

УДК 550.8.056

## **МОДЕЛЬ НЕКОТОРЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ В ПОЛЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С $M \geq 5.5$ НА ПОЛУОСТРОВЕ КАМЧАТКА\***

**Е. О Макаров<sup>1,2</sup>, П. П Фирстов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Пийпа б-р, 9

<sup>2</sup> Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

E-mail: ice@emsd.ru firstov@emsd.ru

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в течение почти 20 лет работает сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона. За время работы был зарегистрирован ряд аномалий, предвещающих землетрясения с магнитудой  $M > 5$ , которые по морфологическим признакам разделены на два типа (А, Б). В работе детально разбирается механизм возникновения аномалий типа Б на основании математической модели распространения радона в потоке подземных вод с полным поперечным перемешиванием. Сделана попытка увязать некоторые особенности возникновения предвестниковых аномалий типа Б с районами возникновения землетрясений.

*Ключевые слова: радон, математическое моделирование, радоновая аномалия, прогноз землетрясения, Камчатка, радоновый мониторинг, геотермальный резервуар, деформация*

© Макаров Е. О., Фирстов П. П., 2018

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ No 16-05-00162

## Введение

Изотопы радона являются дочерними продуктами распада изотопов радия. Распадаясь с испусканием  $\alpha$ -частиц они образуют изотопы полония. За счет энергии отдачи при радиоактивном распаде радия, радон покидает кристаллическую решетку, попадая в дефекты кристаллов и микротрещин. Обладая химической инертностью, он проникает в поровое пространство и подземные воды. Затем за счет диффузии и конвекции мигрирует к дневной поверхности и стекает в атмосферу. Поскольку наиболее долгоживущим из природных изотопов радона является  $^{222}\text{Rn}$  с периодом полураспада  $T=3.824$  суток, образующийся при альфа-распаде  $^{226}\text{Ra}$  уранового ряда ( $^{238}\text{U}$ ), то его содержание в приземном слое атмосферы наиболее представительно.

Процесс миграции радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) в верхней толще горных пород интенсивно начал изучаться с начала 40-х годов прошлого века с целью отработки методики поиска месторождений урановых руд [1, 2]. В последние несколько десятков лет изучению механизма переноса  $^{222}\text{Rn}$  в грунтах посвящено много работ связанных с прогнозом сильных землетрясений [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Перенос радона в слоистых средах является предметом исследований, как теоретиков, так и практиков различных областей. Универсальной математической модели, которая бы полно описывала процесс переноса Rn к дневной поверхности в различных физико-литологических условиях, пока не разработано. Хотя для частных случаев и при определенных допущениях рассмотрено достаточно много таких моделей [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

По литературным данным ниже приведены наиболее известные модели формирования радоновых предвестников в подземных водах и подпочвенном газе.

1. Модели формирования радоновых предвестников на основе механических представлений:

- деформации, способствующие выжиманию радона из кристаллической решетки и увеличению коэффициента эманирования Rn из горных пород в поровые флюиды [20];

- подмешивание флюидов в подземные воды из других горизонтов [12, 17];

- ультразвуковые колебания, способствующие выделению радона из кристаллической решетки [21];

- вариации скорости вертикального газового потока за счет изменения трещиноватости и пористости пород под действием тектонических напряжений [5, 22];

- повышение объемной активности Rn (ОА Rn) за счет его десорбции с поверхности порового пространства под воздействием упругих колебаний, возникающих на последней стадии подготовки сильных землетрясений [23].

2. Модель гидротермальной системы как резонатора с собственной частотой колебаний концентрации газов [24].

3. Физико-химическая модель периодического фракционирования примесных газов в газовых коллекторах в зоне фазового расслоения гидротермального раствора [25].

4. Модель “геогаза”, согласно которой миграция Rn в грунте с полным влагонасыщением связана с потоком газов в форме микропузырьков, который является основным механизмом транспортировки Rn к дневной поверхности [13, 16, 18]. При этом механизм миграции эндогенных газов определяется взаимодействием воды в порах и трещинах с породой. Согласно современным исследованиям, на глубинах в несколько тысяч метров пузырьки имеют диаметр  $10^{-2} - 10^{-10}$  мм. При этом пред-

полагается, что газы-транспортеры ( $H_2$ ,  $He$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$ ), находящиеся в нескольких состояниях (течение в газовой фазе, вытеснение воды газом, газовые пробки и пузыри), обеспечивают основной процесс миграции более тяжелых инертных газов ( $Rn$ ,  $Tn$ ).

Процесс миграции  $Rn$  в рыхлых отложениях зависит от их проницаемости, которая определяется строением и свойствами верхней толщи грунта и уровня грунтовых вод. Изменения напряженно-деформированного состояния блока геосреды в районе пункта регистрации также влияют на миграцию  $Rn$  к поверхности, что может быть зафиксировано при регистрации подпочвенного  $Rn$ . К сожалению, большая зависимость от вариаций метеорологических величин (атмосферное давление, температура воздуха, влажность) затрудняют выделение предвестниковых аномалий землетрясений в поле подпочвенного радона.

С целью исследования динамики концентрации подпочвенного  $Rn$  и поиска предвестников сильных землетрясений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 1997 г. работает сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов [6, 26]. Пункты сети радонового мониторинга расположены в разных структурных элементах района побережья Авачинского залива, кроме того, каждый пункт имеет свои особенности строения толщи аллювиально-делювиальных отложений, в зоне аэрации которых размещаются датчики  $Rn$  [10]. Как показывает многолетний опыт, это позволяет фиксировать в динамике концентрации  $Rn$  индивидуальный отклик в связи с разной реакцией отдельных блоков земной коры на геодеформационные процессы, связанные с подготовкой сильных землетрясений Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

В качестве датчиков используются газоразрядные счетчики (ГС) типа СБМ-19, позволяющие вести пассивную регистрацию  $Rn$  по  $\beta$  - излучению короткоживущих продуктов его распада с использованием автоматизированных комплексов регистрации концентрации подпочвенных газов [10, 27]. Как правило, в каждом пункте регистрации работают два датчика, расположенных на разных глубинах (один и два метра).

На основании многолетних экспериментальных наблюдений выявлено два типа отклика в динамике подпочвенного  $Rn$  на геодинамические процессы, сопровождающие последнюю стадию подготовки сильного землетрясения района полуострова Камчатка, и имеющих характер предвестников: тип А - синфазные аномалии объемной активности радона (ОА  $Rn$ ), зарегистрированные в нескольких пунктах сети. Этот тип аномалий связывается с возмущениями в геосреде, условно названными авторами «деформационными волнами» (ДВ) и подробно описанными в работах [28, 29].

Другой тип Б хорошо выделяемая на общем фоне аномалия с определенной формой, регистрируемая, как правило, в одном пункте сети [28, 30, 31]. Дальнейшему развитию изучения данного типа предвестниковых аномалий посвящена эта работа.

## Основы математической модели переноса $Rn$ в водной среде с полным поперечным перемешиванием

В классическом представлении миграция радона в поровом пространстве горных пород происходит благодаря двум основным механизмам транспорта – диффузионного и конвективного, на которые накладываются значительное количество факторов [32]. Геологическая среда является неоднородно-слоистой, с заметно различа-

ющимися физико-литологическими характеристиками каждого слоя, что значительно усложняет процесс миграции радона к поверхности. Вариации метеорологических величин (температура и влажность верхнего слоя грунта, атмосферное давление) весьма существенно влияют на миграцию радона и на его сток в атмосферу [33]. В меньшей степени на миграцию радона влияют изменения напряженно - деформированного состояния геосреды.

Для описания и прогноза поведения  $Rn$  в грунтовых водах, а также для интерпретации данных изотопного опробования природных вод в 30-х годах прошлого века была разработана физико-математическая модель переноса  $Rn$  в природной водной системе [34], которая в дальнейшем была усовершенствована в работах [12, 17].

В математической модели переноса радона в потоке водной среды [34] использовались следующие параметры:  $M$  и  $A$  – суммарное содержание и активность  $Rn$  на единицу объема  $V$  среды;  $C$ ,  $a$  – концентрация и удельная активность радона  $Rn$  в среде;  $Q = v * S = [m^3 * c^{-1}]$  – расход воды в системе. Эти параметры связаны следующими соотношениями:

$$M = C * V, A = \lambda_p * M = \lambda_p * C * V = a * V, A = \lambda_p * C, \quad (1)$$

где  $\lambda_p = 2.1 * 10^{-6} c^{-1}$  - константа радиоактивного распада радона, связанная со средним временем жизни радона  $\tau_p = \lambda_p^{-1}$ .

В модели предполагается мгновенное полное поперечное перемешивание  $Rn$  и отсутствие перемешивания в продольном направлении, при этом скорость эманирования ( $q$ ) определяется следующим образом [12]:

$$q = \begin{cases} 0, x < 0 \\ q_0 = const, 0 \leq x \leq l^* \\ 0, x > l^* \end{cases} \quad (2)$$

Для концентрации радона  $C = M/V$  с учётом того, что  $V = l * S$  из уравнения (2) с нулевой начальной концентрацией, получаем следующую задачу:

$$\frac{dC(t)}{dt} = q - \lambda_p C(t), C(0) = 0 \quad (3)$$

Таким образом, общее решение задачи с учетом условия (3) согласно [12], имеет вид:

$$C(t = \frac{x}{v}) = \begin{cases} 0, x < 0, \\ C_\infty [1 - \exp(-\lambda_p t)], 0 \leq x \leq l^*, \\ C_\infty [1 - \exp(-\lambda_p t)] [\exp(-\lambda(t - t^*))], x > l^* \end{cases}, \quad (4)$$

здесь  $C_\infty = \frac{q_0}{\lambda_p}$ ,  $t = \frac{V_{water}}{Q} = \tau_n(x)$  – время пребывания воды и радона в системе на участке длиной  $x$ ;  $t^* = l^*/v = V_{water}/Q = \tau_n^*$  – время пребывания воды и радона в активной зоне;  $t - t^* = (x - l^*)/v = l/v = V_{water}/Q = \tau_d$  – время движения воды и компонента до точки наблюдения, находящейся на расстоянии  $l$  от края активной зоны;  $V_{water}(x) = xSn$  – объем воды в системе;  $V(x)$  – объём системы;  $n$  – пористость. Процесс эманирования в одномерный поток воды показан на верхней панели рис. 1, а распределение концентрации радона в потоке приведено на нижней панели.

На последней стадии подготовки землетрясений структурная неоднородность геосреды приводит к возникновению концентрации напряжений сжатия или растяжения

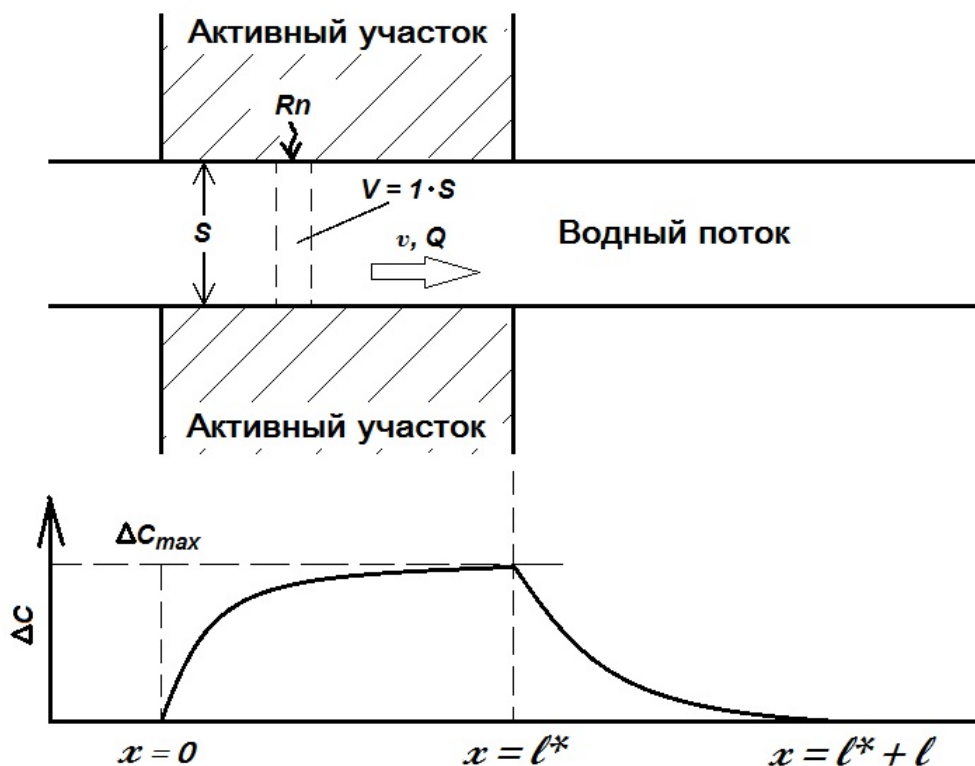


Рис. 1. Эманирование радона в одномерный водный поток, движущийся по каналу сечением  $S$  со скоростью  $v$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup> и расходом  $Q$ . Поток пересекает активный участок длиной  $l^*$

в разломных зонах. Если наблюдения проводятся в районе развитой гидрохимической системы, то ее общая реакция на деформационное воздействие пропорциональна интегральной сумме пространственно-временных вариаций деформационного поля.

В гомогенных твердых телах кинетика диффузии  $Rn$ , наряду с ядерной отдачей, представляет наиболее значимый физический процесс его поступления из твердой в жидкую и газообразную фазу пород. Процесс выделения  $Rn$  из минерала является двухстадийным. На первом этапе объемная диффузия определяет миграцию атомов к дефектам, которые являются ловушками. Далее ловушки-дефекты, мигрируя, переносят накопленные в них газы и другие компоненты. Следовательно, выделяемый (эманлирующий) из минерала газ является газом ловушек, промигрировавших до более крупных пор, капилляров или свободной поверхности минерала. Энергия активации выхода атома  $Rn$  из такой ловушки может оказаться больше энергии активации процесса миграции ловушки. В таких условиях для возникновения миграции необходимо наличие достаточного количества дефектов в минералах [12]. Дефекты в твердых телах присутствуют всегда, но кроме этого при пространственно-временных вариациях деформационного поля их количество может меняться. Так же может изменяться количество и объем магистральных (более крупных) пор и капилляров. В работе [35] показано, что перенос благородных газов с дефектами может активироваться не только повышением температуры, но и механического напряжения. Результатом изменения деформационного поля твердых пород и активации переноса  $Rn$  в минералах становится формирование радоновых аномалий в газах, растворенных в подземных водах.

В последнее десятилетие появились работы, в которых на основании изменения гидрохимического состава воды показаны предсейсмические и постсейсмические эффекты смещения подземных вод, зависящие от гидравлических свойств подземного резервуара [36, 37]. За основу берется модель, когда существуют две системы подземных вод со значительным различием гидрогеохимического состава, но гидравлически слабо связанных через область макронарушений, которая обеспечивает их смещения. В таком случае на стадии подготовки землетрясения при изменении напряженно-деформированного состояния блока геосреды может происходить поступление воды с повышенным содержанием  $Rn$  по слабопроницаемым блокам в более поверхностный горизонт.

Подтверждением подобных процессов является работа [38], в которой рассмотрены результаты непрерывного температурного мониторинга в скважине на о. Кунашир. На глубинах 20-240 м были выявлены неперіодические температурные колебания, которые авторы связывают с изменениями порового давления, обусловленными деформациями земной коры и вызывающими изменения в режиме подземных вод с возникновением перетоков. Авторы указывают, что если протяженность водоносного горизонта существенно больше области, охваченной деформациями при подготовке ЗТ, то изменение в этой области порового давления может распространяться по водоносному горизонту далеко за ее пределы, причем отклик зависит от взаимного расположения очага готовящегося землетрясения и пункта регистрации в тектонической схеме региона.

Общее решение рассмотренной выше задачи сводится к поиску зависимости приращения концентрации  $Rn$  от времени. Воздействие импульса напряжений или впрыск в гидросистему некоторого объема воды с повышенным содержанием  $Rn$  могут реализоваться по разным законам: единичный импульс – дельта-функция Дирака; продолжительное постоянное воздействие с резким фронтом роста напряжения; линейно увеличивающееся воздействие с резкой ступенькой в конце. Для этих вариантов в работе [17] был рассчитан отклик приращения  $Rn$  в водном потоке. В случае воздействия прямоугольного импульса решение задачи представлено в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta C(t) = 0, t \leq 0 \\ \Delta C(t) = \Delta C_{max}(1 - e^{-\Lambda t}), 0 < t < t_s \\ \Delta C(t) = \Delta C_{max}(1 - e^{-\Lambda t_s})e^{-\Lambda(t-t_s)}, t \geq t_s \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\Lambda = \lambda_a + \lambda_w + \lambda_p$  - обобщенный кинетический параметр системы  $c^{-1}$ ;  $\lambda_a$  - постоянная, характеризующая абсорбцию на стенках капилляров;  $\lambda_w = Q/V$  - характеристика пропускной способности гидрогеологической системы,  $Q$  - расход потока в системе,  $V$  - водообменный объем системы;  $\lambda_p$  - постоянная распада радона.

## Предвестниковые аномалии типа Б в поле подпочвенного радона, зарегистрированные на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне

Предвестники землетрясений типа Б по форме записи в работах [28, 30] объясняются моделью приращения  $Rn$  в потоке воды, разработанной в работах [12, 17]. Первая аномалия типа Б была зарегистрирована перед Кроноцким землетрясением

05 декабря 1997 г. с  $M = 7.7$  в единственном пункте на тот период (PRTR), расположенном в Паратунском грабене (рис. 2) [39, 40].

К моменту написания статьи были зарегистрированы еще три аномалии типа Б перед землетрясениями (ЗТ) с  $M \geq 5.5$  в двух пунктах (PRTR, INSR), строение верхней толщи грунта в которых и их устройство описаны в работе [10]. Эпицентры землетрясений, предварявшихся аномалиями типа Б, показаны на рис. 2. Параметры ЗТ и их предвестниковых аномалий приведены в табл. 1, в которой землетрясения пронумерованы по времени их возникновения.

С использованием решения задачи математической модели переноса  $Rn$  в водной среде с полным поперечным перемешиванием (5) рассчитывался теоретический отклик и проводилось сравнение формы теоретических и экспериментальных кривых  $\Delta C$  нормированных на максимум. Методом подбора обобщенного кинетического параметра системы  $\Lambda$  находилось наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных кривых (рис. 3).

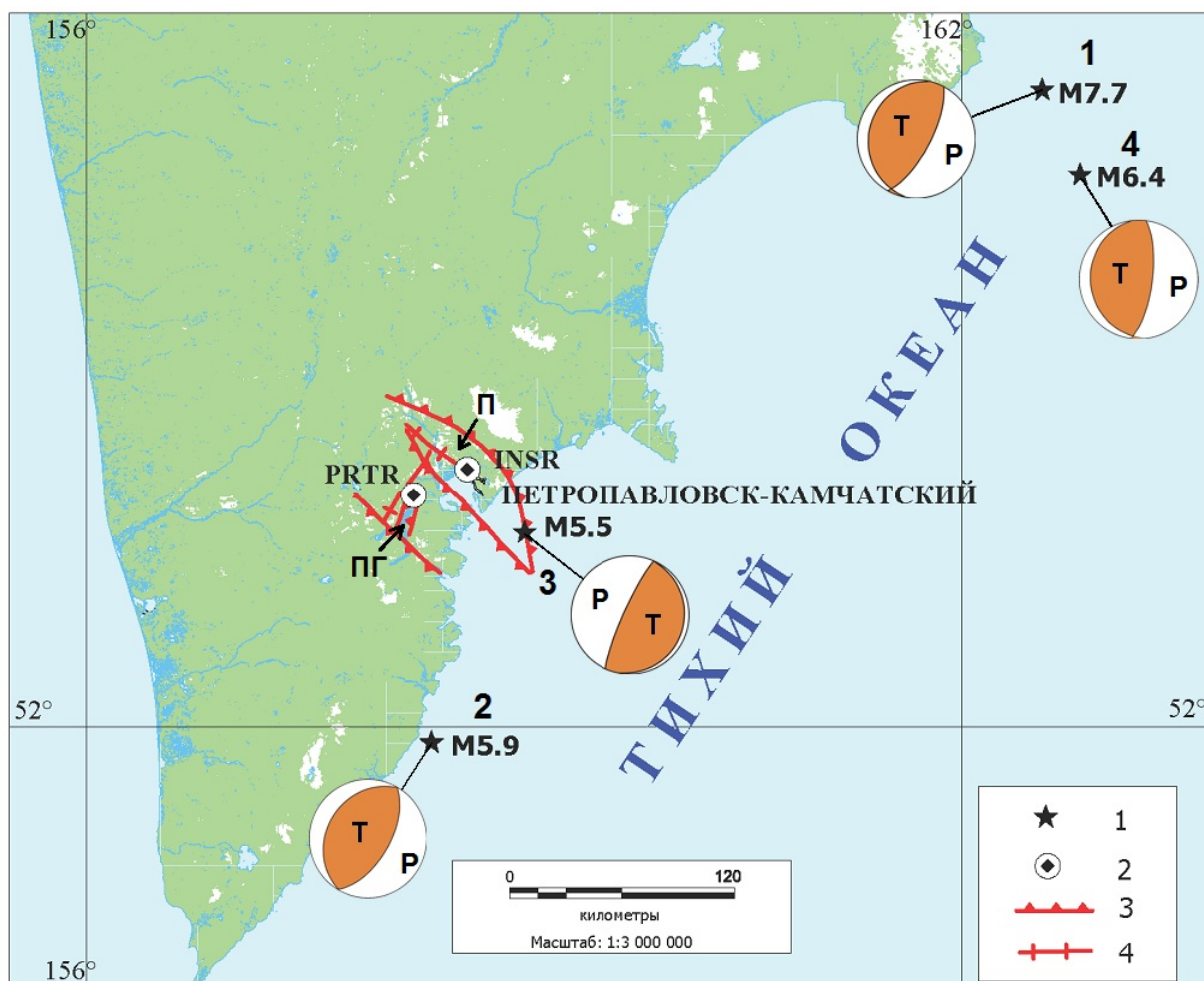


Рис. 2. Карта расположения пунктов регистрации, на которых были зарегистрированы предвестниковые аномалии типа Б, эпицентры землетрясений и их механизмы. 1 - эпицентры землетрясений (таблица 1); 2 - пункты регистрации ОА  $Rn$ ; 3 - наиболее крупные разломы; 4 - разломы второго порядка (по схеме, составленной С.В. Попруженко и С.Е. Апрельковым, 1997 г.). ПГ - Паратунский грабен, П - Петропавловский горст

Исходя из формы зарегистрированных аномалий и теоретических кривых, время действия прямоугольного импульса напряжений можно принять для ЗТ\_1 8, для ЗТ\_3 трое суток и для ЗТ\_4 около суток (черные прямоугольники на рис. 3). В первом случае, по-видимому, импульс напряжения состоял из двух частей, но для упрощения задачи рассматривался равномерный прямоугольный импульс с максимальной амплитудой. Если пренебречь постоянной, характеризующей абсорбцию на стенках капилляров  $\lambda_a$  и учесть что постоянная распада радона  $\lambda_p = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ , то  $\Lambda$ , в первую очередь, определяется пропускной способности всей гидрогеологической системы района пункта регистрации.

Таблица

### Основные параметры землетрясений и их предвестниковых аномалий типа Б

№	Дата землетрясения	$M$	$R$ , км	$H$ , км	$t_{АН}$	$t_{ynp}$	$\delta\%$	$\Lambda$ , $\text{c}^{-1}$	Пункт регистрации
1	Кроноцкое землетрясение, 5.12.1997 г.	7.7	402	33	11	28	250	0.03	Единственный пункт PRTR
2	18.09.2008 г.	5.9	112	35	23	45	25	0.002/ 0.025	INSR
3	19.02.2015 г.	5.5	56	82	5	7	20	0.06	PRTR
4	20.03.2016 г.	6.4	311	30	4	30	100	0.04	INSR

Примечание.  $M$  – магнитуда по National Earthquake Information Center (NEIC);  $R$  – расстояние от пункта регистрации до эпицентра землетрясения,  $H$  – глубина очага землетрясения,  $t_{АН}$  – длительность аномалии, сутки;  $t_{ynp}$  – время упреждения,  $\delta\%$  – относительная амплитуда аномалии,  $\Lambda$  – обобщенный кинетический параметр.

Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных кривых наблюдалось: для Кроноцкого землетрясения при  $\Lambda_1 = 0.03 \text{ c}^{-1}$  с коэффициентом корреляции  $r_1 = 0.93$ , для ЗТ\_3 при  $\Lambda_3 = 0.06 \text{ c}^{-1}$  и  $r_3 = 0.99$ , для ЗТ\_4 при  $\Lambda_4 = 0.04 \text{ c}^{-1}$  и  $r_4 = 0.96$ .

По форме предвестниковые аномалии ЗТ\_1 и 3, зарегистрированные в пункте PRTR, весьма похожи. На основании кинематических и динамических параметров, с учетом их магнитуды ( $M_1 = 7.7$ ,  $M_3 = 5.5$ ) и эпицентральных расстояний, можно говорить о некотором подобии этих предвестниковых аномалий:  $t_{АН1}/t_{АН3} = 2.2$ ,  $t_{ynp1}/t_{ynp3} = 4.0$ ,  $\delta_1/\delta_3 = 12.5$ .

Согласно работе [41], в районе Паратунской гидротермальной системы, где расположен пункт PRTR, продуктивный геотермальный резервуар с температурой  $75^\circ\text{C}$  находится на отметке -750 м.абс. Поэтому, вероятность его гидравлической связи через зону макронарушений, которая обеспечивает процесс смешивания, весьма велика. При определенных условиях, даже слабые изменения напряженно-деформированного состояния геосреды могут приводить к тому, что гидротермальные воды, обогащенные растворенным  $Rn$ , могут проникать в более поверхностный горизонт и формировать предвестниковые аномалии. В пользу этого говорит и то, что в первых двух слоях содержание  $^{226}\text{Ra}$  не более 10 Бк/кг, и поэтому повышенная ОА  $Rn$  в пункте PRTR в зоне аэрации, может обеспечиваться только за счет смешения поверхностных вод с глубинными, имеющие повышенное содержание  $Rn$ . Действительно по георадарным данным в районе расположения датчиков выделяется разуплотненный



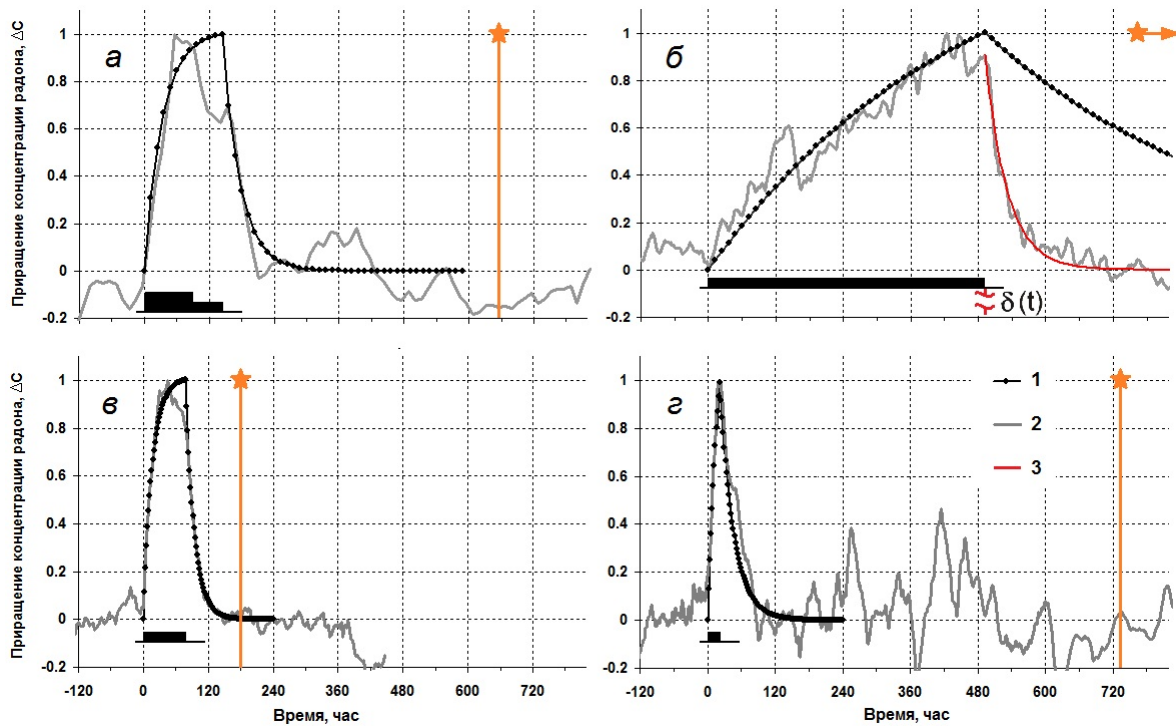


Рис. 3. Зарегистрированные в подпочвенном радоне предвестниковые аномалии типа Б. Все кривые нормированы на максимум. Черным прямоугольником отмечено время воздействия на грунт напряжения с резким фронтом, звездочкой отмечен момент возникновения землетрясения: а – Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с  $M = 7.7$ ; б – землетрясение 18 сентября 2008 г. с  $M=5.9$ ; в – землетрясение 19 февраля 2015 г. с  $M = 5.5$ ; г – землетрясение 20 марта 2016 г. с  $M=6.4$ . 1 - модельные кривые, 2 - исходные данные, 3 – модельная кривая, второй участок,  $\delta(t)$  – единичный импульс напряжения отрицательной полярности (дельта-функция Дирака).

участок, к которому, по данным эманационной съемки, приурочена повышенная относительно средней ОА  $Rn$  в подпочвенном воздухе [10].

Аномалия зарегистрированная в пункте INSR перед ЗТ\_2 с  $M = 5.9$  с очагом в акватории, прилегающей к южной части Камчатки, имеет самые большие времена упреждения  $t_{уп} = 45$  суток и длительности  $t_{АН} = 23$  суток, по характеру поведения заднего фронта отличается от описанных выше аномалий. После прекращения воздействия импульса напряжения вместо расчетного плавного экспоненциального уменьшения наблюдается резкий экспоненциальный спад ОА  $Rn$  (рис. 3б). Разумным объяснением поведения кривой заднего фронта аномалии может следующее. Одновременно с прекращением воздействия импульса напряжения, возникает единичного импульс растяжения, что приводит к увеличению водного потока, приводящего к увеличению крутизны заднего фронта. Наиболее лучшее совпадение экспериментальной и расчетной кривой наблюдается для значений  $\Lambda_1 = 0.002 \text{ с}^{-1}$  и  $\Lambda_3 = 0.025 \text{ с}^{-1}$ , при  $r_{2008} = 0.96$ . После 23 суточного сжатия, приведшего к изменению гидрогеологических условий и впрыску воды с повышенным содержанием  $Rn$ , возник короткий импульс растяжения, прекративший поступление  $Rn$  и увеличивший пропускную способность гидрогеологической системы и скорость потока воды более чем на порядок.

Вторая аномалия с  $t_{АН} = 4$  суток и  $t_{уп} = 30$  суток, зарегистрированная в пункте INSR перед ЗТ\_4, имеет большое значение относительной амплитуды  $\delta = 100\%$  и быстрое нарастание переднего фронта (рис. 3г). Для нее наилучшее совпадение кривых наблюдается при  $\Lambda = 0.04 \text{ с}^{-1}$ . Время воздействия импульса, вызвавшего аномалию, оценивается менее суток, что при общей длительности аномалии хорошо согласуется с процессом последующей релаксации (задний фронт аномалии) в течение 3 суток вследствие естественного распада  $Rn$  в потоке. Исходя из строения верхней толщи грунта в этом пункте, обводненные обвальное-взрывные отложения ниже уровня грунтовых вод являются эмаллирующим горизонтом, который подвергся воздействию области изменения порового давления распространяющейся по водоносному горизонту, что привело к формированию короткой и по форме близкой к импульсной аномалии.

Следует отметить, что единственный постсейсмический отклик в поле подпочвенного радона зафиксирован в этом пункте после глубокого Жупановского землетрясения с  $M = 7.2$ . С учетом данных о строении верхнего слоя толщи в данном пункте, можно предположить, что сейсмическое воздействие Жупановского землетрясения на обводненный слой грунта могло вызвать изменение его пористости и проницаемости. Следствием этого стал выход радона из ранее закрытых мелких пор в систему более крупных неоднородностей порового пространства, что привело к увеличению потока растворенного радона к границе уровня грунтовых вод [42].

## Заключение

Сравнения экспериментальных и модельных кривых предвестниковых аномалий типа Б подтверждают возможность их возникновения по модели отклика концентрации  $Rn$  в водной среде с полным поперечным перемешиванием на воздействие прямоугольного импульса напряжения.

Различия по амплитуде, длительности и времени упреждения, а так же подобию двух аномалий, зарегистрированных в пункте PRTR указывает на различную реакцию поля подпочвенного радона на изменение напряженно-деформированного состояния геосреды в пунктах в зависимости от условий миграции радона к дневной поверхности. Кроме этого пункты PRTR и INSR располагаются в разных структурных элементах района побережья Авачинского залива, которые разделены существенными нарушениями земной коры, что так же влияет на чувствительность гидрогеологической системы на процессы подготовки землетрясения в разных пространственных областях Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

Возникновение аномалий можно объяснить процессами смешивания или инъекции, под воздействием импульсов напряжения, ранее изолированных насыщенных радоном вод в поверхностные горизонты, где по зонам разуплотнения водный поток способен достигнуть области установки датчиков. Предполагается, что деформационные процессы, возникающие при подготовке землетрясения, изменяя напряженно-деформированное состояние среды в области будущего очага, способны воздействовать на водоносные горизонты и это воздействие распространяется на расстояния, значительно превышающие указанную область. Это воздействие может диссипировать в разломных зонах, снижая чувствительность пункта регистрации, или наоборот, усиливаться при наличии большого гидротермального резервуара, выступающего в роли объемного деформографа. Исходя из таких представлений объясняется

различие в отклике концентрации радона в пунктах регистрации на подготовку землетрясений с очагами в разных областях сейсмогенной зоны.

## Список литературы

- [1] Граммаков А. Г., Никонов А. И., Тарфеев Г. П., *Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд*, Госгеолтехиздат, М., 1957, 610 с. [Grammakov A. G., Nikonov A. I., Tarfeev G. P., *Radiometricheskie metody poiskov i razvedki uranovyh rud*, Gosgeoltekhizdat, M., 1957, 610 pp.]
- [2] Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н., *Радиоактивные методы разведки*, Недра, Л., 1965, 759 с. [Novikov G. F., Kapkov YU. N., *Radioaktivnye metody razvedki*, Nedra, L., 1965, 759 pp.]
- [3] Рудаков В. П., *Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ*, Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук, М., 1992, 37 с. [Rudakov V. P., *Dinamika polej podpochvennogo radona sejsmoaktivnyh regionov SNG*, Avtoref. diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk, M., 1992, 37 pp.]
- [4] Булашевич Ю. П. и др., “Изменение концентрации радона как предвестник горных ударов в глубоких шахтах”, *Горный журнал*, 1996, № 6, 19–22. [Bulashevich YU. P. i dr., “Izmenenie koncentracii radona kak predvestnik gornyh udarov v glubokih shahtah”, *Gornyj zhurnal*, 1996, № 6, 19–22].
- [5] Уткин В. И., Юрков А. К., “Радон и проблема тектонических землетрясений”, *Вулканология и сейсмология*, 1997, № 4, 82–94. [Utkin V. I., Yurkov A. K., “Radon i problema tektonicheskikh zemletryasenij”, *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 1997, № 4, 82–94].
- [6] Фирстов П. П., “Мониторинг объемной активности подпочвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) на Паратунской геотермальной системе в 1997–1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки”, *Вулканология и сейсмология*, 1999, № 6, 22–31. [Firstov P. P., “Monitoring ob'emnoj aktivnosti podpochvennogo radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) na Paratunskoj geotermal'noj sisteme v 1997–1998 gg. s cel'yu poiska predvestnikov sil'nyh zemletryasenij Kamchatki”, *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 1999, № 6, 22–31].
- [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, 26–41. [Firstov P. P., Rudakov V. P., “Rezul'taty registracii podpochvennogo radona v 1997–2000 gg. na Petropavlovsk-Kamchatskom geodinamicheskom poligone”, *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 2003, № 1, 26–41].
- [8] 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, 74–77. [Yakovleva V. S., Karataev V. D., “Plotnost' potoka radona s poverhnosti zemli kak vozmozhnyj indikator izmenenij napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya geologicheskoy sredy”, *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 2007, № 1, 74–77].
- [9] Ляшук А. И., Павлович В. Н., Руссов В. Д., “Мониторинг концентрации радона как предвестник землетрясений в районе гор Вранча”, *Геофизический журнал*, **30**:2 (2008), 63–74. [Lyashchuk A. I., Pavlovich V. N., Russov V. D., “Monitoring koncentracii radona kak predvestnik zemletryasenij v rajone gor Vrancha”, *Geofizicheskij zhurnal*, **30**:2 (2008), 63–74].
- [10] Фирстов П. П., Макаров Е. О., Акбашев Р. Р., “Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений”, *Сейсмические приборы*, **51**:1 (2015), 60–80. [Firstov P. P., Makarov E. O., Akbashev R. R., “Monitoring koncentracii pochvennyh gazov na Petropavlovsk-Kamchatskom geodinamicheskom poligone v svyazi s prognozom sil'nyh zemletryasenij”, *Sejsmicheskie pribory*, **51**:1 (2015), 60–80].
- [11] Swolfs H. S., *Stress-monitoring system for earthquake prediction*, Report TR, Terra-Tek, Salt Lake City, 1976.
- [12] Гудзенко В. В., Дубинчук В. Т., *Изотопы радия и радон в природных водах*, Наука, М., 1987, 45 с. [Gudzenko V. V., Dubinchuk V. T., *Izotopy radiya i radon v prirodnyh vodah*, Nauka, M., 1987, 45 pp.]

- [13] Бондаренко В. М., Иванова Т. М., “Перенос радона в горном массиве: модели и экспериментальные данные”, *Геология и разведка*, 1999, № 4, 96–107. [Bondarenko V. M., Ivanova T. M., “Perenos radona v gornom massive: modeli i ehksperimental’nye dannye”, *Geologiya i razvedka*, 1999, № 4, 96–107].
- [14] Паровик Р. И., *Математическое моделирование неклассической теории эманационного метода*, КамГУ им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский, 2014, 80 с. [Parovik R. I., *Matematicheskoe modelirovaniya neklassicheskoy teorii ehmanacionnogo metoda*, KamGU im. V. Beringa, Petropavlovsk-Kamchatskij, 2014, 80 pp.]
- [15] Нафикова А. Р. и др., “Сравнительное сопоставление данных вычислительного и натурального экспериментов по исследованию процессов переноса радона в кусочно-однородных горизонтально-слоистых средах”, *АНРИ*, 2016, № 4(87), 67–72. [Nafikova A. R. i dr., “Srvavnitel’noe sopostavlenie dannyh vychislitel’nogo i naturного ehksperimentov po issledovaniyu processov perenosa radona v kusochno-odnorodnyh gorizonta’no-sloistyh sredah”, *ANRI*, 2016, № 4(87), 67–72].
- [16] Varhegyi A., Baranyi I., Somogyi G. A., “Model for the vertical subsurface radon transport in “geogas”microbubbles”, *Geophys. Transactions*, **32**:3 (1986), 235–253.
- [17] Dubinchuk V. T., “Radon as a precursor of earthquakes”, *Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption*, Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, 9-12 September 1991, Vienna, 1991, 6–22.
- [18] Etiope G., Martinelli G., “Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview”, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **129** (2002), 185–204.
- [19] Yakovleva V. S., Parovik R. I., “Solution of diffusion-advection equation of radon transport in many-layered geological media”, *Nukleonika*, **55**:4 (2010), 601-606.
- [20] Горбушина Л. В., Тыминский В. Г., Спиридонов А. И., “К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозировании землетрясений”, *Советская геология*, 1972, № 1, 153–156. [Gorbushina L. V., Tyminskij V. G., Spiridonov A. I., “K voprosu o mekhanizme obrazovaniya radiogidrogeologicheskikh anomalij v sejsmoaktivnom rajone i ih znachenie pri prognozirovanii zemletryasenij”, *Sovetskaya geologiya*, 1972, № 1, 153–156].
- [21] Грацинский В. Г., Горбушина Л. В., Тыминский В. Г., “О выделении радиоактивных газов из образцов горных пород под действием ультразвука”, *Физика Земли*, 1967, № 10, 91–94. [Gracinskij V. G., Gorbushina L. V., Tyminskij V. G., “O vydelenii radioaktivnyh gazov iz obrazcov gornyh porod pod dejstviem ul’trazvuka”, *Fizika Zemli*, 1967, № 10, 91–94].
- [22] King C. Y., “Gas-geochemical approaches to earthquake prediction”, *Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption*, Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, 9-12 September 1991, Vienna, 1991, 22-36.
- [23] Козлова И. А., Юрков А. К., “Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона”, *Уральский геофизический вестник*, 2016, № 1, 35–39. [Kozlova I. A., Yurkov A. K., “Otrazhenie posledovatel’nyh sejsmicheskikh sobytij v pole ob’emnoj aktivnosti radona”, *Ural’skij geofizicheskij vestnik*, 2016, № 1, 35–39].
- [24] Барсуков В. Л. и др., *Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений / Гидрогеохимические предвестники землетрясений*, Наука, М., 1985. [Barsukov V. L. i dr., *Znachenie gidrogeohimicheskikh metodov dlya kratkosrochnogo prognoza zemletryasenij / Hidrogeohimicheskie predvestniki zemletryasenij*, Nauka, M., 1985].
- [25] Понамарев А. С., “Фракционирование в гидротерме как потенциальная возможность формирования предвестников землетрясений”, *Геохимия*, 1989, № 5, 714-724. [Ponamarev A. S., “Frakcionirovanie v gidroterme kak potencial’naya vozmozhnost’ formirovaniya predvestnikov zemletryasenij”, *Geohimiya*, 1989, № 5, 714-724].
- [26] Макаров Е. О., *Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана*, автореф. дис. на соискание степени канд. физ.-мат. наук, Петропавловск-Камчататский, 2017, 22 с. [Makarov E. O., *Otklik v dinamike podpochvennogo radona na podgotovku sil’nyh zemletryasenij Kamchatki i severo-zapadnoj okrainy Tihogo okeana*, avtoref. dis. na soiskanie stepeni kand. fiz.-mat. nauk, Petropavlovsk-Kamchatatskij, 2017, 22 pp.]
- [27] Макаров Е. О., Фирстов П. П., Волошин В. Н., “Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий

- сильных землетрясений Южной Камчатки”, *Сейсмические приборы*, **48**:1 (2012), 5-14. [Makarov E. O., Firstov P. P., Voloshin V. N., “Apparaturnyj kompleks dlya registracii koncentracii podpochvennyh gazov s cel’yu poiska predvestnikovyh anomalij sil’nyh zemletryasenij YUzhnoj Kamchatki”, *Sejsmicheskie pribory*, **48**:1 (2012), 5-14].
- [28] Фирстов П. П., Макаров Е. О., “Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры”, *Сейсмические приборы*, **51**:4 (2015), 58-80. [Firstov P. P., Makarov E. O., “Reakciya podpochvennogo i rastvorennogo v podzemnyh vodah radona na izmenenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemnoj kory”, *Sejsmicheskie pribory*, **51**:4 (2015), 58-80].
- [29] Фирстов П. П. и др., “Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне”, *Геосистемы переходных зон*, **2**:1 (2018), 16–32. [Firstov P. P. i dr., “Poisk predvestnikovyh anomalij sil’nyh zemletryasenij po dannym monitoringa podpochvennyh gazov na Petropavlovsk-Kamchatskom geodinamicheskom poligone”, *Geosistemy perekhodnyh zon*, **2**:1 (2018), 16–32].
- [30] Фирстов П. П. и др., “Особенности одного из типов предвестниковых аномалий землетрясений в подпочвенном радоне на пункте Паратунка (Камчатка)”, *АНРИ*, 2016, № 4(87), 55–62. [Firstov P. P. i dr., “Osobennosti odnogo iz tipov predvestnikovyh anomalij zemletryasenij v podpochvennom radone na punkte Paratunka (Kamchatka)”, *ANRI*, 2016, № 4(87), 55–62].
- [31] Паскарь С. Ю., Паровик Р. И., “Математическое моделирование переноса радона в влагонасыщенном грунте”, *Международный студенческий научный вестник*, 2015, № 6, 1-8. [Paskar’ S. YU., Parovik R. I., “Matematicheskoe modelirovanie perenosa radona v vlagonasyschennom grunte”, *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*, 2015, № 6, 1-8].
- [32] Новиков Г. Ф., *Радиометрическая разведка*, Наука, Л., 1989, 407 с. [Novikov G. F., *Radiometrisheskaya razvedka*, Nauka, L., 1989, 407 pp.]
- [33] Рудаков В. П., *Эманационный мониторинг геосред и процессов*, Научный мир, М., 2009, 175 с. [Rudakov V. P., *EHmanacionnyj monitoring geosred i processov*, Nauchnyj mir, M., 2009, 175 pp.]
- [34] Огильви А. Н., “О каптаже радиоактивных вод и о колебаниях их радиоактивности в зависимости от дебита”, *Изд. Бальнеологич. ин-та КМВ*, **6** (1928), 85-93. [Ogil’vi A. N., “O kartazhe radioaktivnyh vod i o kolebaniyah ih radioaktivnosti v zavisimosti ot debita”, *Izd. Bal’neologich. in-ta KMV*, **6** (1928), 85-93].
- [35] Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е., *Кинетическая природа прочности твердых тел*, Наука, М., 1976, 560 с. [Regel’ V. R., Slucker A. I., Tomashevskij E. E., *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdyh tel*, Nauka, M., 1976, 560 pp.]
- [36] Копылова Г. Н., Болдина С. В., “Аномальные изменения химического состава подземных вод в связи с Камчатским землетрясением 02.03.1992 г. ( $M_w = 6.9$ )”, *Геофизические исследования*, **13**:1 (2012), 39-49. [Kopylova G. N., Boldina S. V., “Anomal’nye izmeneniya himicheskogo sostava podzemnyh vod v svyazi s Kamchatskim zemletryaseniem 02.03.1992 g. ( $M_w = 6.9$ )”, *Geofizicheskie issledovaniya*, **13**:1 (2012), 39-49].
- [37] Wang R. et al., “Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes”, *Geophys. J. Int.*, **157** (2004), 717-726.
- [38] Демежко Д. Ю. и др., “О природе температурных вариаций в скважине kun-1 (о. Кунашир)”, *Геология и геофизика*, **53**:3 (2012), 406–414. [Demezhko D. YU. i dr., “O prirode temperaturnyh variacij v skvazhine kun-1 (o. Kunashir)”, *Geologiya i geofizika*, **53**:3 (2012), 406–414, 170–176 pp.]
- [39] Фирстов П. П., “Изменение объемной активности радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) в подпочвенном газе перед Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г. с  $M = 7.7$  в районе Паратунского месторождения гидротермальных вод (Камчатка)”, *Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.*, Изд-во КГАРФ, Петропавловск-Камчататский, 1998, 170–176 с. [Firstov P. P., “Izmenenie ob’emnoj aktivnosti radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) v podpochvennom gaze pered Kronockim zemletryaseniem 5 dekabrya 1997 g. s  $M = 7.7$  v rajone Paratunского mestorozhdeniya gidrotermal’nyh vod (Kamchatka)”, *Kronockoe zemletryasenie na Kamchatke 5 dekabrya 1997 g.*, Izd-vo KGARF, Petropavlovsk-Kamchatatskij, 1998].

- [40] Гусев А.А. и др., “Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект”, *Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.*, Изд-во КГАРФ, Петропавловск-Камчататский, 1998, 32–54 с. [Gusev A.A. i dr., “Sil’noe Kronockoe zemletryasenie 5 dekabrya 1997 goda: osnovnye dannye, sejsmichnost’ ochagovoj zony, mekhanizm ochaga, makrosejsmicheskij ehffekt”, *Kronockoe zemletryasenie na Kamchatke 5 dekabrya 1997 g.*, Izd-vo KGARF, Petropavlovsk-Kamchatatskij, 1998, 32–54 pp.]
- [41] Kiryukhin A.V. et al., “Thermal-permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia”, *Geothermics*, **70** (2017), 47–61.
- [42] Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П., “Аномалии в динамике подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне во временной окрестности глубокого Жупановского землетрясения 30.01.2016 г.,  $M = 7.2$ ”, *Вулканология и сейсмология*, 2018, № 5. [Firstov P.P., Makarov E.O., Gluhova I.P., “Anomalii v dinamike podpochvennyh gazov na Petropavlovsk-Kamchatskom geodinamicheskom poligone vo vremennoj okrestnosti glubokogo Zhupanovskogo zemletryaseniya 30.01.2016 g.,  $M = 7.2$ ”, *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 2018, № 5].

**Для цитирования:** Макаров Е.О., Фирстов П.П. Модель некоторых предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона землетрясений с  $M \geq 5.5$  на полуострове Камчатка // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 4(24). С. 133-147. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-133-147

**For citation:** Makarov E. O, Firstov P. P. Model of some predictive anomalies in the field of subsoil radon of earthquakes with  $M \geq 5.5$  in kamchatka peninsula, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **24**: 4, 133-147. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-133-147

Поступила в редакцию / Original article submitted: 28.06.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-133-147

MSC 86A17

## **MODEL OF SOME PREDICTIVE ANOMALIES IN THE FIELD OF SUBSOIL RADON OF EARTHQUAKES WITH $M \geq 5.5$ IN KAMCHATKA PENINSULA \***

**E. O. Makarov<sup>1,2</sup>, P. P. Firstov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kamchatka Branch of Federal Research Center Geophysical Survey,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Piypa b-r., 9, Russia

<sup>2</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky,  
Pogranichnaya st., 4, Russia

E-mail: ice@emsd.ru firstov@emsd.ru

At the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic test site, for almost 20 years, a network of monitoring stations for subsoil radon has been operating. During the work, a number of anomalies were registered, which preceded earthquakes with a magnitude  $M > 5$ , which by morphological features are divided into two types (A, B). The paper analyzed in detail the mechanism of occurrence of type B anomalies on the basis of a mathematical model for the propagation of radon in a stream of groundwater with complete transverse mixing. An attempt was made to link some features of the appearance of predictive anomalies of type B with the areas of occurrence of earthquakes.

*Key words: radon, mathematical modeling, radon anomaly, earthquake prediction, Kamchatka, radon monitoring, geothermal reservoir, deformation*

© Makarov E. O., Firstov P. P., 2018

---

\*This work was supported by the RFBR grant No 16-05-00162