

## Глубокофокусные землетрясения Охотского моря

Е. В. Воронина\*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
 физический факультет, кафедра физики Земли  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
 (Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Анализ сильнейших глубокофокусных землетрясений Охотского моря показал, что эти события приурочены к центральной части, погружающейся под континент холодной океанической плиты со слабой пластичностью по краям. Механизмы очага типа сбросов по нескольким площадкам разрыва. Высокие скорости вспарывания и большие величины снимаемых напряжений свидетельствуют о развивающемся процессе разрушения в этой части переходной зоны от верхней к нижней мантии Земли.

PACS: 550.34

УДК: 550.34

Ключевые слова: глубокофокусные землетрясения, скорость вспарывания, снимаемые напряжения.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в акватории Охотского моря, вблизи западного побережья Камчатки, произошло три сильнейших землетрясения, признанных уникальными, как по своей природе, так и по своим характеристикам. Эти землетрясения произошли на глубинах (490–640) км, то есть, на границе между верхней и нижней мантии Земли, и имели магнитуды 7.3–8.3.

По причине глубокофокусной природы очагов землетрясений (табл. 1), разрушений на поверхности Земли и угрозы цунами не было. Однако, ощутимые колебания от них были зарегистрированы на расстояниях от эпицентра до 9000 км, по всей территории Евразии, Северной Америки и на Гавайских островах.

Самым сильным из них было землетрясение 24 мая 2013 г., ощущавшееся в Москве силой 2–3 балла на верхних этажах высотных зданий; в центре Москвы, на Лесной улице, из домов были эвакуированы жители. Это землетрясение признано самым мощным за период инструментальных наблюдений. Энергия землетрясения равна  $10^{17}$  Дж, что эквивалентно взрыву 35 мегатонн тротила. В результате землетрясения образовался разлом длиной 180 км и подвижкой до 10 м.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Согласно эволюционной концепции разрушения геоматериалов полная система уравнений в лагранжевом описании движения сплошной среды включает в себя [1, 3]:

Закон сохранения массы:

$$\rho V = \rho_0 V_0.$$

Закон сохранения импульса:

$$\rho \dot{v}_i = \sigma_{ij,j}.$$

Закон сохранения энергии:  $\rho \dot{E} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ , где:  $2\dot{\epsilon}_{ij} = v_{i,j} + v_{j,i}$  — тензор скорости деформации,  $2\omega_{i,j} = v_{i,j} - v_{j,i}$  — тензор поворота элемента среды как целого,  $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$  — тензор напряжений в виде шаровой и девиаторной части;  $P$  — давление,  $\rho$  — плотность,  $V$  — объем горной породы,  $E$  — внутренняя энергия единицы объема,  $v_i$  — скорость смещения.

Девиаторная часть тензора напряжений может быть представлена в виде равновесной составляющей, связанной с упругими процессами в среде и неравновесной (релаксирующей) частью сдвиговых напряжений, формирующих неупругую подвижку в очаге землетрясения.

Определяющие уравнения в релаксационной форме имеют вид:

$$\sigma_{ij} = \lambda (\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P) \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\epsilon}_{ij}^T - \dot{\epsilon}_{ij}^P),$$

где:  $\dot{\epsilon}_{ij}^T$  — полная скорость деформации среды,  $\dot{\epsilon}_{ij}^P$  — скорость неупругой составляющей. Приращение напряжений  $\Delta\sigma_{ij} = \dot{\sigma}_{ij}\Delta t$  пропорциональны приращению полных скоростей деформации, а релаксируют напряжения пропорционально развитию неупругой составляющей скорости деформации.

При этом, если  $\dot{\epsilon}_{ij}^P > \dot{\epsilon}_{ij}^T$  то  $\Delta\sigma_{ij} < 0$  идет релаксация, стабилизирующая деформационный процесс к состоянию динамического равновесия. Если же противоположная ситуация, то есть  $\dot{\epsilon}_{ij}^P < \dot{\epsilon}_{ij}^T$ , то  $\Delta\sigma > 0$  — напряжения растут, увеличивая скорость неупругих деформаций, что приводит к сверхбыстрому катастрофическому режиму разрушения среды и деградации ее механических параметров. Функцию деградации среды, в простейшем варианте, можно представить, как функцию, зависящую от накапливаемой неупругой деформации и вида напряжённого состояния.

Вид напряжённого состояния среды в очаговых зонах землетрясений определяется коэффициентом Лоде–Надаи:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_3} - 1,$$

\*E-mail: voronina@physics.msu.ru

Таблица I: Данные о сильнейших землетрясениях из каталога Гарвардского университета [5]

Дата	Время в очаге	Широта, град. сев.	Долгота, град. вост	Глубина, км.	Магнитуда	Момент, (Н*м)
24.05.2013	08:44	54.892	153.224	610	8.32	$3.84 \times 10^{21}$
24.11.2008	12:03	54.203	154.322	492	7.28	$1.06 \times 10^{20}$
05.07.2008	05:12	53.882	152.886	633	7.7	$4.49 \times 10^{20}$

где  $S_{1,2,3}$  — главные значения девиатора тензора снимаемых напряжений.

Повреждения в областях растяжения-сдвига (при  $\mu_\sigma < 0$ ) начинают накапливаться при существенно меньших внешних напряжениях и скорость их накопления выше, чем для областей сжатия-сдвига (при  $\mu_\sigma > 0$ ). Следовательно, прочностные параметры среды будут деградировать быстрее в областях растяжения-сдвига.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ОБСУЖДЕНИЕ

Фокальная зона приурочена к области, знания о строении которой очень ограничены. Это зона субдукции Тихоокеанской плиты под Североамериканскую, составной частью которой являются микроплита Охотского моря и Камчатка. Тихоокеанская плита, возраст которой в этой части океана примерно 100 млн. лет, смещается в северо-западном направлении со скоростью около 78 мм/год на севере Охотского моря и до 83 мм/год в южной его части [4]. Предполагается, что повышенная мощность землетрясений связана с тем, что погружающиеся под акваторией Охотского моря участки океанской плиты, имеют высокую плотность и пониженную температуру, по сравнению с окружающими их горными породами нижней мантии. Эти землетрясения оказались также сверхбыстрыми, так как скорость распространения разрушения для них составляет до 8 км/с, что превышает скорость распространения поперечных волн в мантии на этих глубинах. В более мягких породах разрывы происходят медленнее. Эти уникальные параметры землетрясений Охотского моря заставляют более детально изучить как процессы в очаговых зонах, так и то влияние, которое они оказывают на геодинамику региона.

Временной анализ распределения магнитуд показал, что сейсмическая в акватории Охотского моря усиливаются со временем, имеют чёткую периодичность порядка четырёх лет. Землетрясения не имеют заметных форшоков, но сопровождаются довольно сильными афтершоками. Это свидетельствует о развитии процесса разрывообразования в среде.

Механизмы очага землетрясений Охотского моря представляют собой сбросы по круто падающей плоскости, ориентированной на север-северо-восток (рис. 1).

Оси девиаторных (ЕВ1) напряжений сжатия и растяжения ориентированы ортогонально простиранию Курильского желоба: ось сжатия погружается под океаническую плиту; ось растяжения — под континент. Механизмы очага поверхностных землетрясений типа взбросов. Но с глубиной формируется напряжённое состояние, отличное от поверхностного. Для глубин более 300 км, в северной части Курил и западнее Камчатки, наблюдается область горизонтального растяжения, к которой и приурочены гипоцентры сильнейших землетрясений.

По собственным значениям тензора сейсмического момента быть рассчитан коэффициент Лоде-Надаи и определён вид напряжённого состояния среды. Значения параметра  $+0,25 \geq \mu_\sigma \geq -0,25$  определяют области очагов, как области сдвига. В данном случае сдвиг произошел в вертикальной плоскости.

Результаты, полученные по анализу механизмов очага глубокофокусных землетрясений Охотского моря, свидетельствуют о растяжении акватории Охотского моря на больших глубинах. К сожалению, детальных данных по строению восточной части акватории Охотского моря нет, но известно [2], что в центральной части микроплиты высокий тепловой поток, порядка 200 мВт/м<sup>2</sup> и пониженная плотность на глубинах 20-30 км. Это предполагает выход астеносферного слоя почти на подошву земной коры. Кроме того, с глубин 50-70 км, наблюдается подъем разогретого мантийного вещества, в виде толеитовых базальтов, на поверхность и образование рифтовых структур, приводящих к растяжению земной коры.

На глубинах, определяемых гипоцентрами землетрясений, близкими к границам фазовых переходов в мантии, под влиянием высоких давлений происходит резкое изменение кристаллической структуры горных пород, прочность среды уменьшается и это приводит к смещениям, возникающим при землетрясениях. Нельзя исключить и влияние механизма сдвигового плавления, при котором резко возрастает скорость испаривания.

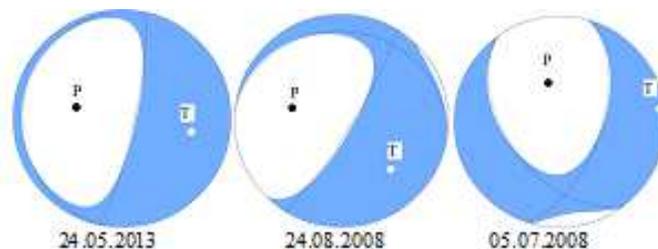


Рис. 1: Механизмы очага землетрясений Охотского моря

Таблица II: Данные об осях напряжений в механизмах очага

Дата события	Ось растяжения $T$			Промежуточная ось $N$			Ось сжатия $P$		
	Val	Pl	Az	Val	Pl	Az	Val	Pl	Az
24.05.2013	3.673	36	101	0.312	1	192	-3.95	54	284
24.11.2008	0.99	35	135	0.123	15	34	-1.16	51	285
05.07.2008	4.235	5	83	0.479	31	176	-4.74	58	344

[1] Воронина Е.В. Процессы в геосредах. № 2. С. 32. (2015).

[2] Лыскова Е.Л. Вопросы геофизики. Вып. 47. С. 62. (2014).

[3] Макаров П.В., Ерёмин М.О. Физическая мезомехани-

ка. **16**, № 1. С. 5. (2013).

[4] Zh.Zhan, H.Kanamori, V.C.Tsai, D.V.Helmlberger. Earth and Planetary Science Letters. **385**. P. 89. (2014).

[5] <http://earthquake.usgs.gov/>

## Deep-focus earthquakes in Sea of Okhotsk

E. V. Voronina

*Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics,  
M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: voronina@physics.msu.ru*

Analysis of the strongest deep earthquakes of the Okhotsk Sea has shown that these events are confined to the central part of the subduction beneath the continent cold oceanic plate with a weak plasticity at the edges. Mechanisms of sources is normal and discharges focus on several areas of a rupture. High rupture velocity and big values indicate stress drop developing process of destruction in this part of the transition zone from the upper to the lower of the Earth's mantle.

PACS: 550.34

Keywords: deep-focus earthquakes, rupture velocity, stress drop.

Received 25.04.2016.

### Сведения об авторе

Воронина Елена Викторовна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-38-48, e-mail: voronina@physics.msu.ru.