

Один из возможных механизмов возникновения предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона перед сильными землетрясениями Камчатки**Е.О. Макаров^{1,2}, П.П. Фирстов¹**¹*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Пийта б-р, 9; e-mail: firstov@emsd.ru*²*Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Пограничная, 4*

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работает сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов. За время работы сети в поле подпочвенных газов были зарегистрированы аномалии, предвещающие сильные землетрясения с магнитудой $M > 5$. По морфологическим признакам они разделены на два типа А и Б. В работе предложено объяснение механизма возникновения аномалий типа Б на основании математической модели распространения радона в потоке подземных вод с полным поперечным перемешиванием.

С 1997 г. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работает сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов с целью поиска предвестников сильных землетрясений [2, 5]. 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 [7]. Это, как показывает многолетний опыт, 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.

На всех пунктах в качестве датчиков Rn используются газоразрядные счетчики (ГС) типа СБМ-19, позволяющие вести пассивную регистрацию Rn по β - излучению короткоживущих продуктов его распада с использованием автоматизированных комплексов регистрации концентрации подпочвенных газов (РКПГ) [3, 7]. 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 [6, 8]. В процессе распространения ДВ воздействуют на поле Rn и в зависимости от расположения пунктов регистрации относительно границ отдельных блоков и их геолого-тектонических условий отклик в динамике ОА Rn имеет различную форму (бухтообразные, ступенчатые), а также различную полярность [6]; другой тип Б - хорошо выделяемая на общем фоне аномалия с определенной формой, регистрируемая в одном пункте сети. По форме записи предвестники землетрясений типа Б можно объяснить моделью распространения радона в потоке воды, разработанной в работах [1, 9]. Впервые аномалия типа Б была зарегистрирована перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г. с $M = 7,7$. К настоящему времени аномалии типа Б зарегистрированы перед четырьмя землетрясениями (ЗТ). Параметры аномалий и соответствующих ЗТ приведены в таблице.

Две из них зарегистрированы в пункте «Паратунка» PRTR, расположенном в районе Паратунской геотермальной системы. По георадарным данным в районе расположения ГС в этом пункте выделяется разуплотненный участок, к которому, по

данным эманацонной съемки, также приурочена повышенная ОА Rn в почвенном воздухе. Исходя из того, что в первых двух слоях содержание ^{226}Ra не более 10 Бк/кг, то следует допустить, что регистрируемая ОА Rn на поверхности в пункте PRTR, обеспечивается коллектором ^{226}Ra в породах на больших глубинах.

Таблица. Основные параметры землетрясений и их предвестниковых аномалий типа Б.

№	Землетрясение, дата	M	R , км	H , км	$t_{ан}$, сутки	$t_{упр}$, сутки	$\delta\%$	Λ , с^{-1}	Примечание
1	Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г.	7,7	402	33	11	28	250	0,03	Регистрация в пункте ПРТ
2	Землетрясение 18 сентября 2008 г.	5,9	112	35	23	45	25	0,0022 / 0,025	Регистрация в пункте ИНС
3	Землетрясение 19 февраля 2015 г.	5,5	56	82	5	7	20	0,06	Регистрация в пункте ПРТ
4	Землетрясение 20 марта 2016 г.	6,4	311	30	4	30	100	0,04	Регистрация в пункте ИНС

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, $t_{упр}$ – время упреждения, $\delta\%$ – относительная амплитуда аномалии, Λ – обобщенный кинетический параметр.

Две других аномалии зарегистрированы в пункте INSR, организованном на базе скважины НИС-1 [3]. В пункте INSR по скоростным границам выделяются два слоя, почвенно-пирокластический чехол мощностью 1-3,3 м и переотложенные обвальновзрывные отложения, мощность которых может составлять 20–23 м с уровнем грунтовых вод на глубине 7-8 м.

Большое влияние на миграцию Rn, определяющее различия в отклике разных пунктов на подготовку сильных землетрясений, оказывают: расположение пунктов в различных структурных элементах побережья Авачинского залива; наличие зон разуплотнений, выступающие в роли проводящих коллекторов для флюидов и газов с больших глубин; наличие вертикальных, и горизонтальных неоднородностей верхнего слоя грунта; уровень грунтовых вод.

Для описания 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 [4], которая в дальнейшем была усовершенствована в работах [1, 9]. В общем, задача сводится к поиску зависимости приращения концентрации радона (ΔC) от времени в условиях воздействия импульса напряжений разных форм (единичный импульс – дельта-функция Дирака; продолжительное постоянное воздействие с резким фронтом роста напряжения; линейно увеличивающееся напряжение с резкой ступенькой в конце):

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

где: $\Lambda = \lambda_a + \lambda_w + \lambda_p$ – обобщенный кинетический параметр системы с^{-1} ; λ_a – постоянная, характеризующая абсорбцию на стенках капилляров; $\lambda_w = Q/V$ – постоянная, характеризующая пропускную способность гидрогеологической системы, Q – расход потока в системе, V – водообменный объем системы; λ_p – постоянная распада радона.

Если пренебречь постоянной, характеризующей абсорбцию на стенках капилляров λ_a и учесть что постоянная распада радона $\lambda_p=2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, то Λ , в первую очередь, определяется пропускной способности всей гидрогеологической системы района пункта регистрации.

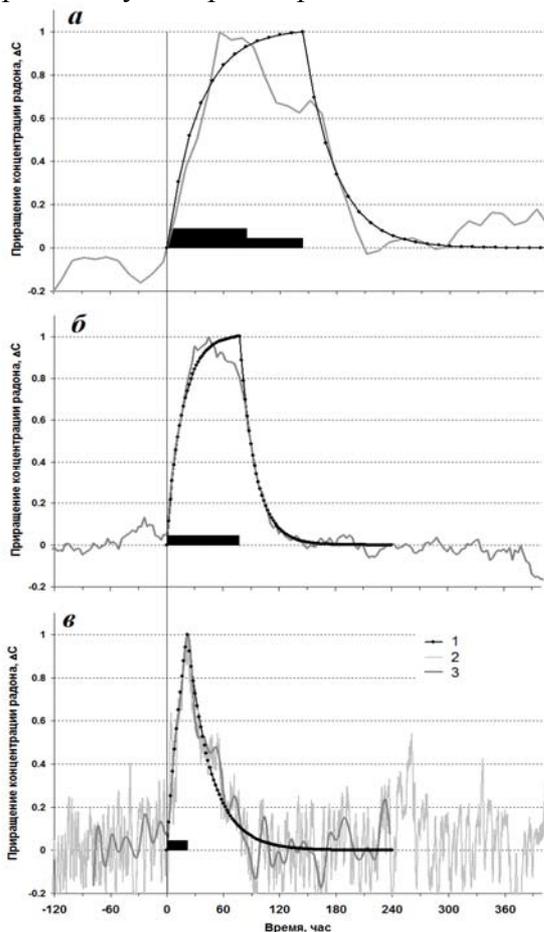


Рис. 1. Зарегистрированные в подпочвенном радоне предвестниковые аномалии типа Б. Все кривые нормированы на максимум. Черным прямоугольником отмечено время воздействия на грунт напряжения с резким фронтом. *а* – Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M = 7,7$, *б* – землетрясение Авачинского залива 19 февраля 2015 г. с $M = 5,5$, *в* – землетрясение 20 марта 2016 г. 1 – расчетные кривые, 2 – исходные данные, 3 – кривые, отфильтрованные фильтром высоких частот с граничной частотой $0,07 \text{ час}^{-1}$.

С использованием решения задачи математической модели переноса Rn в водной среде с полным поперечным перемешиванием были рассчитаны кривые для зарегистрированных в PRTR и INSR аномалий типа Б. Методом подбора получено наилучшее совпадение расчетных и экспериментальной кривых [6, 8] (Рис. 1).

Если исходить из формы зарегистрированных аномалий и теоретических кривых, то время действия прямоугольного импульса напряжений можно принять в первом случае 8, во втором 3 суток, в третьем около 1 суток (прямоугольники на рис. 1). В первом случае, по-видимому, импульс напряжения состоял из двух частей, но для упрощения задачи рассматривался равномерный прямоугольный импульс с максимальной амплитудой. От предыдущих случаев несколько отличается предвестник перед землетрясением 18 сентября 2008 г. с $M = 5,9$. когда после прекращения воздействия импульса напряжения произошло резкое изменение условий движения водного потока и поступления Rn (Рис. 2).

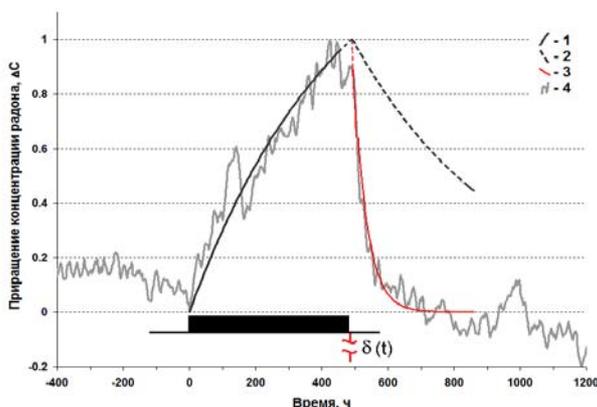


Рис. 2. Зарегистрированная в подпочвенном Rn предвестниковая аномалия типа Б перед ЗТ 18.09.2008 г. с $M=5,9$. Кривая нормирована на максимум. Черным прямоугольником показано время воздействия на грунт напряжения с резким фронтом. $\delta(t)$ – единичный импульс напряжения отрицательной полярности (дельта-функция Дирака) 1 – модельная кривая (1 участок); 2 – модельная кривая (2 участок); 3 – модельная кривая (3 участок); 4 – исходные данные.

После процесса инъекции Rn в водный поток (рис. 2, участок модельной кривой 1) вместо расчетного плавного экспоненциального уменьшения ОА Rn (участок модельной кривой 2) после окончания периода воздействия импульса напряжения, показанного черным прямоугольником, наблюдается резкое экспоненциальное, уменьшение ОА Rn (участок модельной кривой

3). Единственным объяснением такого поведения заднего фронта аномалии может быть прекращение воздействия первого импульса напряжения и возникновение единичного импульса напряжения отрицательной полярности, что привело к увеличению водного потока. Разные расчетные значения Λ для переднего и заднего фронтов аномалии ($\Lambda_{1,2}=0,0022 \text{ с}^{-1}$ и $\Lambda_3=0,025 \text{ с}^{-1}$), дают основание для следующей модели данного предвестника. После 18 суточного сжатия, приведшего к изменению гидрогеологических условий и впрыску воды с повышенным содержанием Rn, возник короткий, достаточно хорошо выраженный импульс растяжения, прекративший впрыск Rn и увеличивший пропускную способность гидрогеологической системы и скорость потока воды в ней почти в 9 раз.

В работе [10] выполнялся мониторинг тектонических напряжений в Скалистых горах США, который показал, что на фоне линейного роста сжатия массива перед землетрясением происходит рыхление массива и только потом его уплотнение с завершающим сейсмическим событием. Вероятно, на пункте INSR перед землетрясением 18.09.2008 г. подобный процесс привел к изменению величины водного потока, содержащего Rn, что было зарегистрировано ГС в зоне аэрации.

Сравнения экспериментальных и модельных кривых предвестниковых аномалий типа **Б** подтверждают возможность их возникновения по модели отклика Rn в водной среде с полным поперечным перемешиванием на продолжительное постоянное воздействие напряжения с резким фронтом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16–05–00162.

Список литературы

1. Гудзенко В.В., Дубинчук В.Т. Изотопы радия и радон в природных водах. М.: Наука, 1987. 45 с.
2. Макаров Е.О. Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчататский, 2017. 22 с.
3. 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. 2012. Т. 48. № 1. С. 5-14.
4. 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.
5. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 22-31.
6. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 4. С. 58-80.
7. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашиев Р.Р. Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 60-80.
8. Фирстов П. П., Макаров Е. О., Глухова И. П. и др. Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Геосистемы переходных зон, 2018, Т. 2, № 1, С. 16-32.
9. 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, Vienna, 9-12 September 1991*. Vienna, 1991. P. 6-22.
10. Swolfs H. S. Stress-monitoring system for earthquake prediction. Salt Lake City: Terra-Tek, Report TR, 1976, P. 76-55.