

УДК 550.468

ВАРИАЦИИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА НА СТАНЦИЯХ
ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА, ОБУСЛОВ-
ЛЕННЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

П.П. Фирстов, Р.Р. Курмашова, О.П. Малышева, О.П. Руленко

*Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-
Камчатский, 683006, e-mail: fristov@ksc.iks.ru*

Регистрация подпочвенного и растворенного в подземных водах радона (^{222}Rn) с целью прогноза сильных землетрясений имеет многолетнюю историю и освещена в ряде обзорных работ [7,9]. Основной трудностью в выделении предвестниковых аномалий в динамике подпочвенного Rn является влияние как текущих, так и сезонных метеорологических параметров. В 1997-2002 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне была создана сеть станций мониторинга подпочвенного радона с целью прогноза сильных землетрясений Авачинского залива [5,6]. Изучению зависимости динамики подпочвенного радона от метеорологических факторов посвящена данная работа.

Аппаратура и методика наблюдений. Для установки опорной станции Паратунка (ПРТ) была выбрана Паратунская геотермальная система, которая располагается в районе одноименного грабена с мозаично-блоковой структурой верхнего яруса земной коры. Расположение пункта регистрации в зоне грабена с блоковой структурой и хорошо развитой гид-

ротермальной системой должно было повысить геохимическую чувствительность выбранного пункта к геодеформационным процессам перед сильными землетрясениями на Камчатке и, особенно, перед землетрясениями в Авачинском заливе, что подтвердилось в дальнейшем. Станция Голубая Лагуна (ГЛЛ) также расположена в зоне Паратунского грабена, а станции Институт (ИНС) и Левая Авача (ЛВЧ) - в районе Петропавловского горста. Станция Налычево (НЛЧ) в районе Налычевского поднятия в районе геотермального месторождения. Станции располагаются в различных геологических и структурных элементах полигона, характеристика которых приведена в таблице 1.

На всех станциях регистрация подпочвенного радона с ноября 1999 ведется радиометрами, в которых используется пассивный (без пробоотбора) способ измерения β -излучения продуктов распада Rn газоразрядным счетчиком Гейгера (типа СТС6, СБМ19). Фирмой «Классик» радиометры «РЕВАР» изготавливаются двух модификаций - одноканальные и двухканальные. Продолжительность жизни газоразрядных счетчиков составляет 10^9 импульсов [2]. Счетчики устанавливались в заборных емкостях (оцинкованное ведро) объемом 10 литров, которые закапывались на глубину один или два метра. Схема установки счетчиков разработана В.П. Рудаковым [4] и показана на рис.1.

Таблица. Координаты станций регистрации Rn в подпочвенном газе Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона в 1999-2003 гг.

№	Название станции	Сокращение	Координаты		Способы регистрации		Краткая характеристика места расположения станции
			ϕ	λ	α -излучение радиометр РГА-01	β -излучение радиометр - РЕВАР	
1	Паратунка (опорная ст.)	ПРТ	52.90	158.26	с 1.11.97 до 29.12.2000	с 1.10.1999 г. до настоящего времени	Гидротермальная система, две разноглубинные точки
2	Голубая лагуна	ГЛЛ	52.99	158.23		с 25.02.2000 г. до настоящего времени	Гидротермальная система, две разноглубинные точки
3	Налычево	НЛЧ	53.50	158.70	с 1.01.98 г. по 15.07.98 г.		Гидротермальная система
4	Левая Авача	ЛВЧ	53.50	158.19		с 13.10.2000 г. до настоящего времени	Активный разлом, две разноглубинные точки
5	Институт	ИНС	53.07	158.61		с 1.02.2001 г. до настоящего времени	Отложения древних пирокластических потоков.

Радиометр «РЕВАР» позволяет организовать автономные долговременные наблюдения с длительностью интервала времени накопления (Δt) от 10 с до 99 часов с шагом 1 сек. Нами использовалось $\Delta t = 30$ минут. Автономность работы радиометра в таком режиме составляет два месяца. Накапливаемые данные сохраняются в сменном модуле энергонезависимого запоминающего устройства и затем переносятся в ПК через последовательный порт RS-232. Переход к размерности объемной активности (Bk/m^3) осуществлялся на основании эмпирических формул, полученных после одновременных измерений эталонным радиометром РРА-01-03М и «РЕВАР».

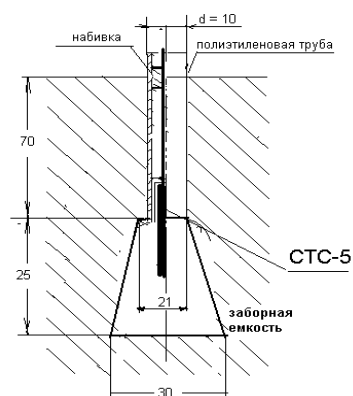


Рис. 1. Стандартная схема размещения газоразрядного счетчика для регистрации β -излучения продуктов распада радона (размеры даны в см.)

Опорная станция ПРТ располагается в узкой (300–400 м) долине ручья Коркина. В 700 м от станции ниже по течению ручья находятся естественные выходы гидротермальных вод. Точка 1 (т.1) - регистрация ведется одноканальным радиометром в бункере, который расположен на подрезанном склоне долины ручья Коркина и имеет двойные двери, что обеспечивает температурную стабилизацию. Точка 2 (т. 2) расположена в 25 м от т. 1 в подвале глубиной 2.5 м под жилым домом, вырытом в глинисто-аллювиальных отложениях речной долины. Газоразрядные счетчики помещались в заборные емкости (оцинкованное ведро) объемом 10 литров, которые закапывались на глубину один метр от поверхности.

На станции ГЛЛ, расположенной в пяти километрах от ПРТ, два счетчика располагаются в 4-х метрах от обсаженной скважины глубиной 700 м и уровнем термальной воды на 60 м ($T = 64^\circ \text{C}$) от поверхности. Счетчики двухканального радиометра располагаются по стандартной схеме на глубинах один и два метра в песчано-аллювиальных отложениях речной долины.

С целью расширения апертуры сети станций и сравнения отклика в динамике подпочвенного R_n на изменения напряженно-деформированного состояния среды геотермальных систем с районами разломных зон была организована станция Левая Авача (ЛВЧ), оснащенная таким же радиометром. Станция расположена на речной террасе в 100 м от русла реки. На глубине один и два метра от дневной поверхности в песчано-аллювиальных отложениях речной долины установлены две измерительные камеры. На обеих станциях концы полиэтиленовых труб, куда опускаются счетчики, закрыты досками, покрыты полиэтиленом и присыпаны 10-15 сантиметровым слоем грунта.

В районе здания Института вулканологии установлено три счетчика. ИНС1 - одноканальный радиометр, счетчик расположен в шпуре на дне подвального помещения здания Института вулканологии. ИНС2 и ИНС3 счетчики нагружены на двухканальный радиометр. ИНС2 - счетчик по стандартной схеме размещен на дне бункера глубиной 2.5 м, расположен-

ного над обсадной трубой скважины в 200 м от здания Института. ИНС3 - счетчик опущен в обсадную трубу скважины глубиной 350 м с уровнем воды на 60 м. На 15 м обсадная труба забита пробкой. Над бункером размещена металлическая будка. Будка и бункер имеют хорошую приточно-вытяжную вентиляцию.

Особенности сезонного хода на станциях сети. Как указывалось в работах [5,6], в районах геотермальных месторождений динамика подпочвенного радона в зоне аэрации имеет четко выраженную сезонность, которая обусловлена уменьшением проницаемости гелиотермозоны рыхлых отложений за счет ее промерзания. На рис. 2 приведены ряды наблюдений на всех станциях, усредненные по 6 точкам (3 часа), и метеопараметры (нижний график). Для станции ПРТ (т.1) и ГЛЛ (т.2, глубина 2.0 м) видно, что после понижения температуры воздуха ниже нуля (начало ноября) начинается падение значений объемной активности радона (ОА Rn), достигающее в декабре-январе минимальных значений. На станции ГЛЛ из-за близости прогретой зоны скважины этот эффект проявляется меньше. Для ЛВЧ в зимнее время регистрируется максимальное значение ОА Rn – 6 кБк/м³. Зимний максимум в сезонном ходе подпочвенного радона отмечается и в работах [3,8]. В динамике ОА Rn т. ИНС1 и т. ИНС2 сезонность проявляется слабо, хотя в зимнее время значения ОА Rn выше летних. Особенно четко она выражена в т. ИНС3, при плюсовых значениях температуры воздуха ОА Rn в стволе скважины возрастает почти в 3 раза. На всех точках, за исключением ИНС1, хорошо проявляется весенний максимум (конец апреля-май), связанный с подъемом уровня грунтовых вод.

Асинхронное поведение сезонного хода ОА Rn (рис. 2) на станциях, расположенных в зоне гидротермальной системы (ПРТ, ГЛЛ) и в разломной зоне (ЛВЧ), дают основание предполагать, что на первых двух станциях реализуется случай переноса подпочвенного радона в рыхлых отложениях от горизонта гидротермальных вод.

В осенне-зимний период промерзание гелиотермозоны приводит к увеличению ОА Rn в зоне насыщения (т. 2) и к ее уменьшению в зоне аэрации (т. 1) за счет уменьшения конвективной составляющей. Станция ЛВЧ расположена в пункте, где перенос подпочвенного радона осуществляется в рыхлых отложениях с распределенными параметрами. Поэтому в случае промерзания гелиотермозоны сток радона в атмосферу уменьшается, и в зоне аэрации происходит изменение его равновесного состояния в сторону увеличения ОА Rn.

Следует отметить большую зависимость динамики ОА Rn в точках ИНС1 и ИНС2 от ветра (рис. 2), которая проявляется в резком уменьшении значений ОА Rn за счет эффекта «пульверизатора», возникающего в зданиях при сильном ветре. После прекращения ветра происходит экспоненциальное восстановление ОА Rn до прежних значений.

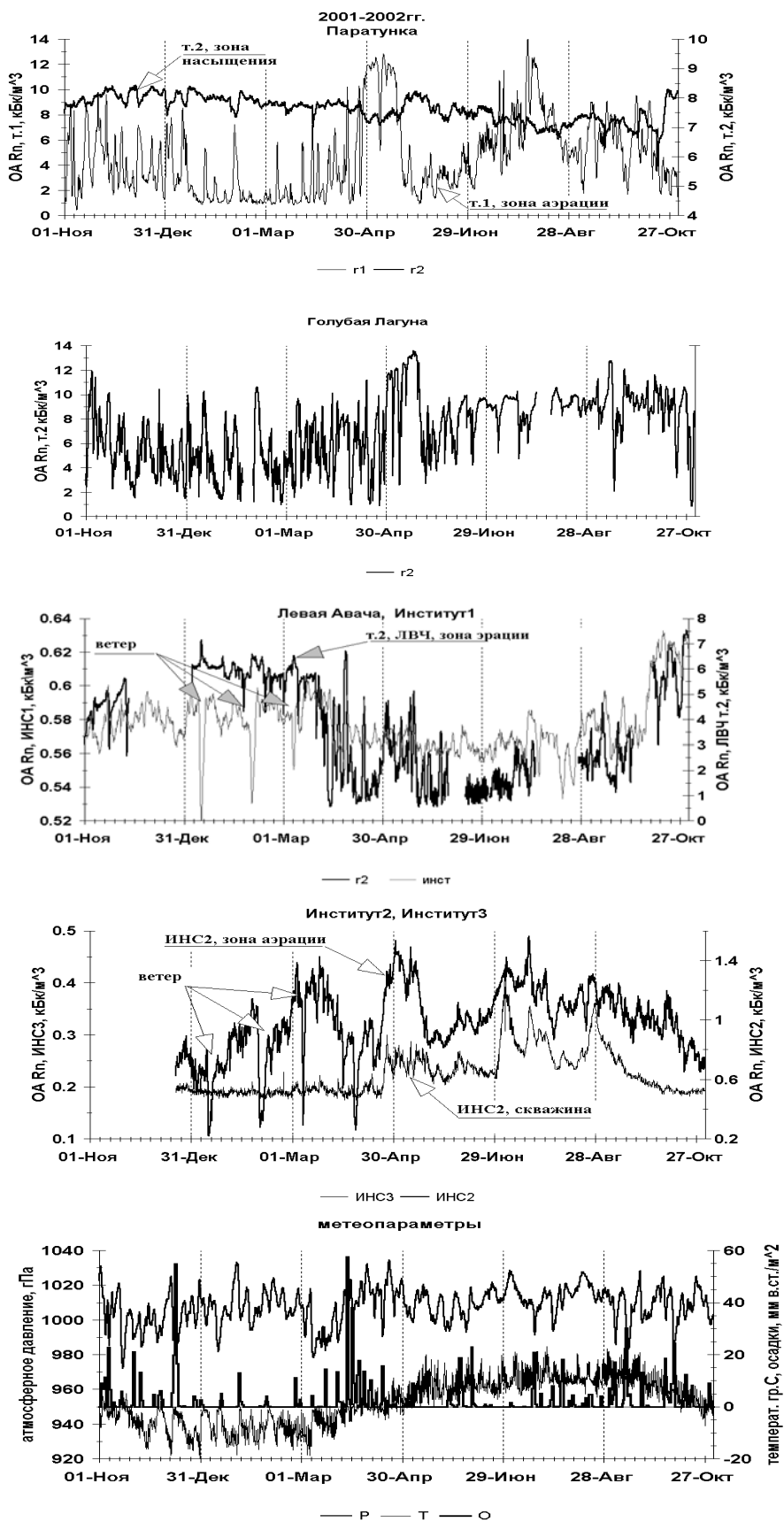


Рис. 2 Динамика объемной активности радона с 1.11.2001г. по 1.11.2002 г. на станциях сети Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона и значения метеопараметров.

Определение коэффициента диффузии. С целью сравнения физико-геологических условий регистрации радона на станциях ГЛЛ и ЛВЧ рассчитывался коэффициент диффузии (D) по методике, приведенной в работе [2]. Эта методика работает при равномерном распределении Ra в породах и базируется на измерениях концентрации Rn на разных глубинах:

$$N_1 - N_2 = N_1 e^{bh_2} - N_2 e^{bh_1},$$

где: N_1 и N_2 - концентрации радона на глубинах h_1 и h_2 ; $b = \sqrt{\frac{\lambda}{D}}$. Рыхлые алювиально-делювиальные образования обычно характеризуются кажущимся коэффициентом диффузии ($D^* = D/\eta$) порядка 0.002÷0.01 см²/сек [2].

Вычисленное значение D^* в обоих пунктах (ЛВЧ, ГЛЛ) варьировало от 0.02 до 0.06 см²/сек, что объясняется сильной конвективной составляющей и большой пористостью η рыхлых отложений Камчатки.

Эволюция амплитудной частотной передаточной функции содержания подпочвенного радона на вариации атмосферного давления. Влияние баровариаций на динамику подпочвенного радона известно со времен возникновения эманационной съемки с целью поиска радиоактивных руд [2]. Как было показано в работе [6], на станции ПРТ в зоне аэрации и на станции ГЛЛ наблюдается резкое возрастание концентрации Rn при падении атмосферного давления, что указывает на хорошо выраженную конвективную составляющую в массопереносе радона. Другая форма отклика концентрации Rn на уменьшение атмосферного давления на станции ЛВЧ. Отклик начинается с резкого уменьшения концентрации Rn с последующим экспоненциальным возвратом до прежнего уровня («клевок»). Такая форма отклика, по-видимому, свидетельствует о том, что конвективная составляющая массопереноса Rn к дневной поверхности для этой станции очень мала, и после резкого «высасывания» подпочвенного воздуха идет экспоненциальное восстановление концентрации Rn до прежнего уровня за счет диффузионной составляющей.

За период с 28.10.99 г. по 8.01.03 г. была сделана оценка изменчивости амплитудной частотной передаточной функции между ОА Rn и баровариациями по методике А.А Любушина (мл) [1] для т.1 (зона аэрации) станции ПРТ. Исходные ряды усреднялись по 6 точкам (3 часа) и приводились к рядам в приращениях. Затем вычислялась последовательность оценок параметров модели связи между скалярными временными рядами (при этом в качестве выходного использовался ряд значений подпочвенного радона, а в качестве входного - вариации атмосферного давления), которая и использовалась для построения частотно-временной картины эволюции передаточной функции. На основании расчетов нескольких вариантов был выбран наиболее наглядный вариант с окном 240 точек (30 суток) и его сдви-

гом на $\frac{1}{4}$. Результаты вычислений для частот 0.1-0.5 цикл/сутки представлены в виде изолиний на рис. 3.б. На рис. 3.а показан сезонный ход температуры воздуха. Треугольниками нанесены наиболее сильные землетрясения Авачинского залива, произошедшие за этот период: 3 июня 2000 г., $M = 5.7$, $R = 136$; 8 октября 2001 г., $M = 6.5$, $R = 145$; 16 октября 2002 г., $M = 6.0$, $R = 140$.

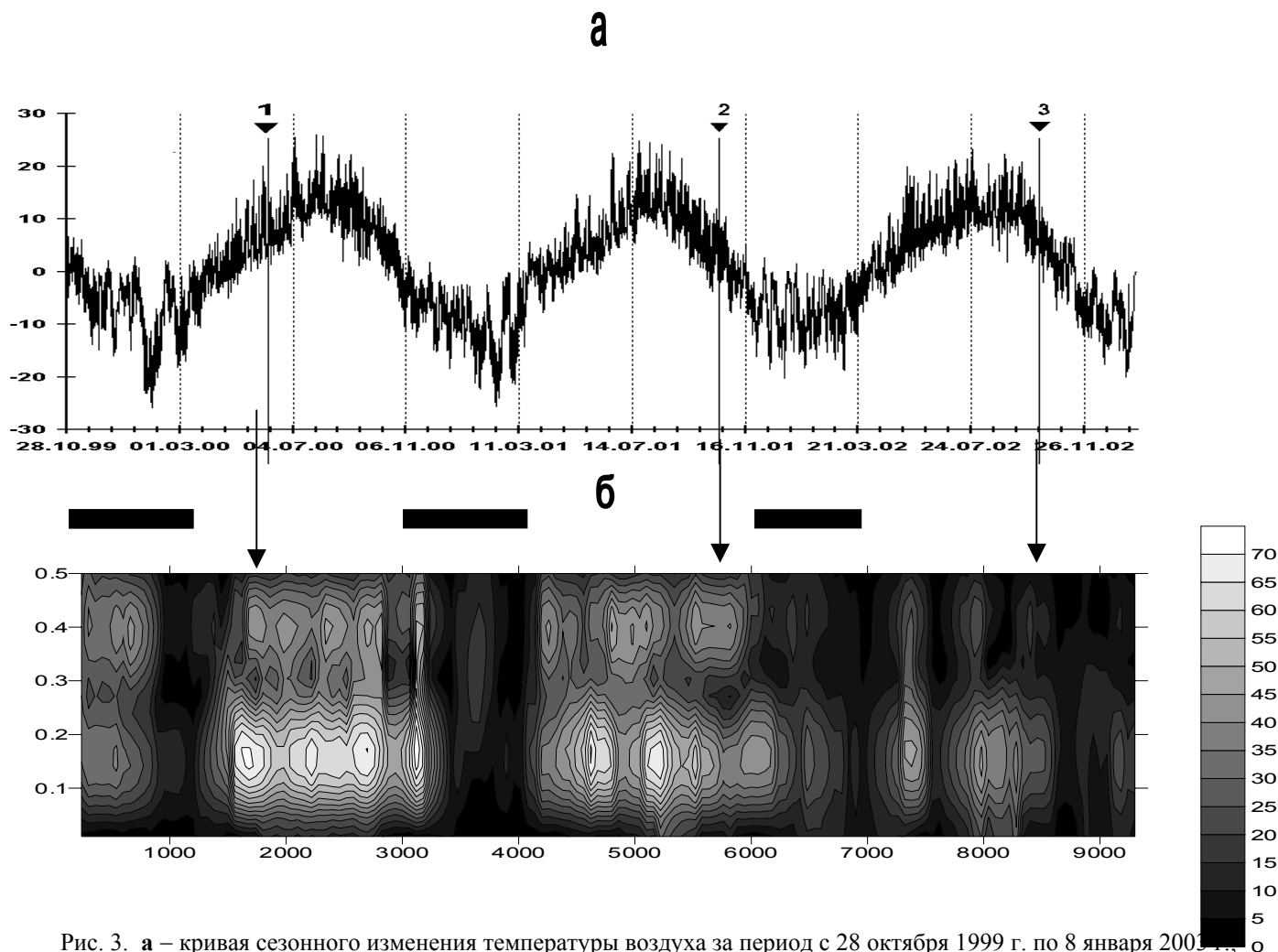


Рис. 3. а – кривая сезонного изменения температуры воздуха за период с 28 октября 1999 г. по 8 января 2003 г., б – частотно-временная картина эволюции передаточной функции содержания подпочвенного радона на вариации атмосферного давления за тот же период времени.

На рис. 3 четко видна сезонная зависимость отклика ОА Rn на баровариации. В зимнее время отклик минимален, но как только температура воздуха принимает плюсовые значения, амплитуда передаточной функции возрастает. Перед землетрясениями наблюдается некоторое уменьшение значений передаточной функции на частотах 0,3-0,5 цикл/сутки, что указывает на влияние изменения напряженно-деформированного состояния горных пород перед землетрясением на проницаемость рыхлых отложений, что подтверждает информативность подпочвенного радона как предиктора сильных землетрясений.

Выводы. Показано влияние метеорологических факторов на динамику подпочвенного радона на станциях мониторинга подпочвенного радона Петропавловск-Камчатского гео-

динамического полигона, которое зависит от геолого-тектонических условий выбранного пункта, глубины и условий размещения газоразрядных счетчиков.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 02-05-64467.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любушин А.А. (мл), Лежнев М.Ю. Анализ изменчивости функции отклика уровня подземных вод на баровариации на Южных Курилах (о. Шикотан) // Физика Земли. 1995. № 8. С. 79-84.
2. Новиков Г. Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. М.: Недра, 1965. 750 с.
3. Рудаков В.П. К вопросу о природе сезонных вариаций подпочвенного радона // Геохимия. 1985. № 7. С. 1055-1058.
4. Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ // Автореф. дис. ... доктора физико-математических наук. М.: ОИ ИФЗ, 1992. 56 с.
5. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской гидротермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33-43.
6. 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. 33-43.
7. Dubinchuk V.T. Radon as a precursor of earthquakes. // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P. 6-22.
8. Klusman R.W., Webster J.D. Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crystal gas emission relevant to earthquake prediction // Bul. Seismol. Soc. Of America. 1981. V. 71. N 1. P. 211-222.
9. King C.-Y. Gas-geochemical approaches to earthquake prediction // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P. 22-36.