

УДК 550.348.+551.594

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ БАРОВАРИАЦИЙ НА ЭСХАЛЯЦИЮ РАДОНА В АТМОСФЕРУ

□ 2006 П.П. Фирстов^{1,2}, Е.А. Пономарев,^{1,3} Н.В. Чернева,¹ А.В. Бузевич²,
О.П. Малышева²

¹Институт космифизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
п. Паратунка, Камчатская область, 684034

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

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033

В статье дана модель отклика массопереноса подпочвенного радона на вариации атмосферного давления из рыхлых отложений, рассматриваемых как пористая среда, газодинамические свойства которой описываются 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 по наблюдениям 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 (Руленко, 1992, 1996). Поэтому представляет большой интерес иметь представление обо всех факторах, влияющих на сток Rn в атмосферу. Возможные механизмы массопереноса геогаза подробно даны в обзорной работе (Etiope, Martinelli, 2002). В данной

статье делается упор на изучение влияния вариаций атмосферного давления на эксхалицию радона из рыхлых отложений.

Влияние атмосферного давления на динамику подпочвенного Rn отмечалось в первых работах по эманационной съемке, которая получила широкое распространение в 50 годах XX столетия с целью поиска месторождений радиоактивных руд. Этому вопросу посвящено достаточно много работ (Баранов, 1955; Klusman, Webster, 1981; Рудаков, 1985; Бондаренко и др., 1999), в которых дано объяснение причины влияния вариаций атмосферного давления на эксхалицию 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 (Любушин, Малугин, 1993), как это сделано в работе (Фирстов, Рудаков, 2003), 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 почвенном воздухе расположена на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. Аппаратура и методика наблюдений достаточно подробно описана в работах (Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др. 2006). Почти во всех пунктах наблюдения газоразрядные счетчики β -излучения установлены на двух глубинах - один и два метра, что позволяет следить за динамикой 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 эсхалацию 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 позднеплестоценовых 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 трубами, 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

уровнемерные наблюдения, колебался в зависимости от сезона в пределах 51.0 – 52.5 м (устное сообщение Ю.М. Хаткевич).

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 рисунке 1:

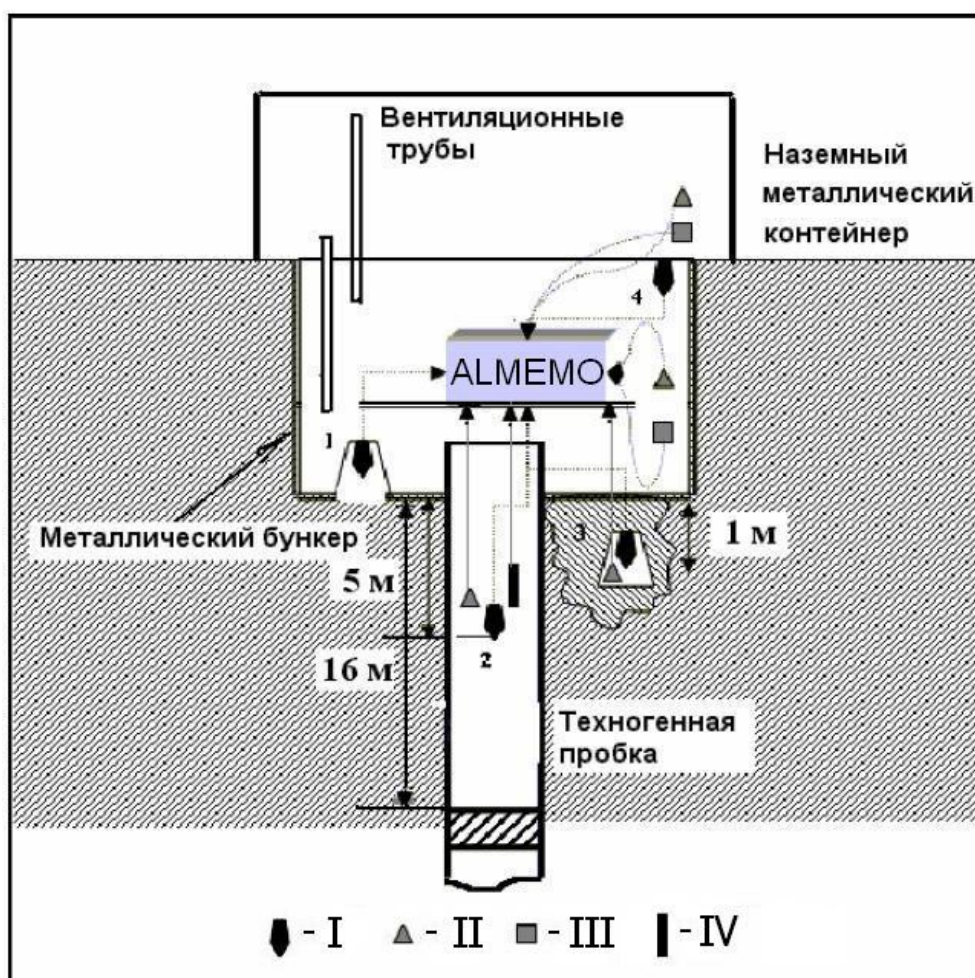


Рис.1. Схема размещения датчиков в скважине НИС-1: I - газоразрядные счетчики β -излучения; II – датчики температуры; III – датчики давления; IV – датчик углекислого газа.

- 1) в стволе скважины на глубине 2,5 м от края оголовка;
- 2) в зоне аэрации на глубине один метр 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} .

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СТОК РАДОНА В АТМОСФЕРУ

Будем рассматривать рыхлые отложения как пористую среду, заполненную подпочвенным воздухом (геогазом). Тогда скорость потока подпочвенного воздуха в пористой одномерной среде на небольшом расстоянии подчиняется закону Дарси (Теркот, Шуберт, 1985):

$$V = -K / \mu \cdot \partial p / \partial z, \quad (1)$$

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:

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

Здесь n – плотность молекул воздуха в рыхлых отложениях, которая равна $n = p / c^2 \cdot M$, 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:

$$n_0 V = -D \nabla^2 \partial n / \partial z. \quad (3)$$

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

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

Будем искать решение уравнения (4) в виде:

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

где суммирование ведется по m от 0 до верхней части временного интервала. В более компактном виде выражение (5) можно записать в следующем виде:

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

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

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:

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

$$\text{где } k_0 = (\omega m/2D)^{1/2}.$$

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 :

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

Для суточных колебаний при $K = 10^{-10} \text{ см}^2$ фазовая скорость будет составит $\sim 10^{-2} \text{ см/с}$.

Массовая скорость подпочвенного воздуха:

$$U = V_{\phi} \nabla \delta p / p_0, \quad (9)$$

где $\delta p/p_0$ – относительная вариация атмосферного давления.

На границе пористой среды (рыхлые отложения) и атмосферы происходит взаимодействие. При увеличении атмосферного давления на величину δp в поры проникает атмосферный воздух и происходит разбавление геогаза, а при возвращении давления к невозмущенному уровню подпочвенный воздух с пониженной концентрацией геогаза выйдет из пор.

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:

$$\begin{aligned} n_R U &= 0 && \text{если } \sin u_m^* > 0 \\ n_R U &= n_R V_\phi (\delta p/p_0) \sin u_m^* && \text{если } \sin u_m^* < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

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.

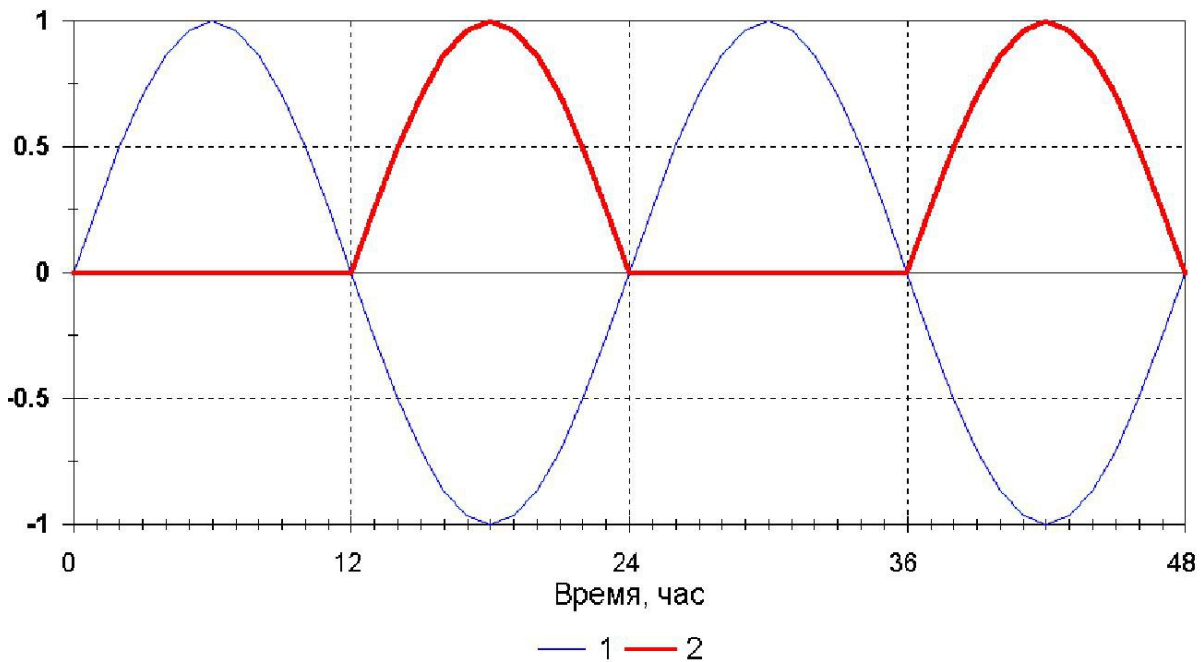


Рис.2. Вариации атмосферного давления (1) и отклик геогаза (2) на дневной поверхности, рассчитанный по формуле 10. Кривые нормированы на максимум.

Пусть $\chi = n_R/n_0$ среднее относительное содержание геогаза в подпочвенном воздухе, тогда 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 R_n в грунте квазипостоянны, то получается, что вариации атмосферного давления играют роль насоса, все время «подкачивающего» R_n в атмосферу из зоны аэрации мощностью h . Глубина этой зоны составит $\sim U\tau$, где U – скорость подпочвенного воздуха, τ – постоянная времени распада радона. Интересно сравнить ее с z_0 :

$$h/z_0 = (U/V)\omega\tau = (\delta p/p_0)$$

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

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 R_n 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.

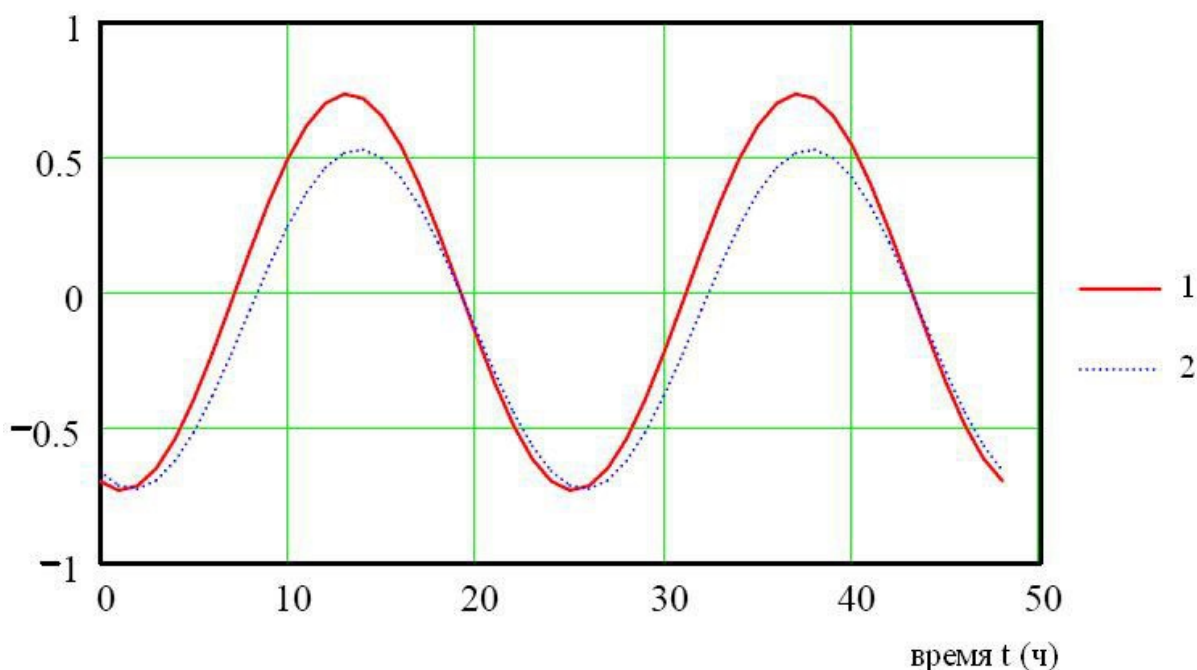


Рис. 3. Ход относительной амплитуды вариации объемной активности радона на датчиках, заглубленных на один (кривая 1) и 1.5 (кривая 2) метра соответственно, рассчитанный по предлагаемой модели. Различие фаз и амплитуд соответствует K порядка 10^{-10} см^2 . Кривые центрированы и нормированы на максимум.

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:

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

получим $k_0 = \Delta (t_2 - t_1) / (z_2 - z_1)$. Поскольку $k_0 = (\Delta / 2D)^{1/2} = (\Delta v / K c^2)^{1/2}$ то:

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

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 атмосферным давлением, вариации которого составляют около 3-4 суток. Следует отметить, что для этого пункта наблюдалась самая высокая передаточная функция из сети станций мониторинга подпочвенного радона, которая составляет $H=400 \text{ Бк} \cdot \text{л} / (\text{м}^3 \cdot \text{гПа})$ в диапазоне частот $0.7 \div 1.2$ цикл/сутки (Фирстов, Рудаков, 2003).

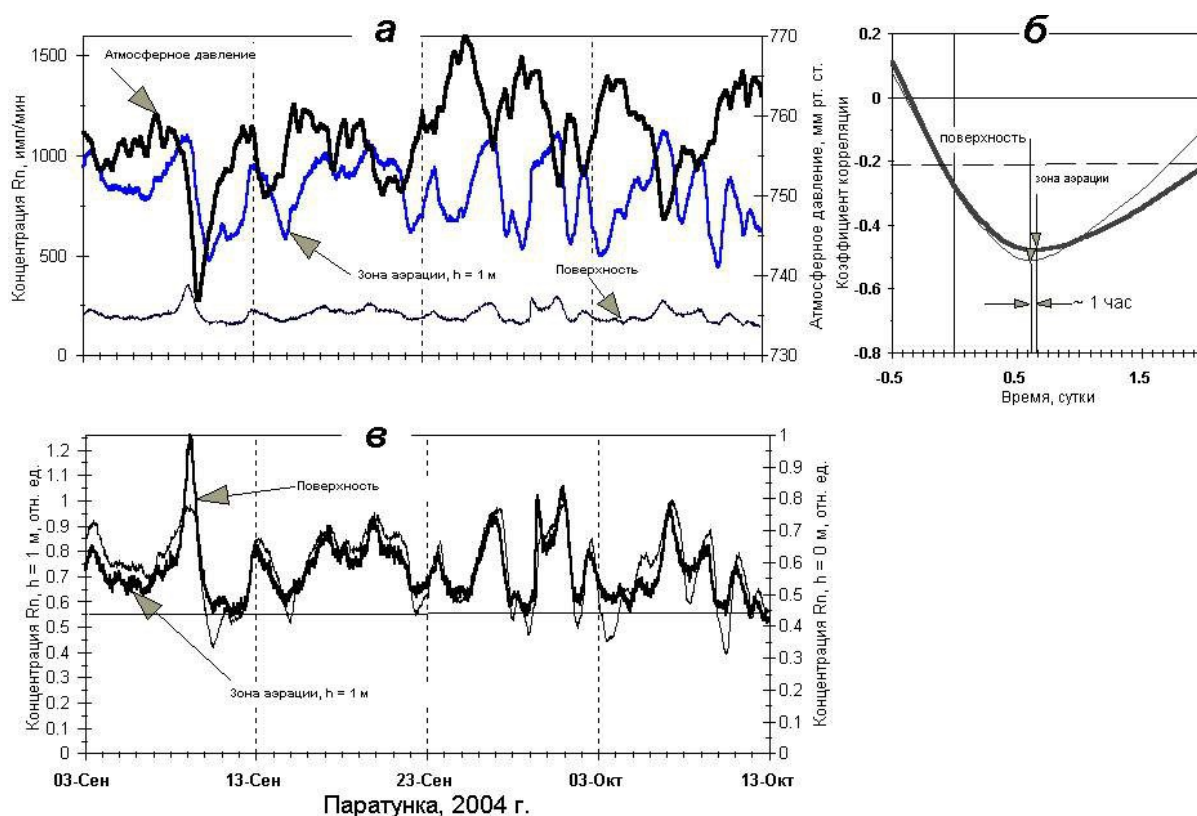


Рис.4. Кривые изменения атмосферного давления и концентрации Rn в зоне аэрации на глубине один метр и на поверхности в пункте Паратунка (а), кривые концентраций Rn на глубине один метр и на поверхности, нормированные на максимальное значение (б), коэффициент корреляции между концентрацией Rn и атмосферным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

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

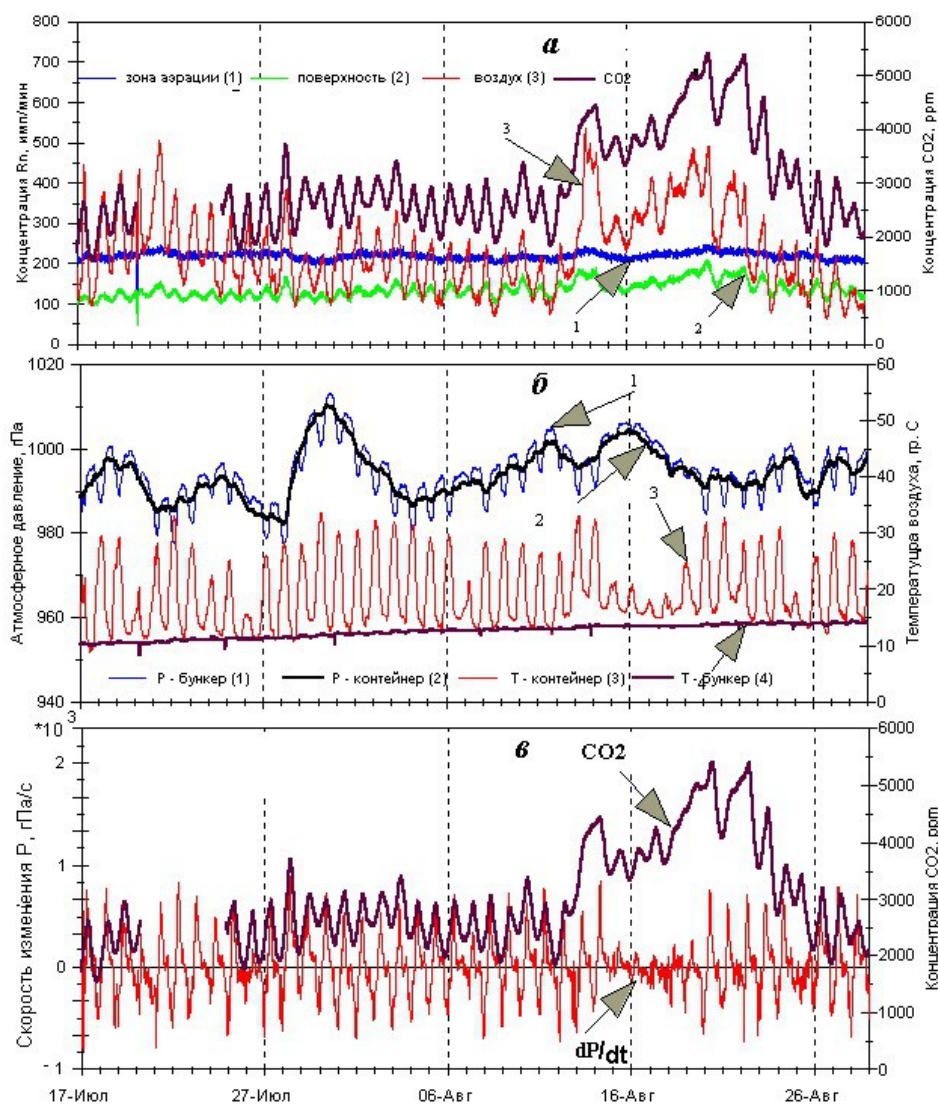


Рис.5. Концентрация R_n и CO_2 в точке ИНС (а), метеопараметры (Р-давление, Т-температура) в бункере и контейнере (б), концентрация CO_2 в скважине и скорость изменения атмосферного давления dP/dt (в).

На рис. 5а приведена динамика концентрации R_n в зоне аэрации (1м), на поверхности и в воздухе подземного бункера, а также концентрация CO_2 в стволе скважины в пункте ИНС за период 17 июля- 30 августа 2006 г. Как видно из рис. 5б, в подземном бункере регистрируется четко выраженные суточные колебания атмосферного давления с амплитудой около 10 гПа. Причем максимум в суточных колебаниях составляющих геогаза приходятся 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 R_n на эти колебания может служить характеристикой состояния геосреды в данной точке.

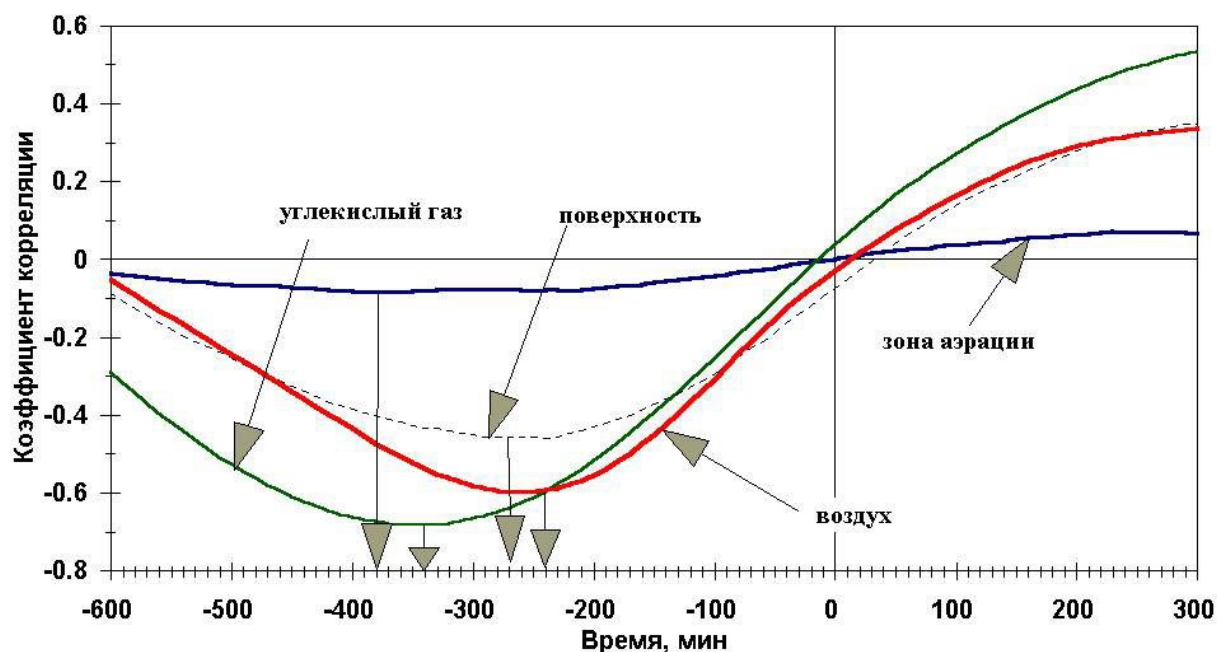


Рис. 6. Коэффициент корреляции между концентрацией R_n в различных точках регистрации пункта ИНС и атмосферным давлением в зависимости от сдвига между рядами данных за период 17 июля – 30 августа 2006 г. Стрелками отмечены максимумы коэффициента корреляции.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента корреляции между значениями концентрации CO_2 , R_n 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 воздуха динамическую вязкость $\nu = 1.4 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $c = 330 \text{ м/с}$, $\beta = 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, при $t_2 - t_1 = 100$ мин по формуле (12) получаем $K = 1.7 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$. Такое значение коэффициента Дарси соответствует песчанику или слежавшемуся суглинку (Теркот, Шуберт, 1985).

Интересно рассмотреть соотношения кинематических и динамических параметров концентрации R_n 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. А 1-2 сентября прошла серия землетрясений на юге Кроноцкого и в Авачинском заливах. Эпицентр самого сильного толчка с магнитудой 5.6 располагался в 110 км от пункта регистрации. Оживление сейсмичности на всей протяженности северного фланга Курило-Камчатской островной дуги дает основание предполагать об увеличении скорости движения Тихоокеанской плиты, что могло привести к перестройке регионального поля напряжений.

С целью исследования корреляционных зависимостей концентрации R_n в зоне аэрации и на поверхности была осуществлена фильтрация полосовым фильтром с граничными частотами $f_{cpl}=0.03$ и $f_{cpl}=0.05$ цикл/час, что позволило выделить суточную гармонику (рис.7, верхние кривые). Максимум коэффициента корреляции искался для пятисуточных интервалов и относился к концу интервала. Как видно на рис. 7, значение сдвига максимума корреляции заключено в пределах 80-180 мин. По

формуле (12) вычислялся коэффициент Дарси, который заключен в пределах $6 \cdot 10^{-14}$ - $2.7 \cdot 10^{-13}$ м².

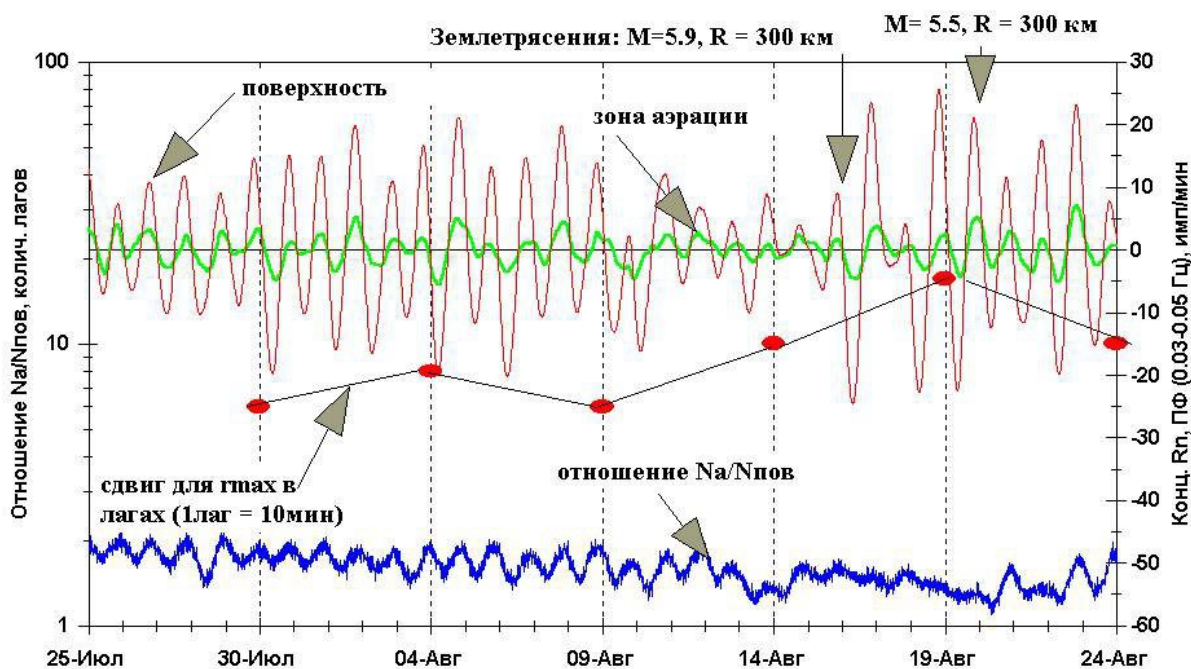


Рис.7. Отфильтрованные кривые концентрации радона (ПФ 0.03 – 0.05 цикл/час) в пункте ИНС (зона аэрации и поверхность), сдвиг для максимума корреляции между этими кривыми в пятисуточных интервалах и отношение значений концентрации Rn зоны аэрации к поверхности ($N_a/N_{пов}$).

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 почвенного Rn,

наблюдается уменьшение отношения $N_a/N_{\text{пов}}$ 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.

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 ($6 \cdot 10^{-14}$ - $2.7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$).

Список литературы

- 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.
- Кухлинг Х.* Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 520 с.
- Любушина А.А., (мл), Малугин В.А.* Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. 1993. № 12. С. 74-80.
- Рудаков В.П.* О барических вариациях подпочвенного радона // Геохимия, 1985. № 1. С. 124-127.
- 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.
- Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф.* Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.93 г., М=7.0 // Докл. РАН. 1996. Т. 348. № 6. С. 814-816.
- Теркот Д., Шуберт Д.* Геодинамика. Геологическое приложение физики сплошных сред, Т.2. М.: Мир, 1985. 730 с.
- Физические величины М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- 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.
- Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П. и др.* О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) с сейсмической активностью Камчатки в июле-августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С.26-41.
- Etiope G., Martinelli G.* Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview // Physics of the earth and planetary interiors. 2002. V. 129. N 3-4. P. 185-204.
- 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. N 1. P. 211-222.