

УДК 550.3

ИЗМЕРЕНИЕ РАДОНА НА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Ю. Д. Кузьмин¹, В. Ф. Воропаев¹, А. А. Максимов², А. А. Котляров³,
А. А. Афонин³

¹*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН*

²*ПКФ «Росэнергоатомпроект», Москва*

³*Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва*

Аннотация. Любые термоградиентные системы характеризуются тепломассо-переносом. Конвективная часть тепломассопереноса сопровождается переносом флюидов, составной частью которых является газы, в том числе и радон. Целью работ проводимых на ПКН «Карымшина» является регистрация подпочвенной и глубинной, выносимой термальной водой из напорной скважины, составляющих радона гидротермальной системы, а также приборное и методическое обеспечение данных наблюдений.

THE MEASURING OF RADON BY HYDROTHERMAL SYSTEMS

Y. D. Kuzmin¹, V. F. Voropaev¹, A. A. Maksimov², A. A. Kotlyarov³, A. A. Afonin³

¹ *Kamchatkan Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS*

² *Rosenergoatomproekt, Moscow*

³ *Moscow Engineering Physics Institute (State University), Moscow*

Abstract. Ever thermogradient systems are characterized by heat and mass emission. The convict part of heat and mass emission is accompanied by transfer of fluids. One of the part of fluid are gases as else radon. Registration of subsoil and deep water are carried out by thermal water from pressure hole, the radon's parts of hydrothermal systems are the object of researches are carried out by PKN "Karamishin". Also made providing of devices and methods of the researches.

Введение

Горные породы, слагающие различные оболочки Земли, находятся в напряженном состоянии под действием внешних и внутренних сил. При этом распределение напряжений зависит не только от действующих сил, но и от степени неоднородности, трещиноватости и газоводонасыщенности массивов пород. Трещины, любого ранга, заполненные газо-водными флюидами, служат каналами для их миграции, а, следовательно, для более интенсивного тепломассопереноса в среде. Изменение напряженного состояния породы вызывает ее деформацию, что приводит, в свою очередь, не только к изменению физических свойств (упругих, прочностных, электромагнитных, магнитных и др.) среды, но и к раскрытию или закрытию трещин. В результате чего будет

изменяться площадь свободной поверхности горных пород. При нарушении сплошности горных пород возникают акустические колебания в широком диапазоне частот, начиная с ультразвуковых. Эти колебания вызывают флуктуации в десорбционных и миграционных процессах [1]. Следствием этих процессов будет изменение параметров газообразных и водных флюидов: потока, состава, температуры, химической активности взаимодействия флюид-порода и т.п. Указанные параметры поддаются регистрации измерительными средствами. Основными требованиями к измерительной аппаратуре являются: надежная детектируемость исследуемого компонента газового флюида; воспроизводимость измерений; малая зависимость результатов от изменений параметров окружающей среды и надежная работа регистрирующей аппаратуры в непрерывном режиме. Все вышесказанное относится и к радоновым измерениям, которые используются в качестве краткосрочного предвестника землетрясений. Работы по использованию радона в качестве предвестника землетрясений проводились многими исследователями. Результаты этих работ хорошо отражены в таких обзорах, как [3, 4, 5].

Для организации наблюдений, за изменениями подпочвенной и глубинной составляющих радона, была выбрана Верхне-Паратунская гидротермальная система. Любая гидротермальная система является активной геологической средой, которая может рассматриваться в качестве природного объемного деформографа, способного реагировать на любые внешние воздействия, аккумулируя и преобразуя эти воздействия (механические, электромагнитные, тепловые и другие) в геохимический отклик, в данном случае, в изменения эсхалиции радона. В геолого-структурном плане Верхне-Паратунская гидротермальная система относится к вулcano-купольным структурам и расположена в зоне пересечения двух сложно построенных депрессионных структур, Паратунского и Карымшинского грабенов, образованных блоковыми подвижками в четвертичное время. Основной контроль очагов разгрузки термальных вод – структурно-тектонический. Разрывная тектоника представлена многообразными разломами, различными по величине, знаку и амплитудам перемещения, что создает сложную блоковую структуру коренных пород. В региональном плане Верхне-Паратунская система приурочена к пересечению Паратунско-Асачинской меридиональной раздвиговой зоны Вилючинским линеаментом, а также широтными разломами разного ранга. Верхне-Паратунская система расположена в пределах 8 бальной зоны сейсмического районирования. (11). Таким образом, выполняются все требования, предъявляемые для корректной постановки геохимических наблюдений [4].

Как отмечается в [6], ограниченная информативность радона, обусловленная его незначительным периодом полураспада (3.82 дня) в известной степени может рассматриваться как положительный фактор. Аномальные концентрации радона в призабойной части скважины являются проявлением повышенной тектонической активности только в текущий момент, что позволяет рассматривать радон как весьма ценный показатель проявления новейшей тектонической активности. Необходимо также отметить, что растворимость радона в воде уменьшается при увеличении температуры и минерализации воды, а количество связанных и свободных изотопов радона, а также скорость распространения последних от места образования определяется процессами эманации, диффузии и конвективного переноса [7]. Величина выхода радона и характер ее изменения определяется геологическим строением района, в котором расположен пункт регистрации. Одновременная регистрация подпочвенной и глубинной составляющих эсхалиции радона гидротермальной системы позволит провести корреляции между ними, а наблюдения за глубинной составляющей радона позволит расширить наши знания о поведении радона в труднодоступных и малоизученных толщах пород гидротермальной системы.

Исследование глубинного радона осуществляется с помощью глубокой термальной скважины К-88. Скважина К-88 для данного участка Верхне-Паратунской геотермальной системы (Карымшинское месторождение термальных вод) является аномальной и имеет параметры:

- глубина 805 м,
- температура на забое 105 °С,
- рН=8,
- основной растворенный газ – азот (98%),
- минерализация –1,1 г/л,
- пьезометрический уровень –98 м,
- дебит –24 м³/с.

Вода из скважины по трубам подается на ПКН «Карымшина», где на геохимическом пункте происходит барботирование (перевод растворенных газов в свободное состояние при $T=82$ °С), отбор и анализ радона и торона из потока термальной воды. Зная время прохождения термальной воды от перфорированного участка скважины К-88 до места измерения, можно с достаточной точностью, определить время реакции пласта ГТС на внешние воздействия (изменения теплового потока, атмосферного давления, электромагнитные воздействия и т.д.).

Одновременно на данном пункте проводится комплекс геофизических и метеорологических наблюдений, что позволяет проводить корреляции изменений эсхалиции радона с изменяющимися параметрами окружающей среды.

Для регистрации радона в приповерхностных условиях используется открытая скважина глубиной 4 м, обсаженная перфорированной пластиковой трубой. Скважина находится в будке, т.е. защищена от прямого воздействия дождя и снега. Устье скважины открыто, поток воздуха свободно циркулирует по перфорированной трубе скважины.

Требования к измерителям радона

Воздух из четырехметровой скважины и из барботера, в котором происходит перевод растворенных газов из термальной воды в свободные, подается через фильтр-осушитель (CaCl_2) в измерительные ячейки радиометров. Следует отметить, что фильтр-осушитель, через который происходит подача воздуха из барботера, из-за высокой влажности, требует частых замен осушителя, что является определенным неудобством при работе в полевых условиях.

Конкретными требованиями к приборному обеспечению измерений радона в данных наблюдениях являются:

- возможность продолжительных автономных измерений (общая продолжительность до нескольких месяцев с периодом измерений около часа);
- полная автоматизация и сохранение результатов измерений в электронном виде;
- возможность работы в жестких климатических условиях (влажность воздуха до 90% при температуре до 30 °С);
- чувствительность, достаточная для надежного измерения активности радона.

Доступным типом приборов, удовлетворяющим данным требованиям, являются радиометры радона с электростатическим осаждением (ЭО) заряженных дочерних продуктов распада (ДПР) на полупроводниковый детектор α -частиц [8], что и предопределило их выбор для измерений в составе комплекса аппаратуры пункта комплексных наблюдений. Содержание радона в объеме блока детектирования определяется по количеству событий, зарегистрированных детектором в результате α -распада ДПР радона, собирающихся на чувствительной поверхности детектора. В литературе отмечается, что эффективность регистрации методом ЭО может зависеть от влажности и наличия микропримесей в воздухе [9]. Однако, достоинства метода (высокая чувствительность, экспрессность, селективность по отношению к радону, относительная простота конструкции приборов, отсутствие сменных частей) делают его незаменимым как для непрерывного мониторинга радона.

Исходя из вышесказанного, выбор оптимальных параметров конструкции радиометров должен быть основан как на обеспечении необходимой чувствительности, так на минимизации погрешности в заданных условиях измерений.

Определение параметров датчиков для регистрации радона

Режим измерений диктуется скоростью изменения радоновой обстановки. Предварительные измерения показали, что оптимальным является время измерений 40 минут. Наблюдаемые уровни объемной активности (ОА) радона составляют обычно от 400 до $30 \cdot 10^3$ Бк/м³.

Критерием оптимизации радиометра для геофизических измерений была выбрана минимизация погрешности измерений и возможность уверенного контроля ОА радона от значения 400 Бк/м³ и выше. Относительная погрешность определения ОА радона складывается из статистической ошибки, погрешности $\delta\varepsilon$, связанной с изменением влажности воздуха в отобранных пробах, и систематической погрешности, обусловленной ошибкой при поверке $\delta C_{\text{пов}}$ (погрешностью эталонного радиометра):

$$\delta C^{\text{Rn}} = \sqrt{\delta C_{\text{стат}}^2 + \delta\varepsilon^2 + \delta C_{\text{пов}}^2}.$$

Примеси воздуха, в том числе влажность, оказывают нейтрализующее влияние на ионы ДПР [10], что уменьшает вероятность сбора ионов и обуславливает дополнительную погрешность $\delta\varepsilon$.

С использованием модели нейтрализации ионов ДПР в воздухе при наличии электрического поля, описанной в [10], была создана специальная расчетная методика для определения эффективности ЭО при любой заданной геометрии собирающего электрода и разной влажности воздуха. Методика основана на расчете поля в измерительной камере и расчете траектории движения ионов ДПР, с использованием зависимостей скорости нейтрализации, полученных в экспериментах [10].

Расчетным путем были определены зависимости эффективности ЭО и погрешности $\delta\varepsilon$ от чувствительного объема V . Была принята цилиндрическая геометрия камеры, с соотношением радиуса к высоте, равном (2/3), и оптимальным креплением ППД. При определении $\delta\varepsilon$ предполагалось изменение климатических условий в следующих пределах:

- температура окружающей среды 20 ± 5 °С,

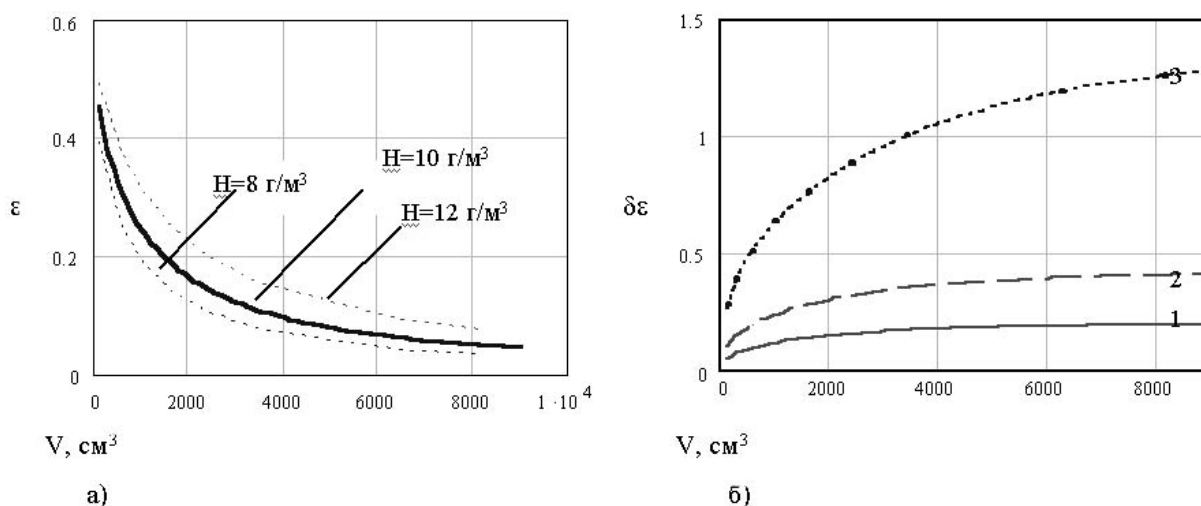


Рис. 1. (а) Зависимость ε от объема камеры (при $H=8, 10, 12$ г/м³). Расчетные значения; (б) Зависимость $\delta\varepsilon$ от объема камеры. $\delta\varepsilon$ соответствует изменению влажности воздуха в диапазоне: 1 – $H=(10 \pm 1)$ г/м³, 2 – $H=(10 \pm 2)$ г/м³, 3 – $H=(10 \pm 5)$ г/м³. Расчетные значения.

Fig. 1. (a) Dependence ε on chamber's volume ($H=8, 10, 12$ g/m³). Calculation; (b) Dependence $\delta\varepsilon$ on chamber's volume $\delta\varepsilon$ is change of air's humidity in diapason: 1 – $H=(10 \pm 1)$ г/м³, 2 – $H=(10 \pm 2)$ г/м³, 3 – $H=(10 \pm 5)$ г/м³. Calculation.

· относительная влажность 60 ± 20 %, что соответствует диапазону абсолютной влажности примерно от 5 до 18 г/м³. $\delta\varepsilon$ определялось как приращение ε при изменении значения влажности H , равного 10 г/м³, на значение погрешности измерений влажности.

На рисунке 1 показана зависимость ε и $\delta\varepsilon$ от чувствительного объема камеры.

Расчеты (рис. 1) показывают, что эффективность ЭО снижается с ростом объема, а относительная погрешность измерений возрастает, что объясняется увеличением пути доставки иона ДПР и времени его осаждения на детектор. Для устранения этого эффекта в радиометрах с электроосаждением необходим либо контроль влажности и температуры специальными датчиками, с введением соответствующей поправки показаний радиометра, зависящей от влажности, либо специальная подготовка воздушной пробы радона перед поступлением в измерительную камеру (поддержание заданной абсолютной влажности).

Для получения значения оптимального объема выполнен расчет зависимости относительной погрешности измерений при $C^{Rn}=400$ Бк/м³ и $T=40$ мин. На рис. 2 показан вклад различных источников погрешности измерений в суммарную погрешность при неконтролируемом изменении влажности и при контроле датчиком с введением соответствующей поправки.

Относительная погрешность измерений (рис. 2) с ростом V сначала снижается, что обусловлено увеличением чувствительности и, соответственно, снижением статистической погрешности. Затем она начинает возрастать, из-за большего влияния влажности воздуха на эффективность ЭО при большем объеме (см. рис. 1).

В случае отсутствия поправки на влажность и при условии, что влажность может меняться в диапазоне от 5 до 15 г/м³ (рис. 2б), оптимальный объем камеры с учетом ожидаемых уровней ОА радона должен составлять около 80 см³. При наличии средств

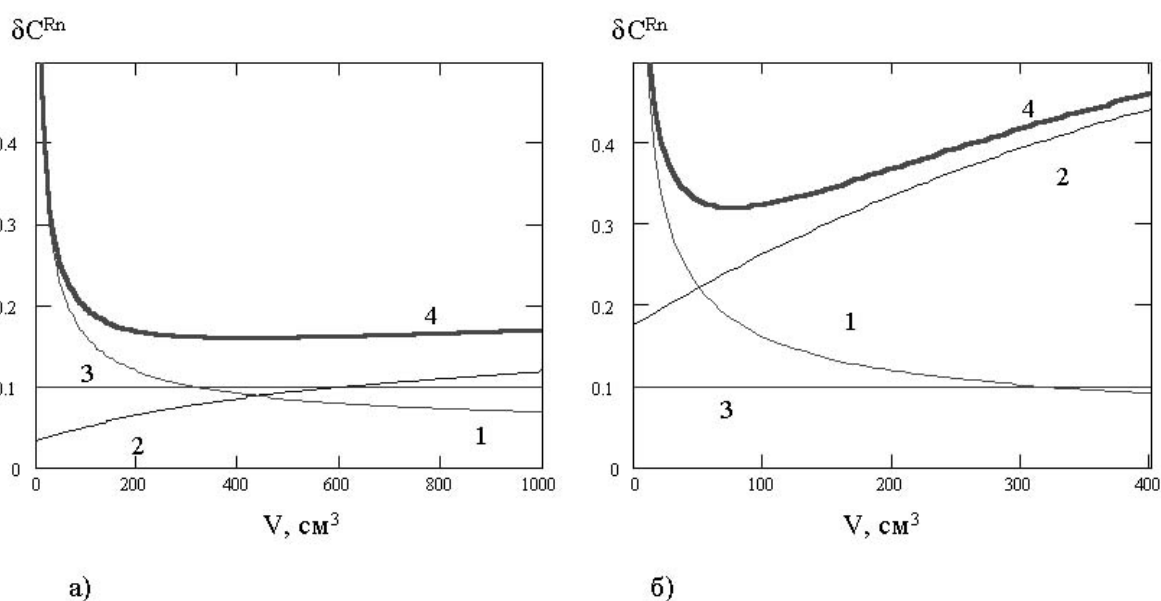


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерений ОА радона от чувствительного объема камеры радиометра при геофизических измерениях ($C^{Rn}=400$ Бк/м³, $T=40$ мин):

1 - статистическая погрешность; 2 - изменение, обусловленное влажностью воздуха (а) - при контроле влажности с точностью 1 г/м³, (б) - при отсутствии контроля влажности; 3 - погрешность поверки (систематическая); 4 - суммарная погрешность.

Fig. 2. Dependence relative error of measuring of radon OA on apprehensible volume of radiometer's chamber by geophysics measuring ($C^{Rn}=400$ Bk/m³, $T=40$ min):

1 - statistic error; 2 - change by air's humidity (a) - control of humidity to within 1 g/m³, (б) - without control of humidity; 3 - error of verification (systematic); 4 - total error.

контроля влажности (рис. 2а) относительная погрешность измерений минимальна при V около 400 см^3 и далее с увеличением V возрастает слабо.

Результаты наблюдений за радоном на ПКН «Карымшина»

Фрагмент данных измерений ОА радона в потоке воздуха из 4 м скважины показан на Рис 3. Скважина сухая. Температура в скважине в течение 1 года на глубине 4 м изменяется от 9.5 C до 11 C . Пробоотбор осуществляется с глубины 1 м.

Для проверки влияния влажности на измерения, с входа радиометра, который регистрирует эсхалицию радона из проточной термальной воды, был удален, а затем

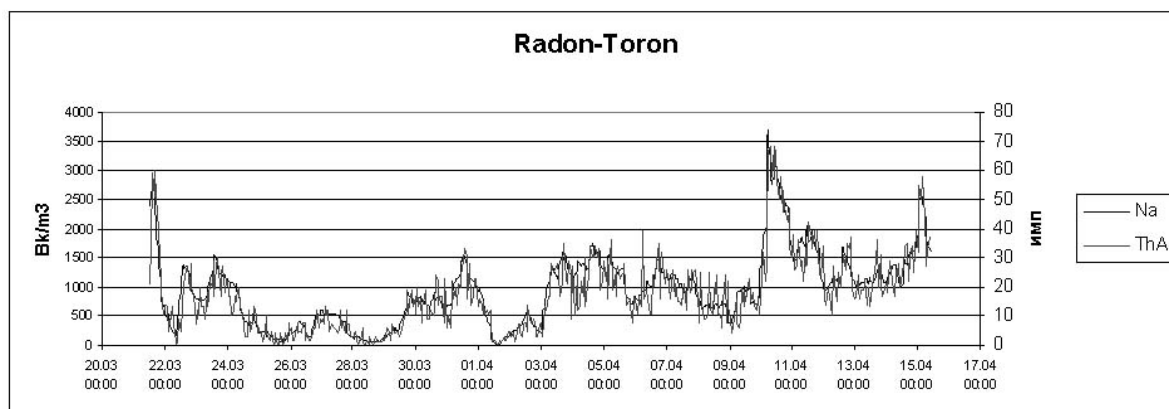


Рис. 3. Фрагмент записи изменения эсхалиции подпочвенного радона из скважины глубиной 4 м. Na – изменение ОА радона в $\text{Bq}/\text{м}^3$, ThA – изменение активности торона, в импульсах.

Fig. 3. The record's fragment of change of isolation of subsoil radon by 4 m hole. Na – change of OA radon, $\text{Bq}/\text{м}^3$, ThA – change of activity of thoron, imp.

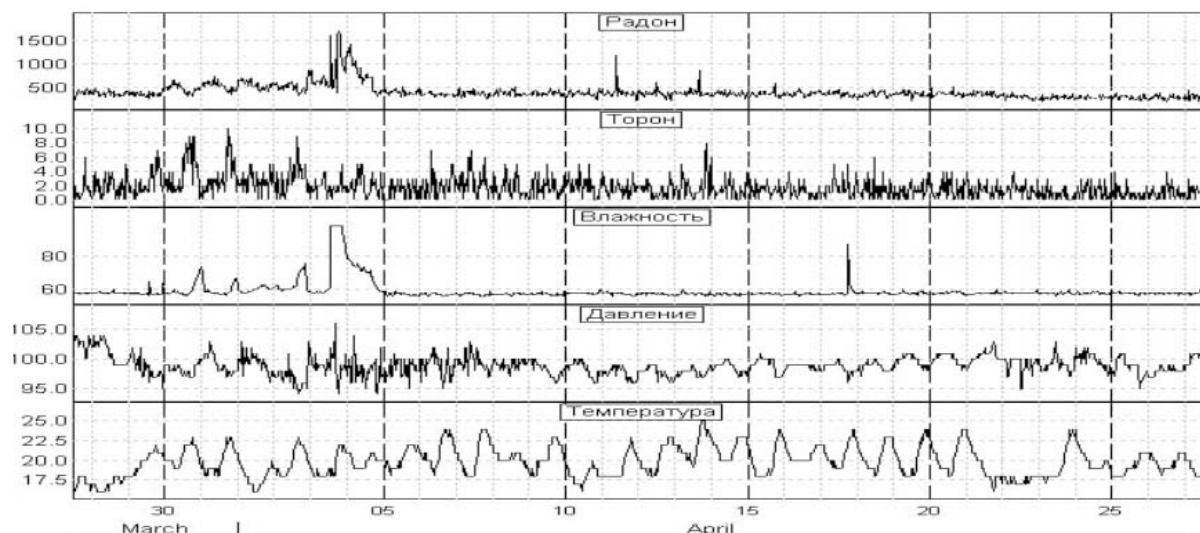


Рис. 4. Измерения радона в потоке термальной воды из скважины К-88 в 2004 г.

1 канал – изменение ОА радона, $\text{Bq}/\text{м}^3$; 2 канал – изменение активности торона, в имп. 3,4,5 – каналы, изменение параметров климатической ячейки радиометра; 3 канал - изменение влажности, в %; 4 – канал, изменение давления, МПа; 5 канал – изменение температуры, в $^{\circ}\text{C}$.

Fig. 4. Measuring of radon in the stream of thermal water out of hole K-88 in 2004 year. 1 channel – change of OA radon, $\text{Bq}/\text{м}^3$; 2-channel – change of activity of thoron, imp. 3,4,5 – channels, change of parameters of radiometer's climatic cell; 3 channel - change of humidity, %; 4 – channel, change of pressure, МПа; 5 канал – change of temperature, $^{\circ}\text{C}$.

поставлен, поглощающий влагу фильтр с CaCl_2 (рис. 4). Радиометр снабжен климатической камерой, которая позволяет контролировать влажность, давление и температуру анализируемого воздуха в измерительной камере.

С 29 марта был снят фильтр CaCl_2 , 4 апреля 2004 года установлен снова. Из рисунка 4 видно, что влага, присутствующая в измеряемой пробе существенно влияет на результаты наблюдений.

Выводы

Датчик радона, для контроля эсхалации подпочвенной и глубинной составляющих радона, должен включать в себя камеру объемом не менее 400 см^3 с датчиком влажности, при этом относительная погрешность измерений ОА радона не будет превышать 20%; либо (при отсутствии контроля влажности) камеру объемом 80 см^3 , при этом погрешность составляет не менее 35%; либо обязательной установки фильтра из CaCl_2 , в качестве осушителя влаги из анализируемого воздуха.

Для установления корреляции между ОА радона и изменениями геофизической обстановки необходим анализ большой массы данных измерений, который будет проведен в будущем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-05-64237а).

Литература

1. Афонин А.А., Котляров А.А., Максимов А.Ю. Установка для изучения процессов нейтрализации радиоактивных ионов в воздухе // Приборы и техника эксперимента. 2003. Т. 46. № 1. С. 119-122.
2. Войтов Г.И. Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически активной Средней Азии. Физика Земли. 1998. № 1. С. 27-38.
3. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург.: УрО РАН, 1997. 232 с.
4. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений. В и С. 1981. № 6. С. 74–104.
5. Киссин И.Г. О вероятном механизме вибрационных эффектов и о вибросчувствительности насыщенных сред. Проблемы нелинейной сейсмологии. М.: Наука, 1987. С. 210-221.
6. Сердюкова А.С., Капитанов Ю.Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1963. 312 с.
7. Смирнова Н.Ф. и др. Сводный отчет о результатах поисково - разведочных работ на Верхне - Паратунском месторождении термальных вод, проведенных в 1966 – 1980 гг. с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 17 мая 1980г. КГТУ. 1980.
8. Тыминский В.Г. О роли радиогидрохимических показателей при изучении тектонической активности региона. Геохимия. 1971. № 1. С. 107–110.
9. Яковлев Л.У., Боровский Л.В. Взаимное влияние гидродинамических, химических и термических процессов в земной коре. Геохимия. 1994. № 8 – 9. С. 1227–1238.
10. Dubinchuk V.T. «Isotopic and geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruptions», Proceedings of an Advisory Group Meeting Held in Vienna, 9 – 12 September 1991, International Atomic Energy Agency (IAEA), November 1993. IAEA TECDOC – 726.
11. Takeuchi Y. et al. Development of high sensitivity radon detectors // Nucl. Instr. Meth. 1999. A 421, pp. 334-341.