

## МОДЕЛЬ ОДНОГО ИЗ ТИПОВ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ В ПОЛЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА

*Фирстов П.П.<sup>1</sup>, Паскарь С.Ю.<sup>2</sup>, Паровик Р.И.<sup>2,3</sup>, Макаров Е.О.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Камчатский филиал геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,*

<sup>1</sup>*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,  
г. Петропавловск-Камчатский,*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН, Камчатский край, с. Паратунка,  
paskarysy@mail.ru*

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс миграции радона в верхней толще горных пород в зависимости от литологического состава приповерхностных отложений интенсивно начал изучаться с начала 40 годов прошлого века с целью отработки методики поиска месторождений урановых руд [1-4]. Также этот вопрос представляет большой интерес для оценки радоновой опасности в нижних этажах жилых зданий и промышленных сооружений [5-7]. В последние несколько десятков лет изучение механизма переноса радона в грунтах обсуждается в связи прогнозом горных ударов в шахтах и сильных землетрясений [8-14].

Перемещение радона в поровом пространстве горных пород происходит благодаря двум основным механизмам транспорта – диффузионного и конвективного, на которые накладываются значительное количество факторов. Во-первых, геологическая среда является неоднородно-слоистой, с заметно различающимися физико-литологическими характеристиками каждого слоя, что значительно усложняет процесс миграции радона к дневной поверхности. Кроме того в зоне аэрации на миграцию радона влияют вариации метеорологических величин, а также изменения напряженно-деформированного состояния блока геосреды где расположен пункт регистрации.

Поэтому универсальная математическая модель, которая бы полно описывала процесс переноса радона в любых условиях и для различных геолого-литологических условий, пока не разработана. В тоже время для конкретных условий и при некоторых допущениях в первом приближении построено множество математических моделей процесса переноса радона [2-4,15].

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работает сеть пунктов регистрации подпочвенного радона с апертурой около 50 км с целью поиска предвестников землетрясений с магнитудой  $M > 5$ . Пункты сети расположены в различных геолого-тектонических условиях и с разными геолого-литологическим строением верхней толщи, где располагаются газоразрядные счетчики пассивной регистрации  $\beta$ -излучения радона и его короткоживущих продуктов распада [11-14]. Зарегистрировано несколько типов предвестниковых аномалий. Так как относительная амплитуда аномалий в большинстве случаев составляла 20-30%, то только по данным сети пунктов радонового мониторинга с апертурой  $\sim 50$  км их можно выделять на фоне сигнала с большим уровнем шума.

В данной работе рассмотрены две предвестниковых аномалии, для которых в первом приближении сделано математическое моделирование процесса их возникновения.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Опорный пункт мониторинга подпочвенного радона Паратунка (ПРТ) расположен в районе Паратунской геотермальной системы, которая располагается в районе одноименного грабена с мозаично - блоковой структурой верхнего яруса земной коры (рис.1а). Расположение пункта регистрации в зоне грабена с блоковой структурой и приуроченность его к хорошо развитой гидротермальной системе увеличивает геохимическую чувствительность выбранного пункта к геодинамическим процессам перед сильными землетрясениями Камчатки и, особенно, перед землетрясениями Авачинского залива. Пункт ПРТ расположен в узкой (300-400 м) долине ручья Коркина, трассирующей активный разлом. В 700 м от пункта ниже по течению ручья находятся естественные выходы гидротермальных вод с содержанием растворенного Rn  $\approx 10$  кБк/м<sup>3</sup> [14].

В ПРТ регистрация ведется в трех точках, расположение газоразрядных счетчиков в двух точках показано на рис. 2б. Полное описание аппаратного комплекса в пункте ПРТ дано в работе [13].

ПРТ\_1 – подсобное помещение, врезанное в склон, где ведется регистрация  $R_n$  в аллювиальных отложениях в зоне аэрации на глубине один метр от дна помещения и в воздухе. Регистрация ведется с помощью двухканального радиометра РЕВАР.

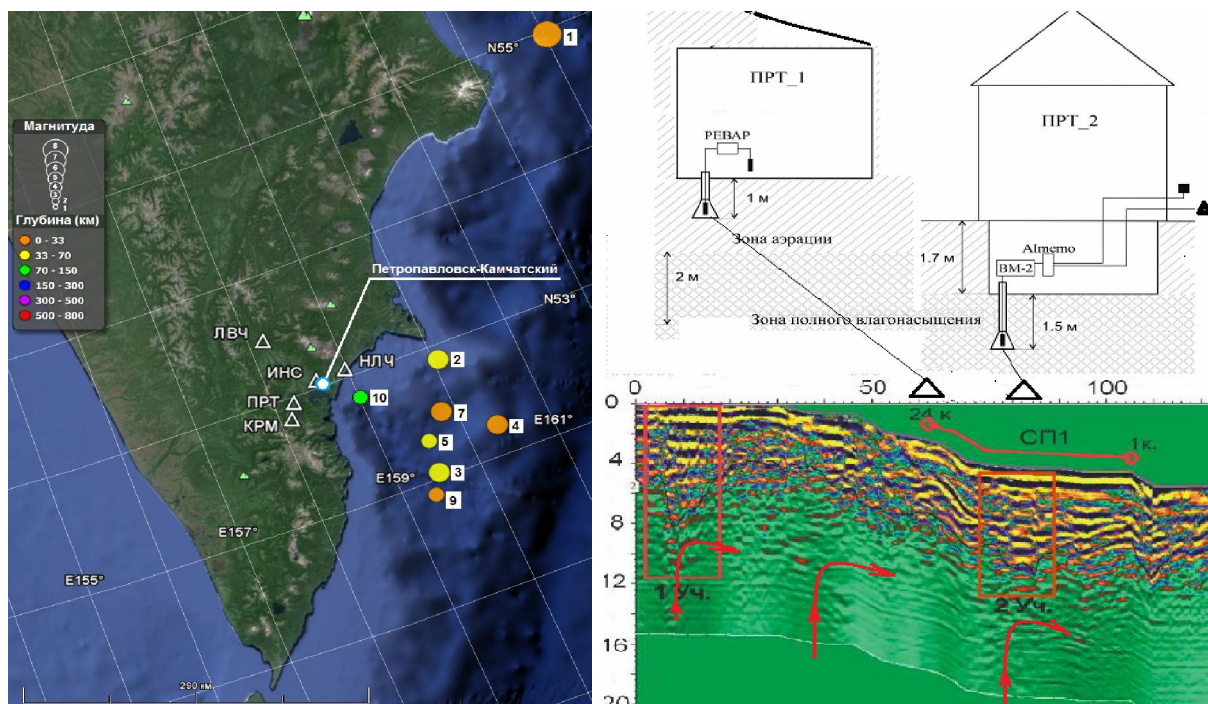


Рис. 1. Расположение пункта «Паратунка» на полуострове Камчатка и эпицентры Кроноцкого землетрясения 25.12.1995 г. с  $M=7.7$  и землетрясения в Авачинском заливе 19.02.2015 г. с  $M=5.5$  (а), схема расположения газоразрядных счетчиков в пункте ПРТ (б), георадарный профиль района расположения пункта ПРТ (в). Красными стрелками показан водоток, а квадратами выделены участки дизъюнктивных нарушений. ПРТ\_2 – подвал под домом глубиной 2.0 м. Здесь регистрация  $R_n$  ведется на глубине 3 м от дневной поверхности в зоне полного влагонасыщения с помощью автоматизированного комплекса регистрации концентрации почвенных газов (РКПГ), к которому подключены также датчики атмосферного давления и температуры воздуха.

С целью исследования строения верхней толщи в районе ПРТ было выполнено сейсмическое профилирование (СП) и георадиолокационный профиль (ГП). На рис. 3в, где приведена часть профиля длиной в 120 м вблизи точек регистрации радона. Вблизи ПРТ\_2 четко выделяется разуплотненный участок 2, который связывается с разломной зоной. По данным сейсмического профилирования по скоростным границам выделяются два слоя. Почвенно-пирокластический чехол мощностью  $h=1.8-2.7$  м и скоростью продольных волн  $V_p=228-366$  м/с и слой песчано-глинистых отложений аллювиального происхождения с  $h=1.6-9.5$  м и  $V_p=624-694$  м/с [13].

Две аномалии, зарегистрированные в точке ПРТ\_2 в зоне полного влагонасыщения, имели специфическую форму (рис.2). Перед Кроноцким землетрясением 5.02.1997 г. была зарегистрирована аномалия с временем упреждения  $t_{упр}=28$  суток и относительной амплитудой  $\delta = \left( \frac{A_{ан} - A_{фон}}{A_{фон}} \right) \cdot 100 =$

400%. Перед землетрясением 19.02.2015 г., с  $M=5.6$  предвестниковая аномалия с  $t_{упр}=7$  суток и  $\delta_{max}=20\%$ , была зарегистрирована в двух точках: в зоне полного влагонасыщения (ПРТ\_2), и в зоне аэрации, в точке расположенной в 23 м выше по склону (ПРТ\_1). В связи с тем, что в ПРТ\_1 слой аллювиально-делювиальных отложений больше по сравнению с ПРТ\_2, начало аномалии сдвинуто почти на 32 часа. По разности прихода аномалий скорость миграции радона к поверхности оценивается  $(1-3) \cdot 10^{-3}$  см/с.

На основании формы предвестниковых аномалий в работе [12] сделано предположение, что данные аномалии сформировались за счет деформационного воздействия на заключительной стадии подготовки землетрясений по механизму полного смещения согласно работе [20].

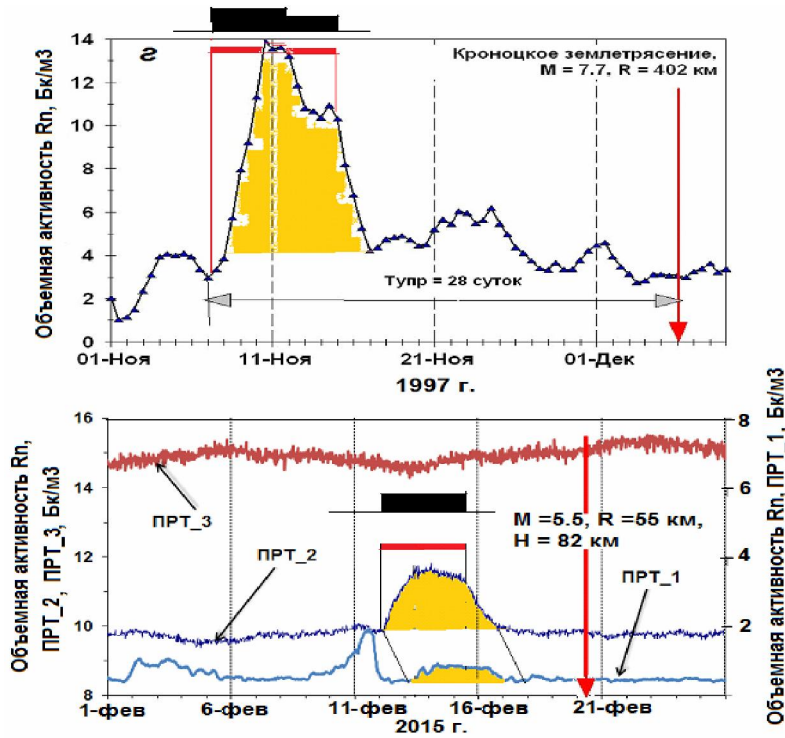


Рис. 2. Предвестниковые аномалии в поле подпочвенного радона в пункте ПРТ ОА перед Кроноцким землетрясением с 25.12.1995 г.  $M = 7.7$  на расстоянии 402 км (а) и перед землетрясением 19.02.2015 г. с  $M = 5.6$ , очаг которого располагался на глубине 82 км в 56 км от пункта (б).

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРЕНОСА РАДОНА ПОСРЕДСТВОМ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Для описания и прогноза поведения радона в грунтовых водах, а также для интерпретации данных изотопного опробования природных вод в 30-х годах прошлого века А.Н. Огильви [19] была разработана физико-математическая модель функционирования природной водной системы (ПВС) и переноса в ней радона, которая в дальнейшем

уточнялась и совершенствовалась. Напомним основы математической модели переноса радона в водной среде по [3].

Использовались следующие обозначения:  $M$ ,  $A$ ,  $C$  и  $a$  – суммарные содержания и активность на единицу объема среды  $V$ , концентрация и удельная активность радона в среде. Между величинами  $A$ ,  $M$ ,  $C$  и  $a$  существуют следующие соотношения:

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

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

В данной модели предполагается мгновенное полное поперечное перемешивание  $Rn$  и отсутствие перемешивания в продольном направлении, при этом скорость эманирования определяется следующим образом:

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

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

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

Ее решение с учетом условия (3), имеет вид:

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

здесь  $C_\infty = \frac{q_0}{\lambda_p}$ ,  $t = \frac{V_{\text{вод}}}{Q} = \tau_n(x)$  – время пребывания воды и радона в системе на участке длиной  $x$ ;

$t^* = l^*/v = V_{\text{вод}}/Q = \tau_n^*$  – время пребывания воды и радона в активной зоне;  $t - t^* = (x - l^*)/v = l/v = V_{\text{вод}}/Q = \tau_d$  – время движения воды и компонента до точки наблюдения, находящейся на расстоянии  $l$  от края активной зоны;  $V_{\text{вод}}(x) = xSn$  – объём (запас) воды в системе;  $V(x)$  – объём системы;  $n$  – пористость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе с помощью математического моделирования февпроцесса переноса радона в влагонасыщенном грунте исследованы экспериментальные данные динамики радона в пункте ПРТ на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне Южной Камчатке с ярко выраженной аномалией, предшествующей сильному землетрясению  $M=5.5$ . Можно сказать, что предложенный механизм моделей Огильви и Дубинчука, может корректно описывать такие аномалии. Продолжением статьи может являться разработка модели переноса радона с учетом зоны аэрации и согласования результатов моделирования с экспериментальными данными и классификация выявленных в них аномалий, предшествующих сильным землетрясениям Южной Камчатки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grammakov A. G. On the influence of some factors in the spreading of radioactive emanations under natural conditions // Zhur. Geofiziki. 1936. Vol. 6. P. 213–224.
2. Граммаков А. Г., Никонов А. И., Гарфеев Г. П. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 610 с.
3. Гудзенко В.В., Дубинчук В.Т. Изотопы радия и радон в природных водах. М.: Наука, 1987. 45 с.
4. Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Л.: Недра, 1965. 759 с.
5. Новиков Г. Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989. 407 с.
6. Яфасов А. Я., Мирахмедова Н. М., Яфасов А. А. Радоновое поле Ташкентского Мегалополиса // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2003. Т. 32, № 1. С. 29–33.
7. Смирнов С. Н., Герасимов Д. Н. Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений: Учебник для студентов вузов. М.: МЭИ, 2006. 325 с.
8. Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К., Николаев В. В. Изменение концентрации радона как предвестник горных ударов в глубоких шахтах // Горный журнал. 1996. № 6. С. 19–22.
9. Уткин В. И., Юрков А. К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 82–94.
10. Цапалов А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2011. Т. 61. № 3. С. 52–64.
11. 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. 1997. № 6. С. 33–43.
12. Фирстов П.П., Макаров О.Е. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // Сейсмические приборы. 2015. № 6. С. 6–10.
13. 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. 2014. Т.51. № 1. С. 60–70.
14. Фирстов П. П., Рудаков В. П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 99–107.
15. Яковлева В. С., Каратаев В. Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 74–77.
16. Лящук А. И., Павлович В. Н., Руссов В. Д. Мониторинг концентрации радона как предвестник землетрясений в районе гор Вранча // Геофизический журнал. 2008. Т. 30, № 2. С. 63–74.
17. Паровик Р.И. Математическое моделирование классической теории эманационного метода. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2014. 120 с.
18. Yakovleva V. S., Parovik R. I. Solution of diffusion-advection equation of radon transport in many-layered geological media // Nukleonika. 2010. Vol. 55, no. 4. P. 601–606.
19. Огильви А.Н. О каптаже радиоактивных вод и о колебаниях их радиоактивности в зависимости от дебита // Изд. Бальнеологич. ин-та КМВ. 1928. Т.6. С. 85 – 93.
20. 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, Austria: IAEA, 1993. P. 6–22.
21. Паровик Р.И. Математическое моделирование неклассической теории эманационного метода. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2014. 80 с.