ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭМАНАЦИЙ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА В ПЕРИОД АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ В АВГУСТЕ 2006 г.

INVESTIGATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF UNDERGROUND RADON EMANATIONS DURING SEISMIC ACTIVATION IN KAMCHATKA IN AUGUST 2006

П.П. Фирстов^{1,2}, Е.А. Пономарев^{1,3}, Н.В. Чернева¹, Р.И. Паровик¹

¹Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, ²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, ³Институт солнечно-земной физики СО РАН

We considered the reaction of underground radon field on weak seismisity activation in Kamchatka in August 2006, when three earthquakes with the energy class K > 13 (M > 5.8) took place in the North-Eastern part of Kurilo-Kamchatskaya arc within the period August 17-24 after two-month calm. Seismisity activation was preceded by the increase of underground gas mass transfer in friable deposits at all observation sites of underground radon monitoring station network. Radon flow density at "Institute" site increased by 30 % with simultaneous decrease of permeability index of friable deposit part by 4 times ($6 \times 10^{-14} - 2.7 \times 10^{-13}$ m²) in the area of registration site, which testifies reconstruction of the local stress field and compressive deformation prevalence.



Исследования подпочвенного радона и радона, растворенного в подземных водах, с целью поисков предвестников сильных землетрясений ведутся, начиная с 60^х годов прошлого столетия. Перспективность этого метода показана в обзорных работах [1, 4, 10].

В районе Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона в 1997 - 2001 г.г. была создана сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона, расположение которых в 2006 г. показано на рис.1 [6, 7]. Опорный пункт районе находится в Паратунской геотермальной системы (ПРТ) в долине ручья Коркино, а остальные пункты располагаются в различных геоструктурных элементах полигона.

Рис.1. Схема расположения пунктов мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. ПРТ – Паратунка, ИНС – Институт, НЛЧ – Налычево.

Особенностью применяемой методики является регистрация подпочвенного Rn в двух разноглубоких точках (один и два метра) зоны аэрации. В опорном пункте ПРТ регистрация осуществляется как в зоне аэрации (один метр от поверхности Земли - т. 1), так и вблизи зоны полного влагонасыщения (З метра – т. 2). Пункты оснащены современными автономными (до двух месяцев) радиометрами "PEBAP", в которых в качестве датчиков используются газоразрядные счетчики β–излучения продуктов распада радона типа СТС6, с накоплением данных на твердотельную память и последующим их выводом на компьютер. Кроме того, на двух станциях Паратунка (ПРТ) и Институт (ИНС) регистрируется концентрация радона с поверхности грунта, а также атмосферное

давление и температура. Частота дискретизации всех наблюдаемых параметров в пункте ПРТ, Налычево (НЛЧ) составляет 2.0 час⁻¹.

Пункт ИНС на базе скважины НИС-1 (глубина 350 м) располагается рядом со зданием Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Скважина расположена в пределах Петропавловского горста в районе погребенной депрессии, перекрытой толщей позднеплейстоценовых вулканогенных осадочных отложений. Скважина обсажена на всю глубину стальными трубами, а в интервале 265-295 м установлен щелевой фильтр. Вода гидрокарбонатная, натриево-кальциевая.



Рис. 2. Схема размещения датчиков в скважине НИС-1: I – газоразрядные счетчики β –излучения; II – датчики температуры; III – датчики давления; IV – датчик углекислого газа.

В настоящее время на глубине 16 м в стволе скважины находится техногенная «пробка». Над оголовком скважины сооружен подземный бункер размером 2×2×2 м³, над которым на поверхности земли установлен металлический контейнер. Подземный бункер через контейнер и систему труб вентилируется за счет естественной конвекции воздуха (рис. 2). С

целью изучения особенностей массопереноса радона в подземном бункере установлено четыре газоразрядных счетчика. Датчики в подземном бункере НИС-1 размещены следующим образом (рис. 2): 1) в стволе скважины на глубине 2.5 м от края оголовка; 2) в зоне аэрации на глубине одного метра от пола; 3) в накопительной емкости, установленной на полу; 4) в воздухе подземного бункера.

Кроме того, в ствол скважины на глубину один метр опущен датчик для регистрации концентрации углекислого газа. В наземном контейнере установлены датчик температуры и датчик атмосферного давления, а в подземном бункере три датчика температуры и датчик давления. Регистрация всех параметров осуществляется с помощью двух измерительных приборов ALMEMO 2390-8 и ALMEMO 2590-9 с частотой дискретизации 6.0 час⁻¹.

По оперативным данным Камчатского филиала Геофизической службы РАН после двухмесячного сейсмического затишья 17 и 20 июля 2006 года у берегов Камчатки произошло два землетрясения с локальной магнитудой M = 5.9 и M = 5.8. Очаги этих землетрясений располагались на севере (55.54° с.ш.) и на юге (49.6° с.ш.) полуострова Камчатка, на удалении около 390 км от пункта регистрации. В районе южной Камчатки (51.19° с.ш.) 24 августа на удалении 190 км от пункта ПРТ произошло самое сильное землетрясение с $M_L = 6.2$, а 1-2 сентября прошла серия землетрясений на юге Кроноцкого и в Авачинском заливах. Эпицентр самого сильного толчка с магнитудой M = 5.6 располагался в 110 км от пункта регистрации. Оживление сейсмичности на всей протяженности северного фланга Курило-Камчатской островной дуги дает основание предполагать увеличение скорости движения Тихоокеанской плиты, что могло привести к перестройке регионального поля напряжений.

Рассмотрим соотношения кинематических и динамических параметров концентрации Rn в подпочвенном воздухе на пунктах сети радонового мониторинга за этот период. На рис. 3 показана динамика объемной активности Rn (OA Rn) на станциях НЛЧ, ПРТ, ИНС, расположение которых показано на рис. 1. Как видно на рис.3 с 12 по 24 августа наблюдается хорошо выраженная аномалия в концентрациях CO_2 и Rn в пункте ИНС, которая слабо прослеживается и в пунктах НЛЧ и ПРТ.



С целью выделения аномалии в пунктах нлч и прт был построен агрегированный сигнал по методике [2]. на рис. 4 в агрегированном сигнале данная аномалия хорошо выделяется.

Рис. 3. Динамика OA Rn на пунктах регистрации подпочвенного Rn в августе 2006 г.

Длительность аномалии составляет около 12 суток, причем появление ee на станциях прт и инс происходит позже почти на сутки позже станции относительно нлч. расположенной на 30 км ближе к выходу сейсмофокального слоя на дневную поверхность, что косвенно указывает на направление процесса. ответственного за аномалии в поле Rn.

Как видно на рис. 5a в подземном бункере регистрируются четко выраженные суточные колебания атмосферного давления с амплитудой около 10 гПа. Причем максимум в суточных колебаниях составляющих геогаза приходится на окрестности максимума скорости изменения атмосферного давления (рис. 5b). Эти суточные колебания обусловлены особенностями конструкции наблюдательного пункта. Нагрев металлического контейнера над бункером днем и его охлаждение ночью с перепадом температуры до 15° С создает суточные колебания давления за счет конвекционных потоков. Суточные колебания давления для данного пункта можно рассматривать как зондирующий сигнал, а эволюция отклика концентрации Rn на эти колебания может служить характеристикой состояния геосреды в данной точке.

Если рассматривать рыхлые отложения как пористую одномерную среду, заполненную подпочвенным воздухом (геогазом), то скорость потока подпочвенного воздуха подчиняется закону Дарси [4]:

$$V = -K/\mathbf{m} \times \partial P/\partial z, \qquad (1)$$

где: K – коэффициент проницаемости рыхлых отложений, μ – динамическая вязкость воздуха, $\P P / \partial z$ – градиент давления в подпочвенном воздухе, при условии $\partial P \ll P_0$, где P_0

 атмосферное давление на дневной поверхности.

Рис. 4. Агрегированный сигнал, построенный по данным пунктов ПРТ и НЛЧ (4 канала).

466



перейти Если теперь только к одной составляющей радону и принять геогаза – допущение, что изолинии равной концентрации Rn В грунте квазипостоянны, то получается, атмосферного что вариации давления играют роль насоса, все время «подкачивающего» Rn в атмосферу ИЗ зоны аэрации мощностью *h*.

Глубина этой зоны составит ~ U τ , где U – скорость подпочвенного воздуха, τ постоянная времени распада Амплитуда вариации радона. плотности радона на глубине z в $exp(-k_0z)$ раз меньше, чем на атмосферой, границе с и отличается по фазе от вариации атмосферного давления.

Рис.5. *а* – температура и атмосферное

давление в наземном контейнере и подземном бункере; *б* – скорость изменения атмосферного давления и концентрация CO₂; *в* – отфильтрованные кривые концентрации радона (ПФ 0.03 – 0.05 цикл/час) в пункте ИНС (зона аэрации и поверхность), сдвиг для максимума корреляции между этими кривыми в пятисуточных интервалах и плотность потока радона.

Причем вариации плотности радона вызваны не разбавлением радона атмосферным воздухом, а запаздывающим по фазе возмущением давления геогаза, вызванным изменением давления на входе в пористую среду. Очевидно, сдвиг фазы зависит, при прочих равных условиях, от глубины установки датчика. По сдвигу фаз между сигналами разнесенных по глубине датчиков можно оценить величину коэффициента Дарси для данного грунта.

Покажем, что этот сдвиг по времени контролируется величиной коэффициента *К*, полагая, что кривые концентраций Rn на разных глубинах находятся в одинаковой фазе:

$$wt_1 - k_0 z_1 = wt_2 - k_0 z_2$$
получим $k_0 = w(t_2 - t_1)/(z_2 - z_1)$. Поскольку $k_0 = (w/2D)^{1/2} = (w/KC^2)^{1/2}$ то:
 $K = (v/wc^2)[(z_2 - z_1)/(t_2 - t_1)]^2$. (2)

Здесь z_1 и z_2 - глубина заложения датчиков, $t_2 - t_1 = Dt - фазовый сдвиг в суточном ходе кривых концентрации радона.$

С целью исследования корреляционных зависимостей концентрации Rn в зоне аэрации и на поверхности была осуществлена фильтрация полосовым фильтром с граничными частотами $f_{12p}=0.03$ и $f_{22p}=0.05$ цикл/час, что позволило выделить суточную гармонику (рис.5*в*, верхние кривые). Поиск максимума коэффициента корреляции проводился для пятисуточных интервалов и относился к концу интервала. Как видно на рис. 5, значение сдвига максимума корреляции заключено в пределах 80-180 мин. По формуле (1) вычислялся коэффициент Дарси, который заключен в пределах $6 \times 10^{-14} - 2.7 \times 10^{-13} \, m^2$, причем как видно на рис. 4 наименьшее значение коэффициента Дарси приходится на период активизации сейсмичности.

В работе [8], на основании численных расчетов с использованием диффузионноконвективного уравнения переноса радона показано, что величина плотности потока радона (ППР) с поверхности земли более чувствительна к изменению напряженнодеформированного состояния геосреды чем величина объемной активности радона (OA Rn) в подпочвенном воздухе, что проиллюстрировано на основании данных, полученных на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне [7].

Классическая теория рассматривает массоперенос радона в рыхлых отложениях как некий установившийся диффузионно-конвективный процесс, который описывается следующим уравнением [3]:

$$h\frac{dRn}{dt} = D\frac{d^2Rn}{dx^2} + vh\frac{dRn}{dx} - hRnI + Q \quad ; \tag{3}$$

где Rn – концентрация радона в единице объема порового пространства, Ku/см³; h - пористость горной породы; D – коэффициент диффузии, см²/с; l - постоянная распада эманаций, с⁻¹; v – скорость конвективного переноса, см/с; $Q = \frac{a \cdot Ra \cdot r \cdot l}{h}$ скорость выделения эманаций в поровое пространство в единице объема среды, Ku·c/cm³; Ra – количество радия в породе, г; r - плотность породы, г/см³; a – коэффициент эманирования.

Краевыми условиями уравнения (3) будут:

1.
$$z = 0, N(0, t) = 0$$

2. $t = 0, N(z, 0) = N_{\infty}$
3. $z \to -\infty, N(z, t) = N_{\infty}$
(4)

Здесь $N_{\infty} = \frac{Q}{lh}$ - фоновая концентрация радона в точке регистрации. Точное

решение уравнения (3) с краевыми условиями (4) может быть получено операционным методом (интегральным преобразованием Лапласа).

Для вычисления плотности потока на поверхности методом приближенного соответствия между точными и измеренными концентрациями радона применен алгоритм, который основывается на теореме Дюамеля и использует принцип суперпозиции решения. Концентрация в точке z в момент времени t_M определяется вкладом отдельных компонент, на каждую из которых воздействует соответствующая

постоянная единичная плотность потока вида:



 $q(t) = \begin{cases} 0, t < 0\\ 1, t > 0 \end{cases}.$

Рис.6. Аппроксимация плотности q(t) потока радона постоянными элементами.

Плотность потока на поверхности аппроксимируется ступенчатой единичной плотностью (рис. 6). На интервалах времени

 $I_{\frac{1}{2}}, I_{\frac{3}{2}}, ..., I_{M-\frac{1}{2}}$, используются значения плотности потока в моменты времени: от 0 до I_1 ,

от I_1 до I_2 , от I_{M-1} до t_M , которые обозначим $q_1, q_2, ..., q_M$, тогда решение реализуется в виде суперпозиции элементарных блоков модельной задачи (1) для соответствующих интервалов времени.

Используя выше описанный подход, была рассчитана плотность потока Rn с поверхности на основании измерений OA Rn на поверхности и в зоне аэрации (рис. 4*e*, нижняя кривая). В период сейсмической активизации ППР возросла в 1.6 раза с 0.25 до 0.4 мБк/м³.

В целом анализ динамических и кинематических параметров концентрации радона на сети пунктов в августе 2006 г. позволяет говорить, что в период с12 по 24 августа перед землетрясением с М = 6.2 наблюдается сжатие горных пород, что приводит к увеличению плотности потока с поверхности и уменьшению коэффициента проницаемости в рыхлых отложениях. Изложенная методика обработки данных регистрации концентрации радона на двух уровнях позволяет осуществлять мониторинг за изменением напряженнодеформированного состояния геосреды на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.

Список литературы

- 1. Войтов Г.И. Мониторинг атмосферного радона в подпочвах сейсмически активных регионов Центральной Азии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 27-38.
- 2. Любушин А.А.(Мл) Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103-108.
- 3. Новиков Г. Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. Недра: М. 1965. 750 с.
- 4. Рудаков В.П. Геодинамические процессы и их предвестники в вариациях полей радиоактивных эманаций// Геохимия. 2002. № 1. С. 56-62.
- 5. Теркот Д., Шуберт Д. Геодинамика. Геологическое приложение физики сплошных сред. Т.2. М.: Мир, 1985. 730 с.
- 6. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (²²²Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33-43.
- 7. 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.
- 8. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П., Яковлева В.С., Исаев А.В., Малышева О.П. О связи динамики подпочвенного радона (²²²Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.
- 9. 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.
- 10. King C.-Y. Gas-geochemical approaches to earthquake prediction // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P.22-36.