

Паровик Р.И.¹, Шевцов Б.М.¹, Фирстов П.П.²

¹ *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, с. Паратунка, roman84@mail.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, firstov@emsd.ru*

Введение

С 1999 г. на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне (рис. 1), расположенном на побережье Авачинского залива, работает сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона (²²²Rn) Камчатского филиала Геофизической службы РАН с целью поиска предвестников сильных землетрясений Южной Камчатки. Регистрация концентрации радона в почвенном воздухе ведется в зоне аэрации на двух глубинах с помощью газоразрядных счетчиков по β – излучению. Как показал опыт многолетних наблюдений в динамике радона наблюдаются предвестниковые аномалии перед сильными землетрясениями Южной Камчатки, амплитуда которых составляет на более 30% от фона [13]. Для выявления таких предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона, как правило, строят его математическую модель. Например, в работе [16] на основе стационарной математической модели переноса радона показано, что в неоднородной слоистой среде при увеличении скорости адвекции радона (v) значение поровой объемной активности радона (ОА Rn) увеличиваться пропорционально, в то время как плотность потока радона (ППР) увеличивается по квадратичной зависимости. В однородной среде при увеличении v на порядок, ППР увеличивается также на порядок, а ОА Rn растет незначительно. Теоретические оценки были подтверждены экспериментально в работе [14], где показано, что динамические характеристики ОА Rn в почвенном воздухе менее чувствительны к изменениям напряженно деформированного состояния геосреды на Камчатке по сравнению с ППР.

Однако геосреда в «реальных» условиях имеет сложную структуру и обладает фрактальными свойствами, которые обусловлены степенным распределением по размерам с некоторым дробным показателем пор и трещин. Причем фрактальность среды сохраняется на различных пространственных масштабах. В среде с фрактальными свойствами процессы миграции Rn подчиняются другим законам и протекают более интенсивно, чем аналогичные процессы в однородных средах, поэтому появляется необходимость математического описания процессов переноса Rn в среде с фрактальными свойствами. В данной работе приведены результаты математического моделирования переноса радона, как в однородных, так и фрактальных средах и проведено их сопоставление с экспериментальными данными.

Модель переноса радона в однородной пористой среде

В работах [2, 3, 4] построены математические модели переноса радона в однородной пористой среде, которые составляют основу эманационного метода [1]. Рассмотрим следующую математическую модель в области $-\infty < z \leq 0, t > 0$:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial t} - D_G \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial z^2} + v \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \lambda A(z,t) - \lambda A_\infty = 0, \quad (1)$$

$$A(z,0) = A_\infty, \quad q(t) = -D_G \eta \left. \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} + v \eta A(0,t), \quad A(z_i, t_j) = A^{obs}.$$

Здесь: $A(z,t)$ – ОА Rn на единицу объема порового воздуха, Бк/м³; A_∞ - установившаяся поровая ОА Rn на заданной глубине, Бк/м³; $A(z_i, t_j) = A^{obs}$ – измеренная поровая ОА Rn на i -ой глубине в j -моменты времени, Бк/м³; $q(t)$ - плотность потока радона, которую требуется оценить, Бк/(м²·с); η - пористость грунта, от. ед.; D_G – коэффициент диффузии радона в грунте, м²/с; λ - постоянная распада радона, с⁻¹; v – скорость адвекции радона в грунте, м/с. Решение модели (1), в которой неизвестными величинами являются $A(z,t)$ и $q(t)$ ранее не рассматривалось.

Так как начального условия при $t = 0$ не задано, то задача (1) является некорректно поставленной обратной задачей для восстановления ППР по измеренным данным временных рядов ОА Rn, полученных на разных глубинах. Методика оценки ППР описана в работах [5 - 8] и реализована в компьютерной программе «РЭКСЭМ» [9].

Математическая модель переноса радона во фрактальной среде

Рассмотрим модельное уравнение переноса радона в грунте с фрактальными свойствами. Уравнения на фракталах, как правило, описываются производными дробного порядка и называются нелокальными. В стационарном виде это уравнение можно записать так:

$$D_\alpha d_{0z}^\alpha C(z) - \lambda(C(z) - C_\infty) = 0 \quad (2)$$

с начальными нелокальными условиями: $\lim_{z \rightarrow 0} d_{0z}^{\alpha-1} C(z) = C_1$, $\lim_{z \rightarrow 0} d_{0z}^{\alpha-2} C(z) = C_2$ и внешним краевым условием: $C(z) \rightarrow C_\infty$, $z \rightarrow \infty$. Решение задачи (2) можно записать в терминах функции типа Миттаг-Леффлера:

$$C(z) = C_\infty \left[1 + (\lambda/D_\alpha)^{1-\alpha} z^{\alpha-1} E_{\alpha,\alpha}(\lambda z^\alpha/D_\alpha) - E_{\alpha,1}(\lambda z^\alpha/D_\alpha) \right]$$

Здесь d_{0z}^α – оператор Римана-Лиувилля производной дробного порядка α ($1 < \alpha < 2$), который действует по следующему правилу:

$$d_{0z}^\alpha C(z) = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \frac{d^2}{dz^2} \int_0^z \frac{C(\xi) d\xi}{(z-\xi)^{\alpha-1}}, \quad E_{\alpha,\beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)}$$

– специальная функция типа Миттаг-Леффлера, D_α – коэффициент дробной диффузии радона, м²/с, α – дробный показатель степенного распределения пор по размерам, связанный с фрактальной размерностью грунта. Как показали расчеты в работе авторов [10] решение задачи (2) полностью совпадает с классическим решением при $\alpha=2$ и описывает перенос радона в грунте с фрактальными свойствами, который происходит в режиме супердиффузии ($1 < \alpha < 2$). Этот режим характерен для пористого грунта и является промежуточным между классическим диффузионным переносом ($\alpha=2$) и адвективным переносом ($\alpha=1$), который наблюдается в трещинах.

Результаты обработки экспериментальных данных

Программа «РЭКСЭМ» была апробирована на трех пунктах мониторинга ОА Rn, расположенных в различных геолого-тектонических структурах Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона. Пункт «Левая Авача» (ЛВЧ) расположен в долине одноименной реки на речной террасе в элювиально-делювиальных отложениях в 200 м от русла реки. Регистрация ОА Rn осуществляется на глубинах один и два метра. Пункт «Голубая лагуна» (ГЛЛ) расположен в зоне Паратунского геотермального месторождения на речной террасе в элювиально-делювиальных отложениях долины реки Паратунка. Регистрация ОА Rn осуществляется на тех же глубинах зоны аэрации, что и в пункте ЛВЧ. Пункт «Институт» (ИНС) в г. Петропавловске - Камчатском создан на базе скважины НИС-1 глубиной 350 м и расположен вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. В этом пункте регистрация осуществляется на глубинах 0.1 и один метр от пола подземного бункера, расположенного над оголовком скважины НИС-1. С точки зрения геолого-тектонического положения, эта скважина расположена в пределах Петропавловского горста в районе погребенной депрессии, перекрытой толщей позднеплейстоценовых вулканогенных осадочных отложений. Скважина обсажена на всю глубину стальными трубами. Над оголовком скважины сооружен подземный бункер размером 2×2×2 м³, над которым на поверхности земли установлен металлический контейнер. Расположение пунктов приведено на рис. 1 [14]. Средние значения ППР и v для всех пунктов, вычисленные с помощью программы «РЭКСЭМ», приведены в таблице.

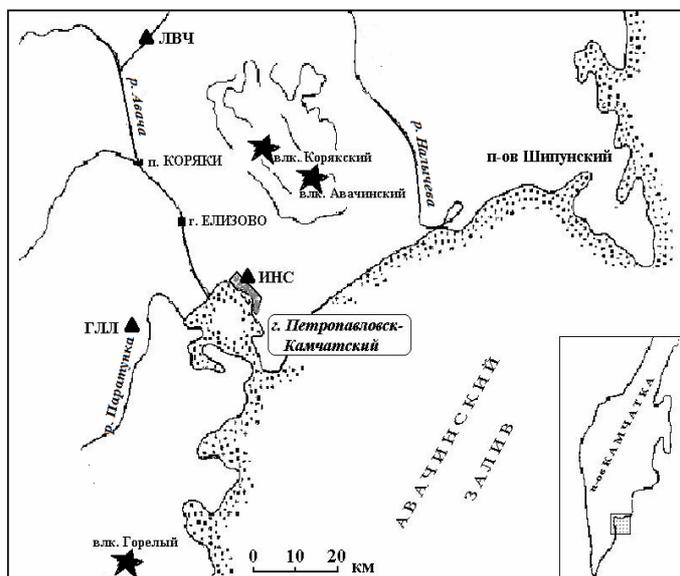


Рис.1. Схема расположения пунктов мониторинга почвенного радона на Петропавловск – Камчатском геодинамическом полигоне. Пункты отмечены треугольниками; ЛВЧ – «Левая Авача», ГЛЛ – «Голубая лагуна», ИНС – «Институт». На врезке показано расположение полигона на полуострове Камчатка.

В работе [5] рассмотрена динамика ОА Rn с 20 июля по 30 августа 2006 г. в пункте ИНС. Перед землетрясением с магнитудой $M = 6.2$, произошедшим 24 августа у берегов южной Камчатки на удалении 190 км от пункта ГЛЛ, наблюдается аномалия, характеризующаяся возрастанием значений ОА Rn на поверхности грунта не более 22% от фона.

В то же время расчетные значения ППР и v возрастают почти в полтора раза (ППР на 51%). Следует отметить, что используя суточные вариации атмосферного давления как зондирующий сигнал состояния грунта, был вычислен коэффициент проницаемости, который в этот период уменьшился почти в 4 раза от $2.7 \cdot 10^{-13}$ до $6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ [15]. Увеличение ППР при уменьшении коэффициента проницаемости свидетельствует в пользу того, что механизм массопереноса в рассматриваемый период не может быть описан в рамках классической диффузионно-конвективной модели [3]. Не исключено, что требуется рассматривать рыхлые отложения как пористую среду с фрактальными свойствами [10].

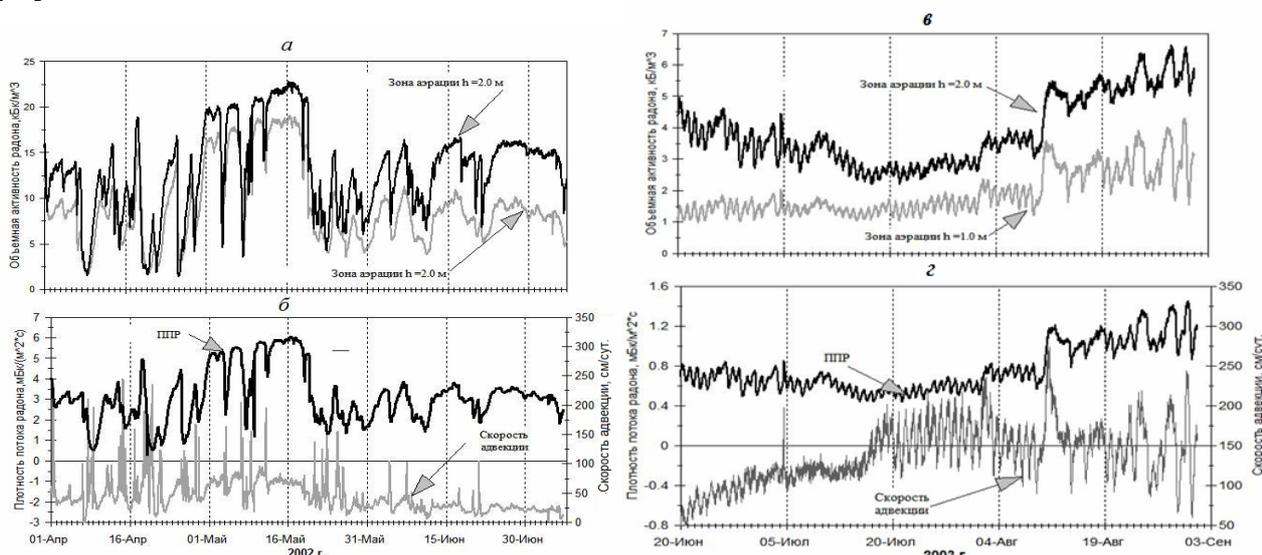


Рис. 2. *a* – динамика объемной активности радона в пункте ГЛЛ в зоне аэрации на глубинах 1 и 2 метра за период 01 апреля – 08 июля 2002 г.; *б* – вычисленные плотность потока радона и скорость адвекции; *в* – динамика объемной активности радона в пункте ЛВЧ в зоне аэрации на глубинах один и два метра за период 20 июня – 3 сентября 2006 г.; *г* – вычисленные плотность потока радона и скорость адвекции.

На рис. 2*a* приведена динамика ОА Rn в период с 1 апреля по 8 июля 2002 г. в пункте ЛВЧ. Для этого пункта характерно то, что при сравнительно небольших скоростях адвекции значения ППР несколько выше, чем на других пунктах. На рис. 2*в* приведена динамика ОА Rn в пункте ЛВЧ за период июнь – сентябрь 2003, охватывающий период летнего половодья реки. В связи с таянием снега в горных районах водосбора, в этот период наблюдается половодье с резким подъемом воды и формированием суточного хода уровня. Для этого периода характерно уменьшение среднего значения ОА Rn с 4 до 1.5 kBq/m^3 , и появление четко выраженного суточного хода с размахом амплитуды $\sim 0.5 \text{ kBq/m}^3$. После окончания половодья значения ОА Rn возрастают до прежних величин, и суточный ход пропадает. Рассчитанные ППР и v для рассматриваемого периода на пункте ЛВЧ приведены на рис. 3*г*. В период половодья значение ППР имеет минимальные значения $0.6 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а v увеличивается почти в два раза, до 150 см/сут . Подъем уровня воды в реке и, соответственно, грунтовых вод в долине, приводит к двум взаимосвязанным процессам: замещению газов порового пространства грунта водой («выдавливание») и к сокращению эманулирующего объема горных пород. Причем первый процесс увеличивает v , а второй ведет к уменьшению объема эманулирующего пространства и, соответственно, ППР.

Таблица. Характеристика пунктов регистрации и средние значения ППР и скорости адвекции.

Пункт регистрации	Особенности расположения пункта и характеристика рыхлых отложений	Физико-литолог. св-ва грунтов		Время регистрации	\bar{q}_m , $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$		\bar{v} , см/сутки	
		W%	N%		m	σ	m	σ
ЛВЧ	Терраса речной долины, 200 м от берега реки Левая Авача, элювиально-делювиальные отложения	10.7	42.0	20.06.–30.08. 2003 г.	0.77	0.23	137.7	36.94
ИНС	Вулканогенные отложения, вблизи ствола скважины глубиной 300 м.	37.4	43.9	20.07 – 30.08. 2006 г.	0.26	0.08	98.22	26.20
ГЛЛ	Долина р. Паратунка, элювиально-делювиальные отложения	43.5	42.8	01.04.– 30.06. 2002 г.	3.14	1.30	45.26	27.73

Примечание: W – естественная влажность, N – пористость %, m – математическое ожидание, σ – среднеквадратичное отклонение.

Наибольшее значение $\bar{q}_m = 3.14 \pm 1.3$ мБк·м⁻²·с⁻¹ наблюдается на пункте ГЛЛ при наименьшей скорости адвекции $\bar{v} = 45.26 \pm 27.73$ см/сутки. Повышенные значения плотности потока авторам связывают с процессами дегазации геотермального резервуара, который можно рассматривать как генератор различных газов. В то же время литологические свойства рыхлых отложений в этой точке имеют определенную специфику, при пористости 42% влажность рыхлых отложений для этого пункта самая высокая и составляет 38.7%. По-видимому, высокая влажность уменьшает скорость адвекции. Наибольшая скорость адвекции отмечается в пункте ЛВЧ $\bar{v} = 137.7 \pm 36.94$ см/сутки.

Следует отметить, что в Западной Сибири [16] ППР значительно выше ($q_m > 50$ мБк·м⁻²·с⁻¹), чем на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне, что объясняется более низким кларковым содержанием радия в породах полуострова Камчатка.

В работе [12] приведены экспериментальные данные по регистрации радона на глубинах 0.8, 5.5, 9 и 11.5 м, показанные на рис. 3а (кривая 1), где форма кривой распределения ОА Rn по глубине объясняется тем, что, возможно, имеется наличие источников Rn в среде на пути миграции, или существует нелинейная диффузия. Отдается предпочтение второму объяснению.

Строились кривые изменения значений поровой активности радона с глубиной согласно модели (2), при допущении распределенного источника содержания радия. Семейство кривых с различными значениями параметра α и значением $A_\infty = 2.5$ кБк/м³, близким к значению A_∞ для экспериментальных данных, показано на рис. 3а, где кривая, проведенная через экспериментальные точки [12], заключена между кривыми с параметром $\alpha = 1.5-2$. Наилучшее совпадение экспериментальной кривой с расчетными кривыми наблюдается при $\alpha = 1.6$. Вглубь среды линии перегруппировываются в обратный порядок, с уменьшением α расчетные кривые затягиваются (тяжелые хвосты), а это означает, что длина диффузии увеличивается, и Rn легче проникает через грунт.

На рис. 3б, приведено корреляционное поле между значениями поровой активности радона экспериментальной кривой и значениями расчетных кривых с $\alpha=2$ и $\alpha=1.6$, на котором видно, что экспериментальная кривая располагается ближе к кривой $\alpha=1.6$, по сравнению с кривой для обычной диффузии $\alpha=2$, что свидетельствует о фрактальных свойствах грунта. Приведенные данные подтверждают, что явление супердиффузии для переноса Rn в грунте имеет место в реальных условиях. С целью получения более достоверных экспериментальных данных необходимо в районе Южной Камчатки организовать регистрацию поровой ОА Rn в интервале глубин 0.1 – 10 м.

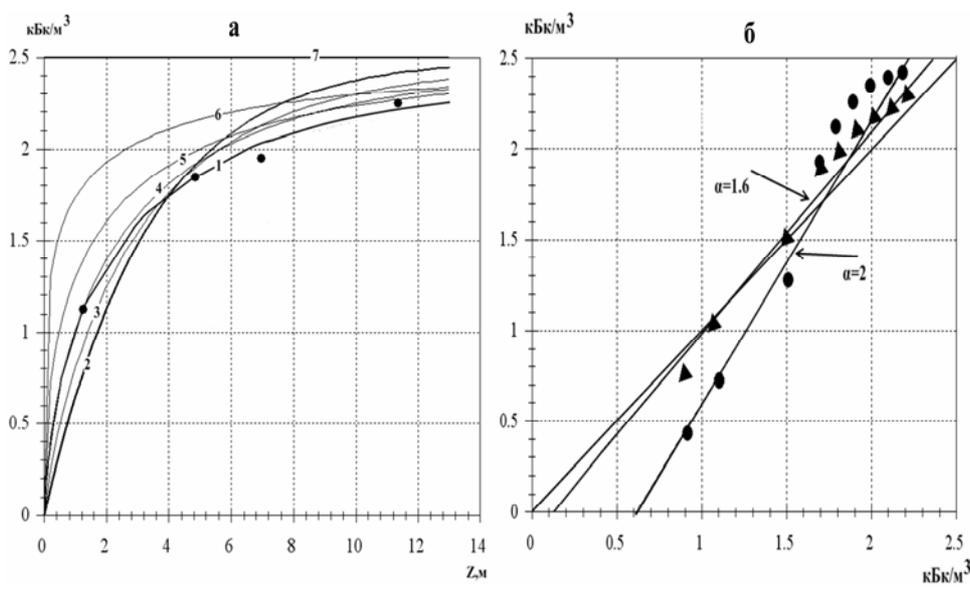


Рис. 3. Кривая распределения концентрации радона по глубине, проведенная через экспериментальные точки работы [12], и семейство расчетных кривых концентрации радона во фрактальной среде с $A_\infty = 2.5$ кБк/м³ в зависимости от параметра α (а): экспериментальная кривая (1), 2 (2), 1.8 (3), 1.6 (4), 1.4 (5), 1.2 (6), 1 (7). Корреляционное поле между значениями поровой активности радона экспериментальной кривой и значениями расчетных кривых с $\alpha=2$ и $\alpha=1.6$ (б).

Заключение

Предложенная методика позволяет вычислять ППР с поверхности в случае регистрации ОА Rn на разных глубинах зоны аэрации. Данный параметр характеризует процесс массопереноса радона в зависимости от физико-литологических свойств рыхлых отложений и скорости выделения эманаций в поровое пространство. Наибольшая скорость адвекции $\bar{v} = 137.7$ см/сутки характерна для пункта ЛВЧ, влажность рыхлых отложений для которого минимальна - 10.7%. Наибольшая плотность потока $\bar{q}_m = 3.14$ мБк·м⁻²·с⁻¹ наблюдается для пункта ГЛЛ, расположенного в районе геотермального

месторождения, в то время как на двух других пунктах ППР меньше в 5-10 раз. Случай увеличения значений ППР относительно фона на 51% перед сильным землетрясением с $M = 6.2$ позволяют рассматривать эту характеристику как наиболее чувствительную к изменениям напряженно-деформированного состояния геосреды.

Поэтому в дальнейшем планируется создать пакет прикладных программ, позволяющий в реальном времени отслеживать динамику ППР с целью выделения предвестников сильных землетрясений в районе южной Камчатки. Это повысит эффективность радонового метода для прогноза сильных землетрясений, а учет фрактальных свойств геосреды позволит в дальнейшем скорректировать оценки для ППР и скорости адвекции. Так как Rn оказывает влияние на электрические свойства приземной атмосферы, то представляет определенный интерес организация эксперимента по регистрации ОА Rn в системе грунт-атмосфера, что даст возможность проверить результаты модельных расчетов работы [11].

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

Список литературы

1. Граммаков А.Г. Эманационный (радоновый) метод поисков, исследования и разведки радиоактивных объектов. Тр. ЦНИГРИ, 1934. – Вып. 7. – 115 с.
2. Булашевич Ю.П., Хайритдинов Р.К. Диффузия эманации в пористых средах // Изв. АН СССР. Серия Геофизика. 1959. №12. С. 1787-1792.
3. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. М.: Недра, 1965. 750 с.
4. Паровик Р.И., Ильин И.А., Фирстов П.П. Обобщенная одномерная модель массопереноса радона ^{222}Rn и его эксхалация в приземный слой атмосферы // Математическое моделирование. 2007. №11. Т. 19. С.43-50.
5. Паровик Р.И. Методика расчета плотности потока радона (ОА ^{222}Rn) с поверхности Земли // Современные научные технологии для научных исследований: Материалы Всероссийской конференции, Магадан, 24–26 апреля 2008. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2008. – С. 194–195.
6. Паровик Р.И., Фирстов П.П. Методика регистрации радона (^{222}Rn) на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне // Труды первой региональной научно-технической конференции: Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России, Петропавловск-Камчатский, 11-17 ноября 2007. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. – С. 203–207.
7. Паровик Р.И., Фирстов П.П. Апробация новой методики расчета плотности потока радона с поверхности Земли (на примере Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона) // Аппаратура и новости радиационных измерений, 2009. №3. С. 52-57.
8. Паровик Р.И., Фирстов П.П. Алгоритм расчета плотности потока радона с поверхности Земли // Вестник ТГУ. Серия Математика и Механика. 2008. №3(4). С. 96–102.
9. Паровик Р.И. Свидетельство №50200701049. Программа обработки геофизических данных «РЭКСЭМ», 2007.
10. Паровик Р.И., Шевцов Б.М., Фирстов П.П. Модель переноса радона (^{222}Rn) в режиме супердиффузии во фрактальной среде // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. 2008. Т. 10. №2. С. 79-84.
11. Паровик Р.И., Шевцов Б.М. Моделирование процесса массопереноса радона (^{222}Rn) из фрактальной среды в атмосферу // Математическое моделирование, 2009. №8. Т.21. С. 30-36.
12. Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Особенности эманации радона ^{222}Rn с глубиной // ДАН. – 2008. – Т. 420. – № 6. – С. 825–828.
13. 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.
14. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П., Яковлева В.С. и др. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле - августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.
15. Фирстов П.П., Пономарев Е.А., Чернева Н.В. и др. К вопросу влияния баровариаций на поступления радона в атмосферу // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 6-53.
16. 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.