных вопросов, связанных с влиянием изменчивости атмосферы и литосферы на величины плотности потоков радона и торона с поверхности земли и диапазон их изме-

нения. Отсутствуют работы по теоретическому исследованию этих вопросов.

Целью настоящей работы являлось восполнение недостающей информации по выше очерченным вопросам. Особенно важным здесь является учет различий физических свойств радона и торона, а именно периодов их полураспада, которые отличаются на 4 порядка и, тем самым, определяют принципиальные различия в закономерностях переноса радона и торона на границе системы «атмосфера-литосфера». В связи с предполагаемыми различиями в поведении величин ППР и ППТ, в работе сделан особый упор на изучении отношения этих величин (ППТ/ППР) и диапазона его изменения.

Моделирование плотности потока радона и торона

Для моделирования плотности потоков радона и торона использована диффузионно-адвективная модель переноса радона в пористых средах, детально описанная в работе [9], решение которой для стационарного случая с граничными условиями $A(0)=0$ и $A(\infty)=A_\infty$ имеет вид (ось z направлена вниз от поверхности земли, $z\geq 0$)

$$A(z) = A_\infty \left(1 - \exp^{-\left(\sqrt{\left(\frac{\upsilon}{2D_e}\right)^2 + \frac{\lambda}{D_e}} + \frac{\upsilon}{2D_e} \right) z} \right), \qquad (*)$$

где $A(z)$ – активность радона (торона), приходящаяся на единицу объема порового пространства, Бк/м^3; υ – скорость адвективного переноса, м/с; D_e – эффективный (объемный) коэффициент диффузии радона (торона), м^2/с; λ – постоянная распада, с$^{-1}$; A_∞ – поровая активность радона (торона), находящегося в радиоактивном равновесии с ^{226}Ra (^{232}Th), равная $A_\infty = \frac{K_{em} A_s \rho_s (1-\eta)}{\eta}$; K_{em} – коэффициент эманирования радона (торона), отн. ед.; A_s – удельная активность ^{226}Ra (^{232}Th), Бк/кг; ρ_s – плотность частиц грунта, кг/м^3; η – пористость грунта, отн. ед.

Плотность потока изотопов радона определяется согласно первому закону Фика с учетом адвективного переноса выражением

$$q(z) = -D_e \frac{\partial(\eta A(z))}{\partial z} + \upsilon \eta A(z),$$

которое с учетом (*) и при $z=0$ запишется в виде

$$q(z)\big|_{z=0} = D_e \eta A_\infty \left(\sqrt{\left(\frac{\upsilon}{2D_e}\right)^2 + \frac{\lambda}{D_e}} + \frac{\upsilon}{2D_e} \right).$$

Моделирование влияния состояния и изменчивости атмосферы и литосферы

Изменение состояния атмосферы, а именно изменение вертикальных градиентов температуры и давления, скорости ветра, турбулентности, приводит к изменению скорости адвекции радиоактивных газов в грунте. Изменение состояния литосферы, под которым подразумевается изменение напряженно-деформированного состояния земной коры, например, при подготовке землетрясений, также влияет на скорость адвекции почвенных радиоактивных газов. Поэтому, влияние всех вышеперечисленных параметров и характеристик на величины плотности потоков радона и торона с поверхности земли моделировали изменением скорости адвективного переноса. Влияние выпадения осадков, приводящих к повышению влажности грунта, моделировали изменением величины коэффициента диффузии радона и торона. Из физико-геологических характеристик приповерхностного слоя геологической среды рассматривали следующие: плотность грунта; пористость грунта; удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th; коэффициент эманирования радона и торона.

Зависимость ППР и ППТ от скорости адвекции

Исследование влияния скорости адвекции на величину плотности потока радона/торона с поверхности грунта произведено для территории с относительно однородной геологической структурой, физико-геологические параметры поверхностных грунтов которой представлены в таблице и отвечают средним для суглинков значениям. Диапазон изменения скорости адвекции для моделирования выбран от -10^{-3} до 10^{-3} см/с, в соответствии с экспериментально определенными в сейсмически спокойном регионе значениями [10]. При положительных значениях скорости υ адвективный поток направлен к поверхности земли и складывается с диффузионным, увеличивая суммарный поток радиоактивных газов в атмосферу. При отрицательных значениях υ адвективный поток направлен вглубь земной поверхности, снижая суммарный поток газов в атмосферу.

Таблица. *Физико-геологические параметры грунта для моделирования*

Удельная активность, Бк·кг$^{-1}$		Коэффициент эманирования радона, отн. ед.	Коэффициент диффузии радона, см^2·с$^{-1}$	Плотность частиц грунта, г·см$^{-3}$	Пористость грунта, отн. ед.
^{226}Ra	^{232}Th				
30	30	0,2	0,03	2,7	0,45

Результаты расчетов иллюстрируются рис. 1, 2. Моделирование показало, что ППР и ППТ практически не изменяются до значений скорости адвекции $|\upsilon| \leq 10^{-4}$ см/с. При дальнейшем увеличении скорости адвекции на порядок величина ППР изменяется почти в 4 раза, в то время как ППТ изменяется не более чем на 3 %.

Отношение ППТ/ППР остается постоянным в большом диапазоне изменения скорости адвекции (рис. 2) и для указанных параметров грунтов равно 77. Во всем диапазоне изменения скорости адвективного переноса почвенных газов, которое может быть вызвано влиянием только погодных условий [10], отношение ППТ/ППР меняется более чем на порядок (от 20 до 320) и определяется, в основном, чувствительностью потока радона к изменению внешних факторов.

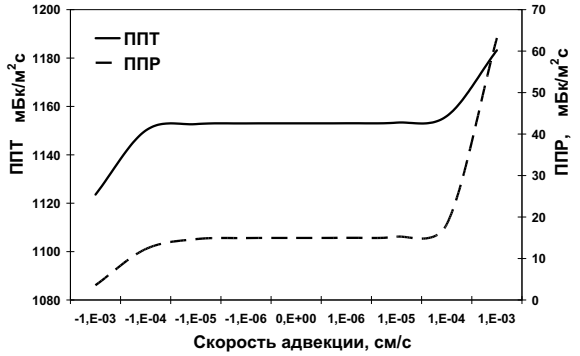


Рис. 1. *Зависимость плотности потоков радона и торона от скорости адвекции*

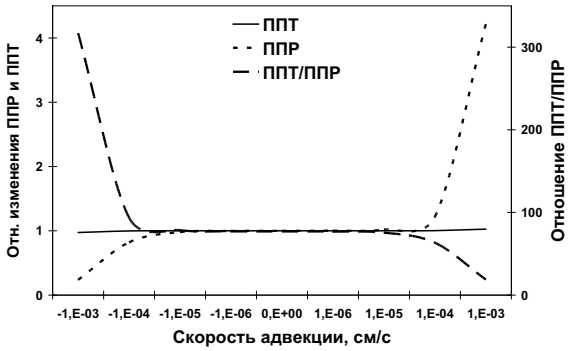


Рис. 2. *Изменение отношения ППТ/ППР в зависимости от скорости адвекции*

Зависимость ППР и ППТ от коэффициента диффузии

Величины ППР и ППТ, согласно (*), зависят прямо пропорционально корню квадратному из коэффициента диффузии радона или торона. Коэффициент диффузии определяется содержанием воды в порах грунта и его пористостью [11]:

$$D_e = \eta D_0 e^{-6m\eta - 6m^{14\eta}},$$

где D_0 – коэффициент молекулярной диффузии радона/торона в воздухе (D_0=0,11 см^2/с); m – коэффициент водонасыщения, т. е. степень влажности или заполнения объема пор водой, которую рассчитывают по массовому содержанию воды w (природная влажность грунта) из соотношения [12]:

$$m = w\rho_s / \eta\rho_w = w\rho_s / 1000\eta.$$

Зависимость коэффициента диффузии от степени влажности представлена на рис. 3. Видно, что коэффициент диффузии может снижаться на 5 порядков величины при увеличении содержания воды в порах грунта от 10 до 100 %. Известно, что коэффициент диффузии радона/торона для рыхлых поверхностных отложениях изменяется незначительно, со средним значением 0,03 см^2/с. Содержание влаги в поверхностных грунтах при нормальных условиях находится в пределах от 10 до 30 %, что соответствует (рис. 3) диапазону изменения коэффициента диффузии от 0,02 до 0,04 см^2/с. При полном заполнении пор водой коэффициент диффузии снижается до значения 10^{-5} см^2/с, а в сухом грунте – достигает 0,05 см^2/с.

Изменения ППТ и ППР в зависимости от водонасыщенности грунта, рассчитанные относительно средних значений при коэффициенте диффузии 0,03, представлены на рис. 4 при различных значениях скорости адвекции. Видно, что плотность потока торона с поверхности грунта снижается практически до нуля при полном заполнении пор водой. Та же зависимость наблюдается и для плотности потока радона, если преобладает диффузионный перенос, или при адвективных потоках, направленных вглубь земли. Если адвективный поток в атмосферу значительно преобладает над диффузионным, то ППР после выпадения осадков снижается, но несущественно.

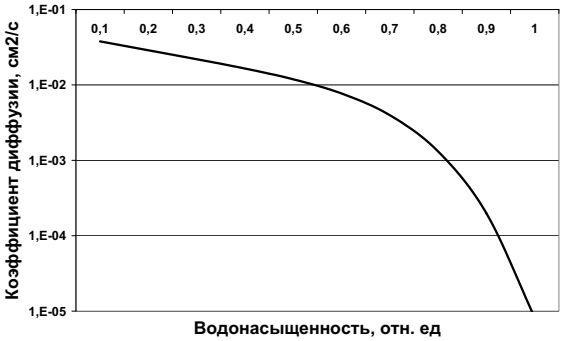


Рис. 3. *Зависимость коэффициента диффузии от водонасыщености грунта*

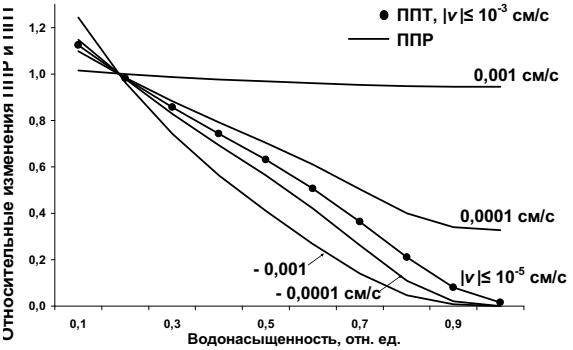


Рис. 4. *Изменение ППТ и ППР в зависимости от водонасыщенности*

Зависимость отношения ППТ/ППР от величины скорости адвекции при различных коэффициентах диффузии представлена на рис. 5. Рассмотрен характерный диапазон изменения коэффициента диффузии, а также случай выпадения дождевых осадков, приводящий к заполнению пор грунта водой, в среднем, до 80 %. Для оценок взят коэффициент диффузии, равный 0,001 см^2/с. Установлено, что изменение коэффициента диффузии от 0,02 до 0,04 см^2/с слабо сказывается на изменении отношения ППТ/ППР. И только при сильном увлажнении грунта и при скоростях адвекции больших 10^{-5} см/с отношение ППТ/ППР начинает возрастать и может увеличиться до 6. Суммируя результаты вычислительных экспериментов, можно сделать вывод: такое поведение отношения ППТ/ППР обусловлено различиями в чувствительности потоков радона и торона к внешним воз-

действиям, сказывающимся на изменении скорости адвекции. Анализ полученных зависимостей усложняется тем, что скорость адвективного переноса является практически неизученной величиной, а именно, не известна функция ее зависимости от метеорологических и других факторов, известен только диапазон изменения скорости адвекции [10].

Зависимость ППР и ППТ от содержания радия и тория

Величины плотности потоков радона и торона прямо пропорционально зависят от физико-геологических характеристик грунтов, таких как удельная активность ^{226}Ra и ^{232}Th, плотности грунта и коэффициента эманирования, и обратно пропорционально – от его пористости [13]. В связи с этим, пространственную динамику плотности потоков в пределах, например, городской территории будет определять содержание ^{226}Ra и ^{232}Th в грунтах. Для г. Томска экспериментально определенный в работе [14] диапазон удельной активности ^{226}Ra и ^{232}Th в поверхностных грунтах составил, соответственно, 15...49 и 18...35 Бк/кг. Таким образом, ожидаемое за счет вариаций содержания радионуклидов изменение ППР и ППТ составит 3,3 и 2 раза, соответственно.

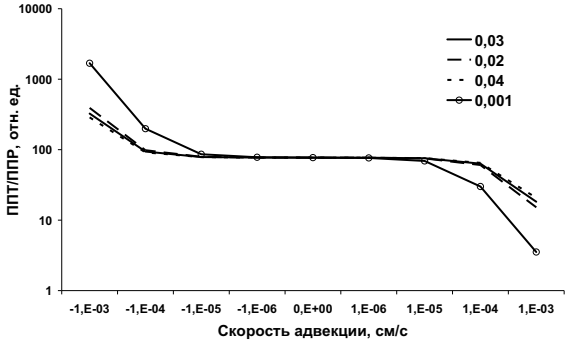


Рис. 5. *Изменение отношения ППТ/ППР в зависимости от скорости адвекции при различных коэффициентах диффузии*

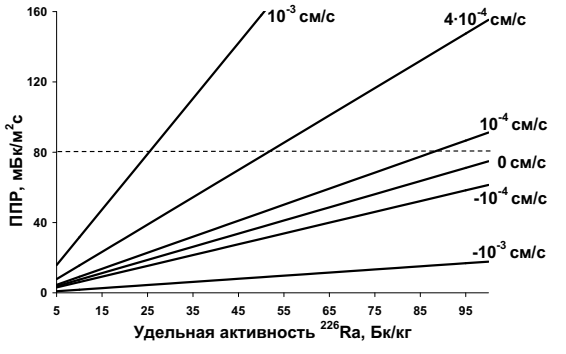


Рис. 6. *Зависимость ППР от удельной активности ^{226}Ra в грунте при разной скорости адвекции*

На рис. 6 представлена зависимость ППР от удельной активности ^{226}Ra при разных значениях и направлении скорости адвекции. Пунктирной линией отмечено допустимое согласно строительным нормам значение ППР на территории застройки, при превышении которого территорию относят к радоноопасной. Например, на территории г. Томска превышение допустимого значения 80 мБк·м$^{-2}$с$^{-1}$ следует ожидать только при высоких значениях $\geq 4 \cdot 10^{-4}$ см/с скорости адвективного потока, направленного к земной поверхности.

Зависимость отношения ППТ/ППР от соотношения удельных активностей ^{232}Th и ^{226}Ra для случая, когда перенос радиоактивных газов в грунте и выход их в приземную атмосферу осуществляется только за счет диффузии, является линейной типа $y=kx$, с коэффициентом пропорциональности, определяемым отношением постоянных радиоактивного распада торона и радона $k=\sqrt{\lambda_{Tn}/\lambda_{Rn}}=77$. Исследование указанной зависимости при разных значениях скорости адвективного переноса радиоактивных почвенных газов показало, что зависимость отношения ППТ/ППР от соотношения удельных активностей ^{232}Th и ^{226}Ra при изменении υ в диапазоне значений от -10^{-3} до 10^{-3} см/с будет оставаться линейной.

Зависимость ППР и ППТ от коэффициента эманирования

Для суглинков и супесей, экспериментально определенный коэффициент эманирования радона и торона составляет 0,2 [15]. Диапазон значений коэффициента эманирования радона для разных типов поверхностных грунтов составляет от 0,2 до 0,4 [15]. Учитывая прямо пропорциональную зависимость величин ППР и ППТ от коэффициента эманирования, следует ожидать их пространственную изменчивость в пределах большой территории, например г. Томска, не более чем в 2 раза.

Зависимость ППР и ППТ от плотности и пористости грунта

Плотность частиц рыхлых отложений, которые обычно слагают поверхностный слой, в среднем, составляет 2,7 г·см$^{-3}$ с диапазоном 2,66...2,73 г·см$^{-3}$. Поскольку плотность частиц грунта является практически постоянной величиной, рассмотрим влияние на величину плотности потоков радона и торона пористости грунта η, которая изменяется в диапазоне, характерном для поверхностных грунтов, от 37 до 49 %, и связана с плотностью частиц грунта ρ_s следующим соотношением [16]

$$\eta = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s},$$

где ρ_d – плотность сухого грунта, г·см$^{-3}$.

Для моделирования рассмотрим диапазон изменения пористости от 35 до 50 %. Расчеты показали, что при увеличении пористости грунта в 1,5 раза величины ППР и ППТ снижаются всего на 20 %.

Сочетанное влияние различных факторов на ППР и ППТ

Произведенные расчеты позволяют оценить ожидаемую пространственную и временную изменчивость величин плотности потоков радона и торона с поверхности земли. Пространственная изменчивость при одинаковых метеорологических усло-

вий обусловлена физико-геологическими параметрами поверхностных грунтов, слагающих исследуемую территорию. Например, на территории г. Томска следует ожидать пространственную изменчивость ППР и ППТ 8 и 5 раз, соответственно. Ожидаемая временная изменчивость плотности потока радона в одной точке в течение длительного промежутка времени до года может составлять более 2-х порядков величины (рис. 2 и 4), в зависимости от погодных условий. Заметное изменение плотности потока торона в одной точке может быть обусловлено только изменением степени влажности грунта. Полученные оценки хорошо согласуются с экспериментальными данными [7, 17, 18].

При моделировании не учитывались геологическая структура территории, наличие глубинных источников радона и разломов в земной коре, а также поверхностное загрязнение территории выбросами ТЭС. Все эти факторы могут существенно расширить диапазон изменчивости плотности потоков радона и торона.

Выводы

1. Величина плотности потока радона с поверхности земли существенно реагирует на изменение скорости адвекции, превышающей по модулю 10^{-4} см/с. Плотность потока торона, в отличие от радона, практически не зависит от скорости адвекции, что объясняется коротким периодом жизни торона, и, в основном, определяется физико-геологическими параметрами грунта и его влажностью.
2. Значительную изменчивость плотности потока радона во времени следует учитывать при проведении радиационно-гигиенических обследований территорий с целью оценки их радоноопасности, а также при проведении геологоразведочных работ, в случае если эти измерения производятся с использованием экспресс-методов.
3. При преимущественном диффузионном переносе радиоактивных газов в грунте между отношением плотностей потоков торона и радона и отношением удельных активностей ^{232}Th и ^{226}Ra в грунте существует линейная зависимость с коэффициентом пропорциональности, равным 77.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ielsch G., Ferry C., Tymen G., Robe M.-C. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate // Journal of Environmental Radioactivity. – 2002. – № 63. – P. 15–33.
2. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2007. – № 2. – С. 2–16.
3. Neznal M., Neznal M. Measurement of radon exhalation rate from the ground surface: can the parameter be used for a determination of radon potential of soils? // Radon Investigations in the Czech Republic. – 2002. – V. 9. – P. 16–25.
4. 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.
5. 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. – 2007. – V. 50. – № 4. – P. 547–556.
6. 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. – Hebrew University, 2010. – P. 75.
7. Schery S.D., Whittlestone S., Hart K.P., Hill S.E. The flux of radon and thoron from Australian Soils // Journal of Geophysics Research. – 1989. – V. 94. – P. 8567–8576.
8. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В., Фирстов П.П., Паровик Р.И. Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе «литосфера – атмосфера» // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2009. – № 4. – С. 55–60.
9. Яковлева В.С. Диффузионно-адвективный перенос радона в многослойных геологических средах // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 67–72.
10. Iakovleva V.S.; Ryzhakova N.K. A method for estimating the convective radon transport velocity in soils // Radiation Measurements. – 2003. – V. 36. – № 1. – P. 389–391.
11. Rogers V.C., Nielson K.K. Multiphase radon generation and transport in porous materials // Health Physics. – 1991. – V. 60. – P. 807–815.
12. Nielson K.K., Rogers V.C., Holt R.B. Measurement and calculation of soil radon flux at 325 sites throughout Florida // Environmental International. – 1996. – V. 22. – № 1. – P. 471–476.
13. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. – Л.: Недра, 1989. – 407 с.
14. Каратаев В.Д., Яковлева В.С., Эргашев Д.Э. Исследование радиоактивности объектов окружающей среды на территории Томской области // Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 4. – С. 105–109.
15. Durrani S.A., Ilic R. Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment. – Singapore: World Scientific, 1997. – 387 p.
16. Далматов Б. И., Бронин В. М., Карлов В. Д. Механика грунтов. Часть 1. Основы геотехники в строительстве / под ред. Б.И. Далматова. – М.-СПб.: АСВ, СПбГА-СУ, 2000. – 204 с.
17. Решетов В.В., Бердников П.В. Результаты совместных измерений объемной активности радона в почвенном воздухе и плотности потока радона с поверхности почво-грунтов на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2001. – № 4. – С. 34–37.
18. Megumi K., Mamuro T. Radon and thoron exhalation from the ground // Journal of Geophysical Research. – 1973. – V. 78. – № 11. – P. 1804–1808.

Поступила 08.05.2010 г.