УДК 550.34

### Напряженно-деформированное состояние зоны глубокофокусных землетрясений региона Японского моря

#### © А. Ю. Полец

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия E-mail: polec84@mail.ru

Представлены результаты реконструкции современных напряжений в зоне глубокофокусных землетрясений региона Японского моря. Реконструкция напряжений выполнялась на основе метода катакластического анализа разрывных смещений с использованием сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений каталога NEID. По результатам расчета получены новые данные о поле напряжений в исследуемом регионе для глубин 300–700 км. Установлено, что основными геодинамическими режимами на исследуемых глубинах являются горизонтальное сжатие и горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом.

**Ключевые слова:** регион Японского моря, тектонические напряжения, механизмы очагов землетрясений, глубокофокусные землетрясения.

# The stress-strained state of zones of deep-focus earthquakes of the Japan Sea region

#### Anastasia Yu. Polets

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia E-mail: polec84@mail.ru

The results of the stress inversion in the zones of deep-focus earthquakes of the Japan Sea region have been presented in the work. The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements has been used to perform the stress reconstruction. The stress inversion has been performed on the basis of NEID focal mechanism solution catalog of earthquakes. New data on the modern stress field have been obtained in the studied region for the depth 300–700 km. It has been established that the horizontal compression and horizontal tension in combination with the shear are the main geodynamic regimes at the studied depths. **Keywords:** Japan Sea region, tectonic stresses, earthquake focal mechanisms, deep-focus earthquakes.

## Тектоническое положение района исследований

Регион Японского моря расположен в сейсмически активной зоне перехода от Евразийского континента к Тихому океану в районе сочленения четырех литосферных плит: Евразийской (Амурской), Охотской (Северо-Американской), Тихоокеанской и Филиппинской (рис. 1). Четыре литосферные плиты сходятся в юго-восточной части о. Хонсю, все границы плит фиксируются сейсмоактивными зонами, в результате данный тектонический узел характеризуется повышенной сейсмоопасностью. Через острова Сахалин, Хоккайдо, Хонсю, Сикоку и Кюсю протягивается Сахалинско-Японская островная дуга, она пересекается на о. Хоккайдо Курильской дугой, а на о. Хонсю – дугой Нампо, которая образует здесь поперечную зону грабена Фосса-Магна. Зона Фосса-Магна является границей между северо-восточной и юго-западной ветвями Сахалинско-Японской островной дуги [Апродов, 2000].

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН при поддержке гранта президента РФ (МК-2421.2017.5) и гранта РФФИ (№ 17-05-01251 а).

Глубокофокусные землетрясения, отмеченные на глубинах от 300 до 700 км (рис. 1), сосредоточены в нижней части двух сейсмофокальных зон – Курильской и Идзу-Бонинской, погружающихся под континент. Можно выделить три зоны концентрации глубокофокусных землетрясений: северная часть Японского моря, продолжеграбена Фосса-Магна ние (прослеживается в Японском море в виде прерывистого пояса глубокофокусных землетрясений) и зона на северовостоке вдоль оси Курильской глубоководной котловины.

Механизм генерации напряжений в зонах субдукции океанической литосферной плиты под континентальную

литосферную плиту обусловлен конвекцией в мантии. Распределение тектонических напряжений в погружающихся участках плит, наряду с другими геофизическими характеристиками, дает информацию о структуре мантийного течения. Как правило, предельная глубина, на которой происходят глубокофокусные землетрясения, соответствует положению эндотермической фазовой границы на глубине около 670 км. Глубже этой границы происходит нарушение кристаллических связей в мантийном веществе, и оно, повидимому, приобретает свойства аморфного вещества. На глубине 660 км, наоборот, при увеличении температуры фазовая граница поднимается по сравнению с ее средним положением. Вес столба поднимающегося мантийного потока увеличивается, и конвекция тормозится. Таким образом, граница 660 км служит частичным барьером для мантийных потоков [Сорохтин, Ушаков, 2002]. Под влиянием высоких давлений происходит резкое изменение кристаллической структуры горных пород, прочность среды уменьшается, что приводит к смещениям и возникновению землетрясений; возможно также влияние ме-



**Рис. 1.** Эпицентры глубокофокусных землетрясений 1997–2017 гг. (по данным NIED).

ханизма сдвигового плавления, при котором резко возрастает скорость вспарывания.

Напряженное и деформированное состояния земной коры и верхней мантии являются важнейшими из факторов, определяющих характер тектонических процессов и развитие связанных с ними тектонических движений и деформаций. Поэтому реконструкция полей тектонических напряжений, действующих в различных по масштабам и своему строению геологических средах, составляет одну из актуальных проблем тектонофизики, геотектоники и сейсмологии.

Целью данного исследования является изучение особенностей поля тектонических напряжений региона Японского моря в интервале глубин 300–700 км.

#### Метод реконструкции напряжений

Для изучения напряженного состояния применялся метод катакластического анализа (МКА) разрывных смещений [Ребецкий, 2007]. МКА, так же как и ряд известных методов [Гущенко, 1979, 1996; Юнга, 1990; Angelier, 1984; Carey-Gailhardis, Mercier, 1987; Gephard, Forsyth, 1984], опирается на данные о механизмах очагов землетрясений. Но, в отличие от других методов, в алгоритме МКА имеются процедуры расчета не только параметров эллипсоида напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций, но и относительных значений шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. Эти возможности метода обеспечены привлечением в алгоритм расчета экспериментальных наблюдений по разрушению образцов горных пород (кулонова критерия хрупкой прочности [Mogi, 1964; Byerlee, 1968; Brace, 1972; Ставрогин, Протосеня, 1992]), обобщенных на реальные трещиноватые горные породы в виде полосы разрушения на диаграмме Мора [Ребецкий, 2007].

При определении ориентации главных осей тензора напряжений и значений коэффициента Лоде-Надаи (первый этап реконструкции) осуществляется подбор из всех возможных напряженных состояний такого, для которого совокупность анализируемых механизмов очагов землетрясений доставляет максимум диссипации энергии, накопленной в упругих деформациях [Ребецкий, 1999]. Подбираемые совокупности землеудовлетворяющие трясений, указанному условию, составляют однородные выборки землетрясений. Они служат для определения параметров эллипсоида напряжений и характеризуют квазиоднородно деформируемый участок земной коры (домен), которому приписываются результаты расчета напряжений.

На втором этапе реконструкции на диаграмме Мора анализируется распределение точек, отвечающих механизмам очагов из однородной выборки землетрясений. Эти точки характеризуют значения редуцированных напряжений [Ребецкий, 2007], действующих на плоскости разрыва каждого землетрясения. На этом этапе рассчитываются относительные величины напряжений (максимального касательного напряжения и эффективного давления, определяемых с точностью до неизвестного значения эффективного внутреннего сцепления массивов горных пород  $\tau_c$ ).

На третьем и четвертом этапах реконструкции оцениваются величины  $\tau_f$  и порового давления флюида  $p_{fl}$ . Здесь используется гипотеза о близости вертикальных напряжений весу столба горных пород [Sibson, 1974], а также данные о величине напряжений, сейсмологические данные о сброшенных напряжениях в очагах сильных землетрясений, о топографии и крупных внутрикоровых неоднородностях. Все четыре этапа расчета выполняются последовательно, с использованием результатов предыдущего.

В работе представлены результаты первых двух этапов реконструкции, так как они позволяют определять относительные величины девиаторных и эффективных изотропных напряжений опираясь только на сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений и на закономерности, установленные из экспериментов по разрушению образцов горных пород. Третий и четвертый этапы требуют привлечения дополнительных сейсмологических данных и в рамках данного исследования не применялись.

#### Исходные сейсмологические данные

Для расчета напряжений использовали данные каталога механизмов очагов NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster), одной из наибольших по плотности покрытия систем сейсмологических и геофизических наблюдений в мире (http://www.fnet.bosai.go.jp). Плотность pacположения сейсмических станций в Японии (среднее расстояние между станциями 100-200 км) уступает только Калифорнийской (США). Японская система наблюдений была создана после сильного землетрясения в Кобе 17 января 1995 г., M<sub>w</sub> = 6.9. На сегодняшний день сеть состоит из 84 цифровых широкополосных станций, по данным которой NIED создает каталог механизмов очагов землетрясений для территории Японии и сопредельных территорий. Региональная сейсмическая сеть Японии позволяет определять механизмы очагов землетрясений начиная с магнитуд 3.0.

На основе данных каталога NIED для исследуемого региона нами был создан рабочий каталог, который насчитывал 308 событий с диапазоном магнитуд 3.5 ≤ Mw≤7.3 за период времени с 1997 по 2017 г. (временной интервал 20 лет). Основной глубинный диапазон каталога механизмов очагов землетрясений от 350–370 км (рис. 2 а, д). Наиболее представительный диапазон магнитуд – от 4.0 до 5.0 (рис. 26), а на глубинах 400–700 км – от 5.0 до 6.0 (рис. 2е).

Самые сильные глубокофокусные землетрясения с М<sub>w</sub> ≥ 7.0 из каталога произошли: 28.06.2002 (на северо-востоке Китая, близ границ России), М<sub>w</sub> = 7.2, тип механизма очага – взбросо-сдвиг, глубина очага 589 км; 27.07.2003 (в южной части Татарского пролива), М = 7.1, взбросо-сдвиг, глубина очага 487 км, примечательно, что после этого сильного глубокофокусного землетрясения 25.09.2003 у берегов о. Хоккайдо, в верхней части сейсмофокальной зоны, произошло мощное землетрясение Токачи-оки [Mogi, 2004], M<sub>w</sub> = 8.3; 14.08.2012 (в Охотском море у восточного побережья о. Сахалин), М = 7.3, сбросо-сдвиг, глубина очага 654 км.

Для реконструкции выделены механизмы землетрясений в диапазоне магнитуд  $3.5 \leq Mw < 6$  (исключено 13 событий с  $M_w \geq 6.0$ ). Использование в диапазонах магнитуд разницы большей, чем на 2.5-3 ед., приводит к завышению роли сильных землетрясений, так как механизмы этих сильных событий начинают участвовать в определении напряжений большинства доменов, существенно усредняя результаты расчетов.

Обработка исходных сейсмологических данных производилась в узлах сетки  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  в латеральном направлении для четырех глубинных интервалов (300–400, 400–500, 500–600, 600–700 км). Определение параметров поля напряжений осуществлялось в квазиоднородных доменах путем выделения однородных выборок механизмов очагов землетрясений, минимальное число событий в которых было 5, максимальное – 10.

Процедуры формирования однородных выборок механизмов очагов землетрясений выполнены для 17 (глубинный интервал 300–400 км), 30 (глубинный интервал 400–500 км), 22 (глубинный интервал 500–600 км), 3 (глубинный интервал 600—700 км) квазиоднородных доменов. Для каждого из доменов рассчитаны средние за весь период наблюдений параметры тензора напряжений.

#### Анализ механизмов очагов глубокофокусных землетрясений

Механизмы очагов глубокофокусных землетрясений разделены нами по типам смещений (рис. 2в) аналогично схеме разделения геодинамических режимов деформирования при анализе напряженного состояния [Ребецкий, 2007]. На рис. 2г показаны секторы октанта, построенного на осях главных напряжений, при разделении всех возможных ориентаций осей главных напряжений на шесть геодинамических типов. Каждому из этих типов напряженного состояния отвечает свой преимущественный тип разрывообразования. В зонах горизонтального сжатия в основном должны формироваться разрывы типа взбросов и надвигов, в зонах горизонтального растяжения разрывы типа сбросов, в зонах горизонтального сдвига – сдвиги вдоль простирания. Два из трех дополнительных промежуточных состояния отвечают сочетанию горизонтального сдвига с горизонтальным сжатием или с горизонтальным растяжением. Третье дополнительное состояние расположено между горизонтальным растяжением и горизонтальным сжатием. Этому состоянию соответствует термин вертикальный сдвиг. Соответственно для обстановки горизонтального сжатия со сдвигом преимущественно возникают разрывы типа взбросо-сдвига и сдвиго-взброса, для обстановки горизонтального растяжения со сдвигом – разрывы типа сбросо-сдвига и сдвиго-сброса, а для обстановки вертикального сдвига – взрезы и пологие надвиги.

Анализ каталога с учетом типизации механизмов очагов землетрясений по данной схеме показал (рис. 2г), что в нем содержится 5 событий (1.6 %) механизмов очагов, отвечающих взбросам, 25 (8.1 %) – сдвигам и 6 событий (1.9 %) – сбросам. Остальные события относятся к промежуточным кинематическим типам разрывобразования: 190 (61.7 %) – сдвиго-сбросы или сбросо-сдвиги и 82



Рис. 2. Диаграммы распределения числа событий: (а) по глубине 300–700 км; (б) по магнитудам; (в) по типам смещений; (д) по глубинам для четырех интервалов с шагом 100 км; (е) по магнитудам для четырех интервалов с шагом 100 км.

(г) Схема геодинамического районирования при делении на шесть типов напряженного состояния (1 – горизонтальное растяжение, 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом, 3 – горизонтальный сдвиг, 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом, 5 – горизонтальное сжатие, 6 – вертикальный сдвиг).

(26.6 %) – сдвиго-взбросы или взбросо-сдвиги. Исходя из анализа распределения механизмов очагов по глубинам (рис. 3; см. таблицу), в интервале глубин 300–400 км произошло 235 событий, для которых были определены механизмы; на глубинах 400–500 км – 51 землетрясение; 500–600 км – 14; 600–700 км – 10 землетрясений.

В плане очаги землетрясений сконцентрированы в трех сегментах: первый между островами Сахалин и Хоккайдо, второй от зал. Исе (тихоокеанское побережье центральной части о. Хонсю) и далее вдоль зоны грабена Фосса-Магна, третий в Японском море (рис. 1, 3).

#### Результаты расчета

Путем обработки каталога механизмов очагов землетрясений в соответствии с алгоритмом метода катакластического анализа были получены данные о параметрах тензора тектонических напряжений. Прежде всего это данные об ориентации трех главных осей тензора напряжений и приращений сейсмо-

Распределение механизмов очагов землетрясений по глубинам 300-700 км

Н, км	Сброс	Сбросо-сдвиг	Сдвиг	Взброс	Взбросо-сдвиг
300-400 км	6 (3)	138 (59)	17 (7)	5 (2)	69 (29)
400–500 км	0	38 (74.5)	4 (7.8)	0	9 (17.6)
500-600 км	0	10	1	0	3
600–700 км	0	6	3	0	1

Примечание. В скобках указан процент от числа землетрясений в этой группе.



**Рис. 3.** Эпицентры глубокофокусных землетрясений в 1997–2017 гг. (по данным NIED). (а) Тип движения в очаге сброс (цвет заливки темно-серый), взброс (цвет заливки черный); (б) сбросо-сдвиг, 300–400 км; (в) сдвиг, 300–700 км; (г) взбросо-сдвиг, 300–400 км; (д), (е) сбросо-сдвиг и взбросо-сдвиг, 400–500 км (д), 500–700 км (е).

Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 4, с. 302–311

тектонических деформаций, а также данные о коэффициенте Лоде–Надаи этих тензоров.

На рис. 4 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений. Характерной особенностью поля тектонических напряжений на глубинах 300–700 км является юг-юго-восточная ориентация осей алгебраически минимальных напряжений на юге и субширотная и субмеридиональная ориентация их на севере исследуемой области. Оси максимальных растягивающих и промежуточных напряжений имеют взаимозаменяемую субгоризонтальную или субвертикальную ориентации. Данные о взаимосвязи ориентации главных осей напряжений с вектором на зенит (рис. 2г) позволяют выделить районы по типам напряженного состояния (рис. 4 а, в). На глубинах 300–400 км в области между островами Сахалин и Хоккайдо преимущественный геодинамический режим – горизонтальное сжатие и его сочетание со сдвигом. С увеличением глубины до 400–700 км в районе Японского моря появляются обширные области горизонтального растяжения, при этом вдоль оси Курильской глубоководной котловины режим горизонтального сжатия и его сочетание со сдвигом сохраняются.



**Рис. 4.** Ориентация проекции на горизонтальную плоскость осей погружения σ<sub>3</sub> и σ<sub>1</sub>. (a), (b) Геодинамический тип напряженного состояния: 1 – горизонтальное растяжение, 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом, 3 – горизонтальный сдвиг, 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом, 5 – горизонтальное сжатие, 6 – вертикальный сдвиг; (б), (г) тип тензора напряжений – коэффициент Лоде–Надаи μ<sub>σ</sub>. Штриховыми контурами обозначены результаты реконструкции для глубинных интервалов 400–500 км (a, б) и 600–700 км (b, г).

Коэффициент Лоде-Надаи определяет тип эллипсоида (тензора) напряжений (µ<sub>6</sub> = -1 одноосное растяжение,  $\mu_{\sigma} = 0$  чистый сдвиг,  $\mu_{\pi} = +1$  одноосное сжатие). На основе данных о коэффициенте Лоде-Надаи определены типы тензора напряжений в пределах исследуемого региона. На глубинах 300-400 км на севере (между островами Сахалин и Хоккайдо) наблюдаются домены с типом тензора напряжений, близким к одноосному сжатию и его сочетаниям со сдвигом, а на юге (район зал. Исе) - к одноосному растяжению со сдвигом. С увеличением глубины (400-700 км) в районе Японского моря тип тензора напряжений близок к одноосному сжатию, а в районах Приморья и Курильской глубоководной впадины – к одноосному растяжению и его сочетаниям со сдвигом. Тип напряженного состояния играет большую роль в разрушении геоматериалов [Макаров, 2010]. Повреждения в областях растяжениясдвига (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.

Результаты первого этапа реконструкции позволяют также осуществить расчет направления поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормалью, направленной к центру Земли (рис. 5). Направления действия этих напряжений зависят от отношения величины касательных напряжений т, действующих на горизонтальных площадках, к интенсивности касательных напряжений т. Траектории поддвиговых касательных напряжений определяют направление воздействия со стороны верхней мантии. В зонах субдукции поддвиговые касательные напряжения имеют в основном однонаправленную ориентацию (от океана к субконтиненту), при этом на глубинах 300-700 км может происходить смена ориентации этих напряжений. Направления таких касательных напряжений начиная от зал. Исе и далее к северной части Японского моря имеют западную (300-400 км), север-северо-восточную (400–700 км) ориентации и характеризуются наибольшей интенсивностью. На севере, между островами Сахалин и Хоккайдо, ориентация этих напряжений выглядит более хаотичной, здесь можно увидеть разные ориентации поддвиговых касательных напряжений. Горизонтальные площадки достаточно сильно отклонены от плоскостей действия максимальных касательных напряжений, что определяет низкий уровень этих напряжений и достаточно сильный разброс в их ориентации.

В соответствии с алгоритмом второго этапа реконструкции были рассчитаны относительные значения эффективного давления  $p^*/\tau_f$  (рис. 6), разность между давлением в



**Рис. 5.** Ориентация осей поддвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках вместе с их относительной величиной. Здесь и на рис. 6 штриховыми контурами обозначены результаты реконструкции для глубинных интервалов 400–500 км (а) и 600–700 км (б).



**Рис. 6.** Относительные значения эффективного давления  $p^*/\tau_i$ .

горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства  $p^* = p - p_{fl}$ при  $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ . Для больших глубин контраст напряжений не так ярко выражен, как в верхней части сейсмофокальной зоны, хотя здесь также присутствуют участки со средним уровнем напряжений. В целом для рассматриваемых глубин 300-700 км характерны пониженные значения редуцированного эффективного давления *р\*/*  $\tau_c$ (0-8), исключение составляет участок между островами Сахалин и Хоккайдо, где значения этого параметра лежат в пределах от 8 до 12 и соответствуют среднему значению. Таким образом, повышение значений этого параметра наблюдается в направлении с юга-юго-запада на северо-восток.

#### Заключение

По распределению глубокофокусных землетрясений на рассматриваемых глубинах (300-700 км) и по характеру напряженного состояния исследуемый регион может быть разделен на три зоны: северная часть Японского моря; продолжение грабена Фосса-Магна; область между островами Сахалин и Хоккайдо. Выполненная на основе метода катакластического анализа разрывных смещений реконструкция поля современных тектонических напряжений в регионе Японского моря позволила получить новые данные об особенностях распределения напряжений и структурно-прочностных параметров для разных глубинных интервалов (300-400, 400-500, 600-700 км). По результатам тектонофизической реконструкции установлено, что основными геодинамическими режимами на исследуемых глубинах являются горизонтальное сжатие (участок между островами Сахалин и Хоккайдо) и горизонтальное растяжение (в пределах Японского моря) в сочетании со сдвигом. Основными видами тензора напряжений на участках между островами Сахалин и Хоккайдо и вдоль продолжения грабена Фосса-Магна являются одноосное сжатие и сочетание чистого сдвига с одноосным сжатием. В северной части Японского моря вид тензора напряжений совмещает одноосное растяжение и чистый сдвиг. В пределах исследуемых глубин выделены участки пониженного и среднего уровня эффективного всестороннего давления. Основные неоднородности поля напряжений отмечены в зоне сопряжения Японской и Южно-Курильской сейсмофокальных областей и в южной части Японского моря.

Дальнейшее расширение каталога механизмов очагов землетрясений NIED позволит уточнить результаты реконструкции напряжений и дополнить данные о напряженном состоянии.

#### Список литературы

1. Апродов В.А. Зоны землетрясений. М.: Мысль, 2000. 461 с.

2. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений в литосфеpe. М.: Наука, 1979. С. 7–25.

3. Гущенко О.И. Сейсмотектонический стрессмониторинг литосферы (структурно-кинематический принцип и основные элементы алгоритма) // Докл. АН. 1996. Т. 346, № 3. С. 399–402.

4. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физ. мезомеханика. 2010. Т. 13, № 5. С. 97–112. [Makarov P.V. Self-organized criticality of deformation and prospects for fracture prediction. *Physical Mesomechanics*, 2010, 13(5-6): 292-305. https:// doi.org/10.1016/j.physme.2010.11.010]

5. Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Докл. АН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392–395.

6. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.

7. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. *Развитие Земли*. М.: Изд-во МГУ, 2002. 506 с.

8. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. *Механика деформирования и разрушения горных пород*. М.: Недра, 1992. 223 с.

9. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.

 Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1984. Vol. 89 (B7).
P. 5835–5848. https://doi.org/10.1029/jb089ib07p05835 11. Byerlee J.D. Brittle-ductile transition in rocks // *J. Geophys. Res.* 1968. Vol. 73 (14). P. 4741–4750. https://doi.org/10.1029/JB073i014p04741

12. Brace W.F. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes // *Tectonophysics*. 1972. Vol. 14 (3–4). P. 189–200. https://doi.org/10.1016/0040-1951(72)90068-6

13. Carey-Gailhardis E., Mercier J.L. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake population: microseismicity of Southern Peru // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1987. Vol. 82. P. 165–179. https://doi.org/10.1016/0012-821x(87)90117-8

14. Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89 (B11). P. 9305–9320. https://doi.org/10.1029/jb089ib11p09305

15. Mogi K. Deformation and fracture of rocs under confining pressure (1) compression test on dry rock sample *// Bull. Earth. Res. Inst., Univ. Tokyo.* 1964. Vol. 42, N 3. P. 491–514.

16. Mogi K. Deep seismic activities preceding the three large 'shallow' earthquakes off south-east Hokkaido, Japan – the 2003 Tokachi-oki earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake and the 1952 Tokachioki earthquake // *Earth Planets Space*. 2004. Vol. 56. P. 353–357. https://doi.org/10.1186/bf03353064

17. Sibson R.H. Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults // *Nature*. 1974. Vol. 249, N 5457. P. 542–544. https://doi.org/10.1038/249542a0

#### Сведения об авторе

ПОЛЕЦ Анастасия Юрьевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.