

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ БАРОВАРИАЦИЙ НА ПОСТУПЛЕНИЯ РАДОНА В АТМОСФЕРУ

© 2007 г. П. П. Фирстов², Е. А. Пономарев³, Н. В. Чернева¹,
А. В. Бузевич², О. П. Малышева²

¹Институт космofизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
пос. Паратунка, Камчатская обл., 684034

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 66403

Поступила в редакцию 24.11.2006 г.

Исследуется модель воздействия вариаций атмосферного давления на сток радона в атмосферу из рыхлых отложений, которые рассматриваются как пористая среда с газодинамическими свойствами, описываемыми законом Дарси. Показано, что модельные результаты удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, полученным на сети пунктов мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск – Камчатском геодинамическом полигоне в 1997–2006 гг. Разработана и апробирована методика оценки коэффициента Дарси на основании экспериментальных данных мониторинга за концентрацией радона в рыхлых отложениях на разных глубинах.

ВВЕДЕНИЕ

В подпочвенном воздухе находится смесь воздуха с геогазом, в котором, наряду с такими газами, как H_2 , CO_2 , CH_4 , He и др., содержится радон (^{222}Rn) – естественный ионизатор приземного слоя воздуха. Вариации объемной активности радона (ОА Rn) изменяют электрические характеристики приземной атмосферы, которые могут быть оперативными предвестниками (время упреждения – сутки и менее) сильных землетрясений Камчатки [6, 7]. Поэтому большой интерес представляет информация обо всех факторах, влияющих на сток Rn в атмосферу. Возможные механизмы массопереноса геогаза подробно даны в обзорной работе [12]. В данной статье делается упор на изучение влияния вариаций атмосферного давления на эксхалляцию радона из рыхлых отложений.

Влияние атмосферного давления на динамику подпочвенного Rn отмечалось в первых работах по эманационной съемке, которая получила широкое распространение в 1950-х годах XX столетия с целью поиска месторождений радиоактивных руд. Этому вопросу посвящено достаточно много работ [1, 2, 5, 13], в которых дано объяснение причины влияния вариаций атмосферного давления на эксхалляцию радона из рыхлых однородных отложений. Причем процесс массопереноса газов в рыхлых отложениях описывается “уравнением газовой атаки”, в котором фигурирует как диффузионный член, так и конвективный (адвективный) член, соответствующий свободному течению. В пористой среде (размер пор в которой много меньше характерного размера

самой среды), в качестве которой нами принимаются элювиально-делювиальные отложения, характерные для пунктов радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне, свободного течения нет. Градиенту давления в такой среде пропорционально не ускорение, как при свободном течении, а скорость. Вклад силы тяжести тоже мал, так как длина волны возмущения в пористой среде много меньше высоты однородной атмосферы. В данной работе сделана попытка уточнения физической сущности этой связи и ее описание, при рассмотрении элювиально-делювиальных отложений в качестве пористой среды. Можно учитывать влияние баровариаций на основе статистического анализа [4], как это сделано в работе [10], однако имеет смысл рассмотреть и схему, основанную на физической причинно-следственной связи, что может быть полезным для мониторинга подпочвенного радона с целью прогноза сильных землетрясений Камчатки.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЙ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сеть пунктов наблюдений за динамикой радона в подпочвенном воздухе расположена на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. Аппаратура и методика наблюдений достаточно подробно описана в [10, 11]. Почти во всех пунктах наблюдения газоразрядные счетчики β -излучения установлены на двух глубинах – один и два метра, что позволяет следить за динамикой

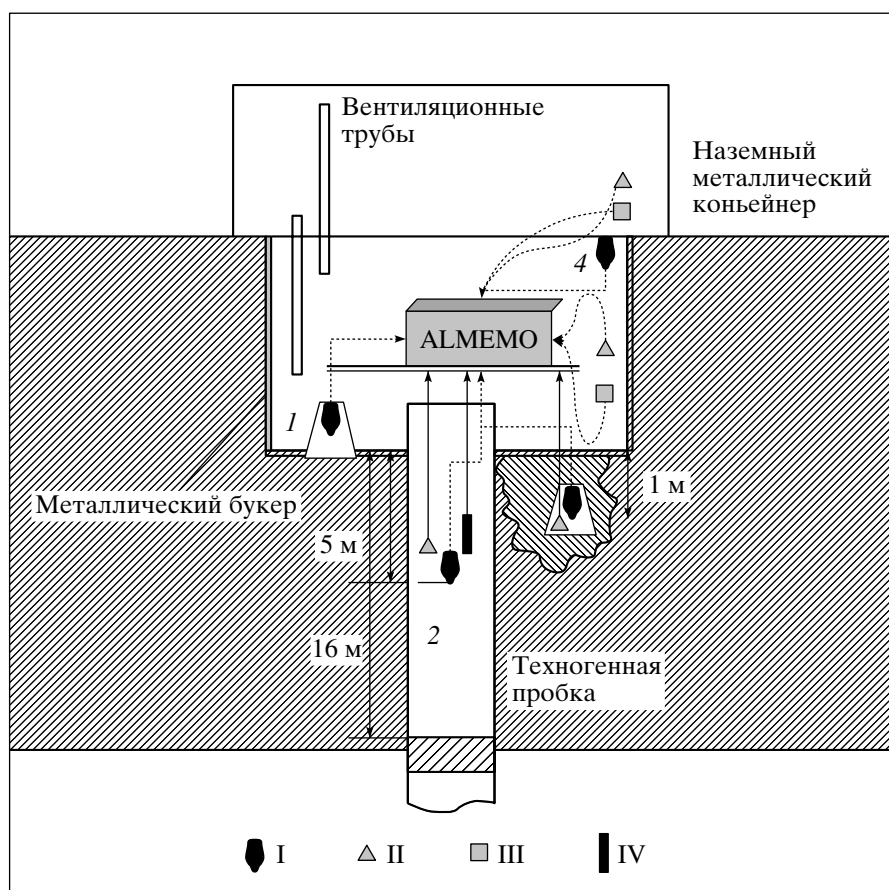


Рис. 1. Схема размещения датчиков в скважине НИС-1: I – газоразрядные счетчики β -излучения; II – датчики температуры; III – датчики давления; IV – датчик углекислого газа.

кинематических и динамических параметров концентрации R_n в почвенном воздухе на разных глубинах и сопоставлять их с баровариациями. 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 составляет 2.0 час^{-1} .

Особый интерес, с точки зрения влияния баровариаций на эксхалацию радона из рыхлых отложений, представляет пункт наблюдений ИНС на базе скважины НИС-1, располагающийся рядом со зданием Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. С точки зрения геолого-тектонического положения, эта скважина (глубина 350 м) расположена в пределах Петропавловского горста в районе погребенной депрессии, перекрытой толщей позднеплейстоценовых вулканогенных осадочных отложений. В интервале 0–180 м скважиной вскрыты отложения от направленного взрыва вулкана Авача, а в интервале 180–330 м – морские валунно-галечниковые отложения. Скважина обсажена на всю глубину стальными труба-

ми, а в интервале 265–295 м установлен щелевой фильтр. Вода гидрокарбонатная, натриево-кальциевая. Уровень воды в скважине в период с декабря 1979 г. по июнь 1993 г., когда проводились уровневые наблюдения, колебался, в зависимости от сезона, в пределах 51.0 – 52.5 м (устное сообщение Ю.М. Хаткевича).

В настоящее время на глубине 16 м в стволе скважины находится техногенная “пробка”. Над оголовком скважины сооружен подземный бункер размером $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$, над которым на поверхности земли установлен металлический контейнер. Подземный бункер через контейнер и систему труб вентилируется за счет естественной конвекции воздуха (рис. 1). Строительство данного сооружения было выполнено под руководством В.А. Гаврилова и О.П. Руленко.

С целью изучения особенностей массопереноса радона в подземном бункере установлено четыре газоразрядных счетчика. Схема размещения датчиков в скважине НИС-1 приведена на рис. 1:

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 АЛМЕМО 2390-8 и АЛМЕМО 2590-9 с частотой дискретизации 6.0 час⁻¹.

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СТОК РАДОНА В АТМОСФЕРУ

Рассмотрим рыхлые отложения как пористую одномерную среду, заполненную подпочвенным воздухом (геогазом), скорость потока подпочвенного воздуха в которой подчиняется закону Дарси [3, 8]:

$$V = -K/\mu \times \partial P/\partial z, \quad (1)$$

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

Из уравнения непрерывности следует, что скорость изменения числа молекул подпочвенного воздуха (n), определяется уравнением:

$$\partial n/\partial t = -n_0 \operatorname{div} V. \quad (2)$$

Здесь n – плотность молекул воздуха в рыхлых отложениях, которая равна $n = p/C^2 M$, где C – скорость звука в атмосфере, M – средняя молекулярная масса подпочвенного воздуха, n_0 – плотность числа молекул воздуха при нормальном давлении. Обозначим через D величину $Kc^2 Mn_0/\mu = Kc^2/\nu$, где $\nu = \mu/Mn_0$ – кинематическая вязкость. Тогда уравнение (1) можно записать так:

$$n_0 V = -D \partial n/\partial z. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим уравнение одномерной диффузии с коэффициентом диффузии D :

$$\partial n/\partial t = D \partial^2 n/\partial z^2. \quad (4)$$

Будем искать решение уравнения (4) в виде:

$$n = \Sigma [a_m \sin m(\omega t - kz) + b_m \cos m(\omega t - kz)], \quad (5)$$

где суммирование ведется по m от 0 до верхней части временного интервала. В более компактном

виде выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$n = \Sigma c_m \exp(iu_m), \quad (6)$$

$$\text{где } c_m = (a_m^2 + b_m^2)^{1/2}, u_m = [(m\omega t - kz) - \psi_m]$$

$$\operatorname{tg} \psi_m = b_m/a_m$$

Подставив (6) в (4), находим: $i\omega m + Dk^2 = 0$, откуда $k = (1 - i)(\omega m/2D)^{1/2}$.

Подставив (6) в (3), найдем:

$$n_0 V = \Sigma (D\omega m)^{1/2} c_m \exp i[(m\omega t - k_0 z) - \psi_m] \exp(-k_0 z), \quad (7)$$

где $k_0 = (\omega m/2D)^{1/2}$.

Это решение описывает процесс распространения пульсаций скорости течения подпочвенного воздуха в пористой среде. Величина $k_0^{-1} = z_0$ – расстояние, на котором скорость пульсаций затухает в e раз, а ω/k_0 – их фазовая скорость движения в пористой среде по оси z :

$$V_{\text{фр}} = (2D\omega m)^{1/2} = c(2\omega K/\nu)^{1/2}. \quad (8)$$

Для суточных колебаний при $K = 10^{-10}$ см² фазовая скорость составит $\sim 10^{-2}$ см/с. Массовая скорость подпочвенного воздуха:

$$U = V_{\text{ф}} \times \delta P/P_0, \quad (9)$$

где $\delta P/P_0$ – относительная вариация атмосферного давления.

На границе пористой среды и атмосферы происходит взаимодействие геогаза с атмосферным воздухом. При увеличении атмосферного давления воздух входит в поры и “поджимает” геогаз, а при уменьшении воздух и часть геогаза выходят из пор. Так что в среднем, за период изменения атмосферного давления, происходит “откачка” геогаза в атмосферу.

В случае изменения атмосферного давления по закону $\sim \sin \omega t > 0$, на первом полупериоде количество геогаза в воздухе не меняется, а на втором полупериоде происходит его сток в атмосферу. Формально, на дневной поверхности ($z = 0$) этот процесс будет описываться уравнением:

$$\begin{aligned} n_R U &= 0, \quad \text{если } \sin u_m^* > 0; \\ n_R U &= n_R V_{\text{ф}} (\delta P/P_0) \sin u_m^*, \quad \text{если } \sin u_m^* < 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $u_m^* = m\omega t - \psi_m$.

Временной ход поступления геогаза в атмосферу $|\delta P/P_0|$ в связи с фазой изменения атмосферного давления для простейшего случая, когда справедливо уравнение (10), показан на рис. 2.

Пусть $\chi = n_R/n_0$ – среднее относительное содержание геогаза в подпочвенном воздухе, то-

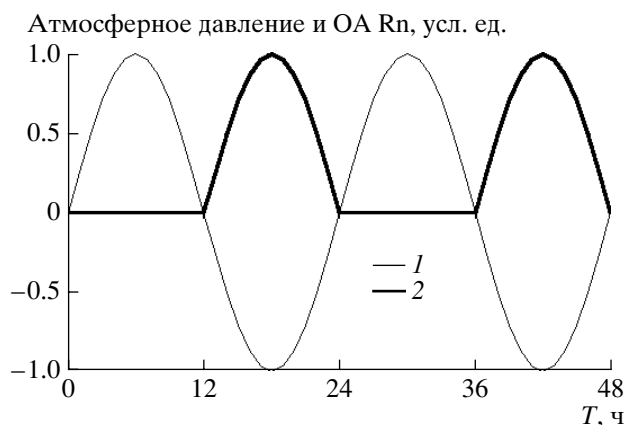


Рис. 2. Вариации атмосферного давления (1) и отклик геогаза (2) на дневной поверхности, рассчитанный по формуле (10). Кривые нормированы на максимум.

гда два уравнения (10) можно заменить одной формулой:

$$n_R V = \chi n_0 (\delta p / p_0) [\sin(\omega t - kz) + \sin(\omega t - kz)] / 2. \quad (11)$$

Если теперь перейти только к одной составляющей геогаза – радону и принять допущение, что изолинии равной концентрации Rn в грунте квазипостоянны, то получается, что вариации атмосферного давления играют роль насоса, все время “подкачивающего” Rn в атмосферу из зоны аэрации мощностью h . Глубина этой зоны составит $\sim U \times \tau$, где U – скорость подпочвенного воздуха, τ – постоянная времени распада радона. Интересно сравнить ее с z_0 :

$$h/z_0 = (U/V)_{\omega\tau} = (\delta p/p_0)\omega\tau.$$

Для суточных колебаний атмосферного давления амплитудой в 10 миллибар мощность активного слоя будет около $h \sim 0.25z_0$.

Амплитуда вариации плотности радона на глубине z в $\exp(-k_0 z)$ раз меньше, чем на границе с атмосферой, и отличается по фазе от вариации атмосферного давления. 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. На рис. 3 показан модельный ход отклика концентрации Rn в рыхлых отложениях, с коэффициентом Дарси $\sim 10^{-14} \text{ м}^2$ на глубинах один и полтора метра, на вариации атмосферного давления с $T = 1$ сутки.

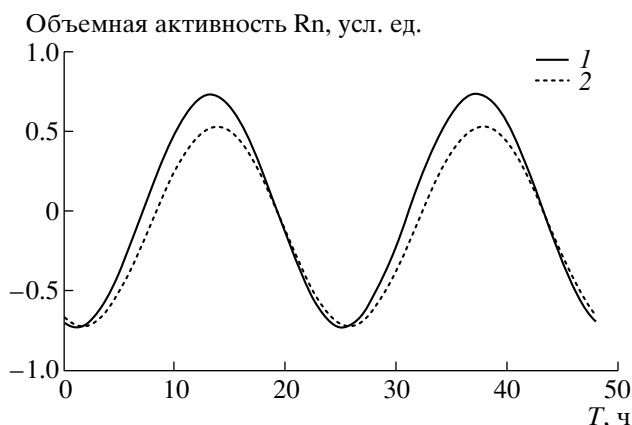


Рис. 3. Ход относительной амплитуды вариации объемной активности радона на датчиках, заглубленных на один (1) и 1.5 (2) метра соответственно, рассчитанный по предлагаемой модели. Различия фаз и амплитуд соответствует $K \approx 10^{-10} \text{ см}^2$. Кривые центрированы и нормированы на максимум.

На рис. 3 хорошо видно, что сигнал на верхнем датчике имеет несколько большую амплитуду и сдвинут по времени примерно на один час. Покажем, что этот сдвиг по времени контролируется величиной коэффициента K . Действительно, полагая, что кривые 1 и 2 находятся в одинаковой фазе:

$$\omega t_1 - k_0 z_1 = \omega t_2 - k_0 z_2$$

получим $k_0 = \omega(t_2 - t_1)/(z_2 - z_1)$. Поскольку $k_0 = (\omega/2D)^{1/2} = (\omega\nu/KC^2)^{1/2}$ то:

$$K = (\nu/\omega c^2) [(z_2 - z_1)/(t_2 - t_1)]^2. \quad (12)$$

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

Очевидно, измеряя Δt , можно контролировать изменения коэффициента проницаемости почвы. Использование кинематического параметра в динамике подпочвенного радона для мониторинга проницаемости рыхлых отложений может упростить обработку данных, т.к. в этом случае не требуется калибровка по абсолютной величине.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим экспериментальные данные в свете изложенной выше модели. На рис. 4а приведены кривые изменения атмосферного давления и концентрации Rn в зоне аэрации на глубине один метр и на поверхности в т. 1 пункта Паратунка (ПРТ) за период 3 сентября – 13 октября 2004 г. Визуально видна корреляция концентрации Rn с

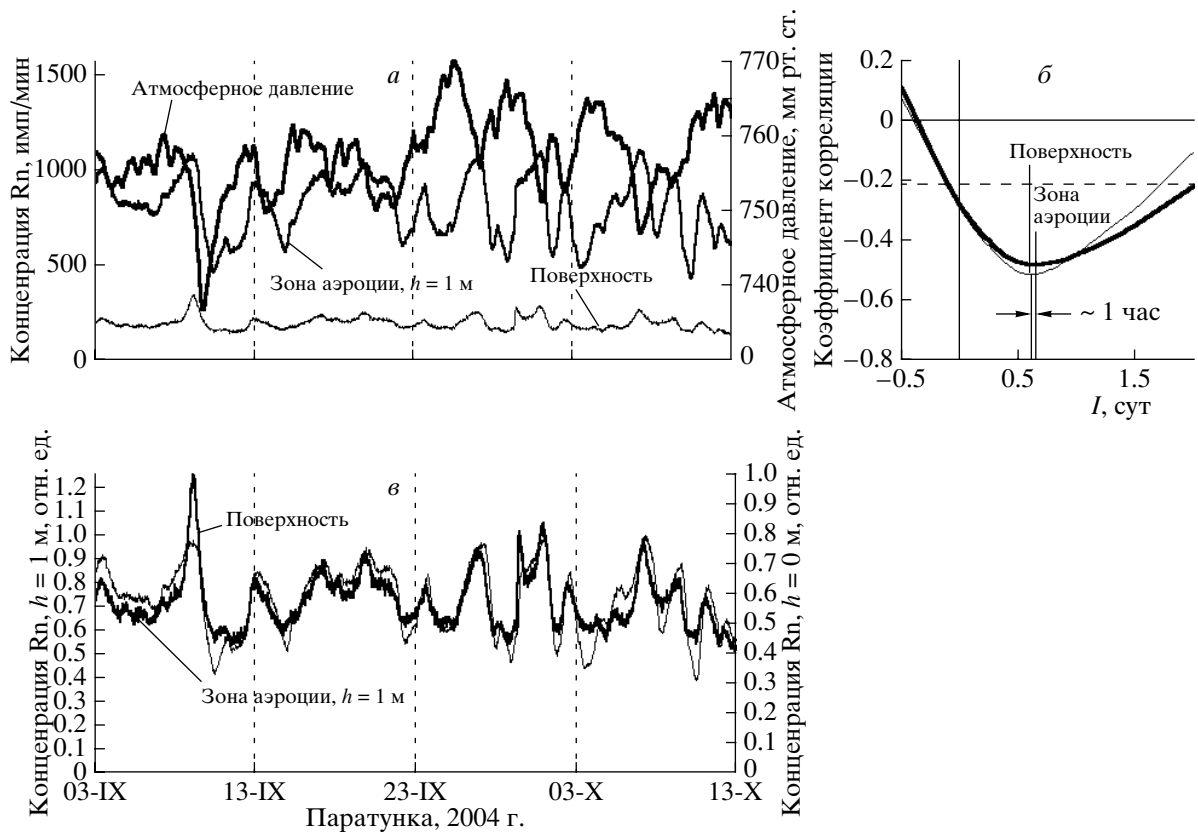


Рис. 4. Кривые изменения атмосферного давления и концентрации Rn в зоне аэрации на глубине один метр и на поверхности в пункте Паратунка *а*, коэффициент корреляции между концентрацией Rn и атмосферным давлением между *б*, кривые концентраций Rn на глубине один метр и на поверхности, нормированные на максимальное значение *в*.

атмосферным давлением, вариации которого составляют около 3–4 суток. Следует отметить, что для этого пункта наблюдалась самая высокая передаточная функция из сети станций мониторинга почвенного радона, которая составляет $H = 400$ Бк/(м³ гПа) в диапазоне частот 0.7–1.2 цикл/сут [10].

На рис. 4б показано изменение коэффициента корреляции между концентрациями Rn и атмосферным давлением при различных сдвигах кривых. Сток радона в атмосферу увеличивается более чем через 0.5 сут после начала падения атмосферного давления. Фазовый сдвиг коэффициента корреляции между зоной аэрации и поверхностью составляет около одного часа. На рис. 4в, где кривые концентрации Rn нормированы на максимум и совмещены, видно, что зависимость концентрации Rn на поверхности от времени напоминает временной ход поступления геогаза в атмосферу, теоретически рассчитанного в связи с изменением атмосферного давления (рис. 2).

На рис. 5а приведена динамика концентрации Rn в зоне аэрации (1 м), на поверхности и в воздухе подземного бункера, а также концен-

трация CO₂ в стволе скважины в пункте ИНС за период 17 июля – 30 августа 2006 г. Как видно на рис. 5б, 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. 5в). Эти суточные колебания обусловлены особенностями конструкции наблюдательного пункта. Нагрев металлического контейнера над бункером днем и его охлаждение ночью с перепадом температуры до 15°C 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.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента корреляции между значениями концентрации CO₂, Rn в различных точках регистрации пункта ИНС и атмосферным давлением от временного сдвига между рядами. Между зоной аэрации и поверхностью наблюдается сдвиг в 100 мин. Принимая для

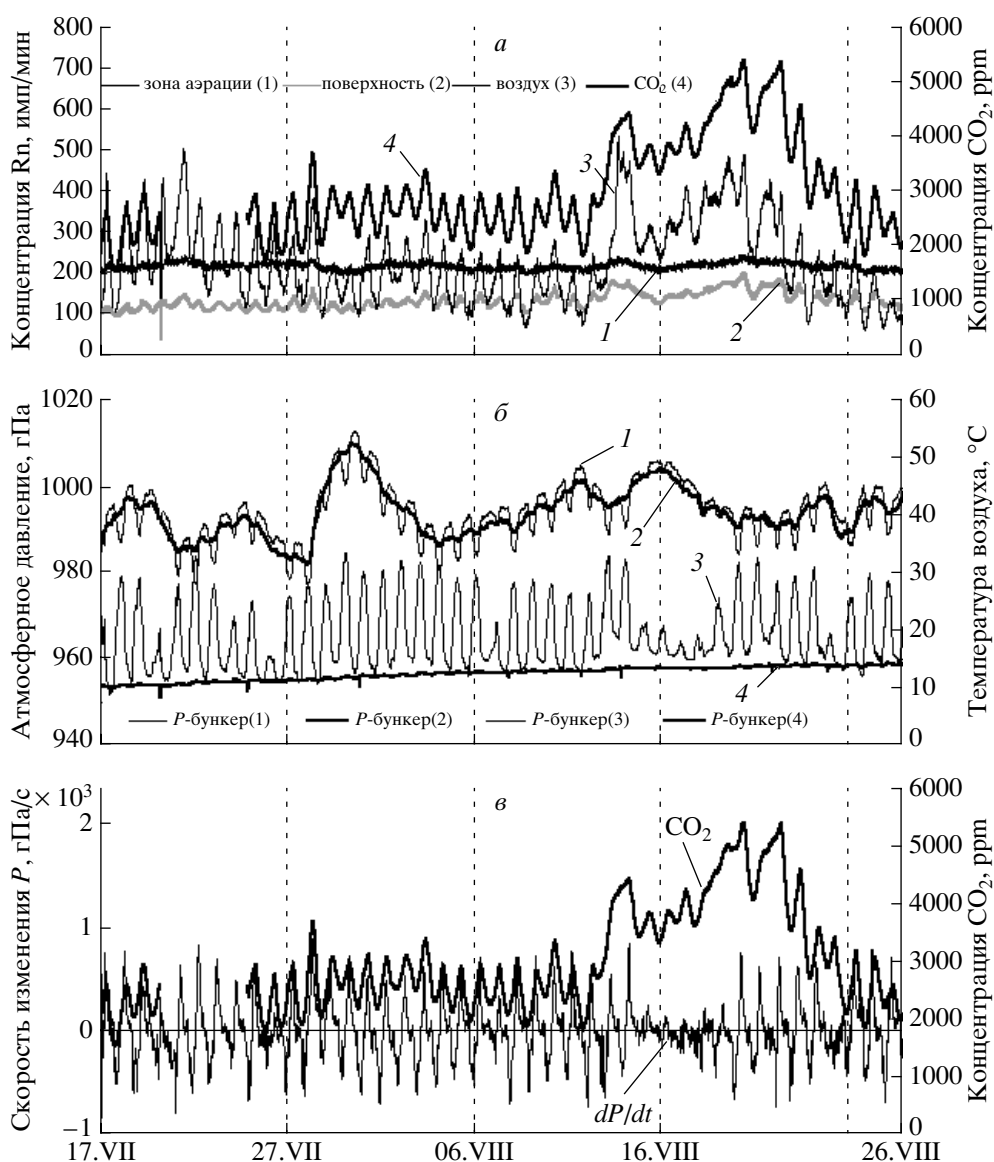


Рис. 5. Концентрация Rn и CO₂ в точке ИНС а, метеопараметры (*P*-давление, *T*-температура) в бункере и контейнере б, концентрация CO₂ в скважине и скорость изменения атмосферного давления *dP/dt* в.

воздуха динамическую вязкость [9] $\nu = 1.4 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $C = 330 \text{ м/с}$, $\omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, при $t_2 - t_1 = 100 \text{ мин}$ по формуле (12) получаем $K = 1.7 \times 10^{-4} \text{ м}^2$. Такое значение коэффициента Дарси соответствует песчанику или слежавшемуся суглинку [8].

Интересно рассмотреть соотношения кинематических и динамических параметров концентрации Rn в зоне аэрации и на поверхности за рассматриваемый период, поскольку по оперативным данным Камчатского филиала Геофизической службы РАН после двухмесячного сейсмического затишья 17 и 20 июля у берегов Камчатки произошли землетрясения с магнитудой 5.9 и 5.2 соответственно. Очаги этих землетрясений располагались на севере (55.54° с.ш.) и на юге (49.6° с.ш.)

полуострова Камчатка на удалении около 350 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 отклик поведения коэффициента Дарси на сейсмич-

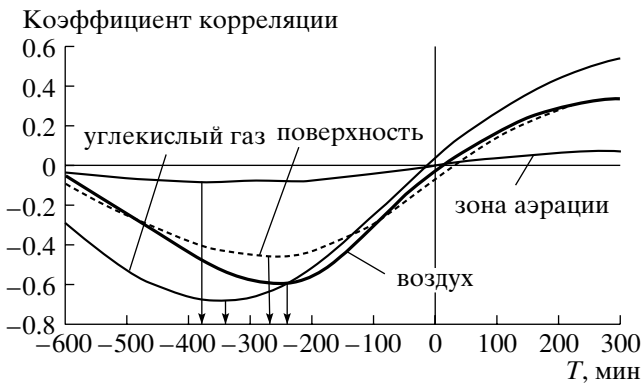


Рис. 6. Коэффициент корреляции между концентрацией Rn в различных точках регистрации пункта ИНС и атмосферным давлением в зависимости от сдвига между рядами данных за период 17 июля – 30 августа 2006 г. Стрелками отмечены максимумы коэффициента корреляции.

ность северного фланга Курило – Камчатской островной дуги (рис. 7).

С целью исследования корреляционных зависимостей концентрации Rn в зоне аэрации и на поверхности была осуществлена фильтрация полосовым фильтром с граничными частотами $f_{1гр} = 0.03$ и $f_{2гр} = 0.05$ цикл/ч, что позволило выделить суточную гармонику (рис. 7, верхние кривые). Поиск максимума коэффициента корреляции проводился для пятисуточных интервалов и относился к концу интервала. Как видно на рис. 7, значение сдвига максимума корреляции заключе-

но в пределах 80–180 мин. По формуле (12) вычислялся коэффициент Дарси, который заключен в пределах 6×10^{-14} – 2.7×10^{-13} м².

Действительно, в период активизации сейсмичности (14–19 августа) коэффициент Дарси уменьшился почти в 4 раза. С 13 августа отмечается возрастание концентрации Rn на всех каналах и CO₂ (рис. 5а), и как видно на рис. 5б, оно не связано с метеопараметрами. На рис. 7 также приведена кривая отношений значений концентрации Rn зоны аэрации к поверхности ($N_a/N_{пов}$), на которой четко выделяется суточная составляющая с максимумом, приходящим на минимум скорости изменения атмосферного давления. Этот факт можно трактовать следующим образом: сток Rn с поверхности наиболее чувствителен к вариациям атмосферного давления по сравнению с зоной аэрации, что приводит к относительно большему уменьшению концентрации Rn на поверхности, по сравнению с зоной аэрации в период минимума скорости изменения атмосферного давления. В период 14–19 августа, при увеличении потока подпочвенного Rn, наблюдается уменьшение $N_a/N_{пов}$ за счет смещения равновесного состояния Rn с продуктами распада на поверхности.

В целом анализ динамических и кинематических параметров концентрации радона в точках на разных глубинах рыхлых отложений позволяет осуществлять мониторинг за изменением напряженно-деформированного состояния геосреды.

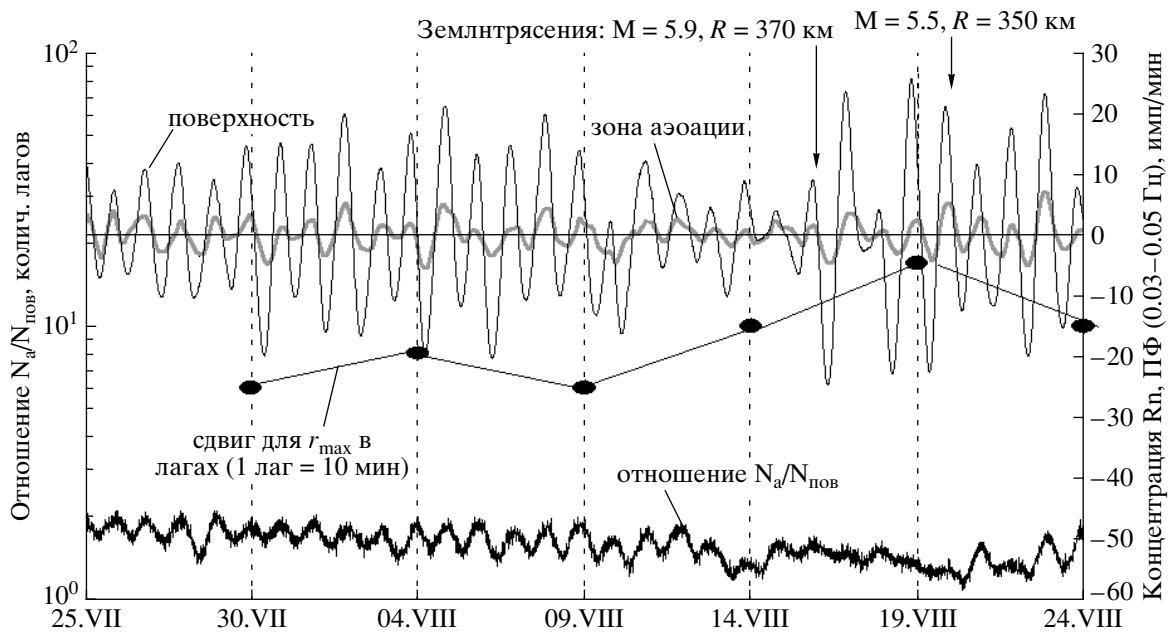


Рис. 7. Отфильтрованные кривые концентрации радона (ПФ 0.03 – 0.05 цикл/час) в пункте ИНС (зона аэрации и поверхность), сдвиг для максимума корреляции между этими кривыми в пятисуточных интервалах и отношение значений концентрации Rn зоны аэрации к поверхности ($N_a/N_{пов}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ поведения геогаза в пористой среде под действием вариаций внешнего давления хорошо описывается в рамках модели пористой среды. Суточные вариации стока радона в атмосферу, обусловленные вариациями атмосферного давления, могут служить естественным зондирующим сигналом для мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния геосреды. Период сейсмической активизации северного фланга Курило-Камчатской островной дуги 17 – 30 августа 2006 г. предварялся и сопровождался с 14 по 25 августа увеличением концентрации CO_2 и Rn во всех точках пункта ИНС с одновременным уменьшением коэффициента проницаемости верхней части рыхлых отложений в районе пункта регистрации более чем в 4 раза (6×10^{-14} – 2.7×10^{-13} м²).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.И. Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР. 1956. 230 с.
2. Бондаренко В.М., Демин Н. В., Иванова Т. М. Перенос радона в горном массиве: модели и экспериментальные данные. Статья II // Изв. выс. уч. зав. Геология и разведка. 1999. № 5. С. 108–115.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 520 с.
4. Любушин А.А.,(мл), Малугин В.А. Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. 1993. № 12. С. 74–80.
5. Рудаков В.П. О барических вариациях подпочвенного радона // Геохимия. 1985. № 1. С. 124–127.
6. Руленко О.П., Иванов А.В., Шумейко А.В. Краткосрочный атмосферно – электрический предвестник Камчатского землетрясения 6.03. 1992, М = 6.1 // Докл. РАН. 1992. Т. 326. № 6. С. 980–982.
7. Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.1993 г., М = 7.0 // Докл. РАН. 1996. Т. 348. № 6. С. 814–816.
8. Теркот Д., Шуберт Д. Геодинамика. Геологическое приложение физики сплошных сред. Т. 2. М.: Мир, 1985. 730 с.
9. Физические величины М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. 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.
11. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П. и др. О связи динамики подпочвенного радона (²²²Rn) с сейсмической активностью Камчатки в июле–августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 26–41.
12. Etiopie G., Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview // Physics of the earth and planetary interiors. 2002. V. 129. № 3–4. P. 185–204.
13. Klusman R. W., Webster J.D. Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crustal gas emission relevant to earthquake prediction //Bul. Seismol. Soc. of America. V. 71. № 1. P. 211–222.

On the Effects of Air Pressure Variations on Radon Exhalation into the Atmosphere

P. P. Firstov², E. A. Ponomareva³, N. V. Cherneva¹, A. V. Buzevich², O. P. Malysheva²

1@Institute of Space Physics Research and Radio Wave Propagation, Far East Division, Russian Academy of Sciences, village of Paratunka, Kamchatka Oblast' @ 684034, Russia

2@Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

A model is studied purporting to describe effects of air pressure variations on the flow of radon into the atmosphere from loose deposits that are treated as a porous medium having the gas-dynamic properties described by Darcy's law. It is shown that the model results are in satisfactory agreement with the experimental data acquired from a network of subsurface radon monitoring stations in the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Test Site in 1997–2006. A technique has been developed for estimating the Darcy coefficient based on radon concentration data in loose deposits at several depths.