О ВЛИЯНИИ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ МАССОВЫХ СИЛ - КАК ВОЗМОЖНОМ ИСТОЧНИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КОРЕ ЗОН ПЕРЕХОДА «ОКЕАН-КОНТИНЕНТ»

Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, dsm@ifz.ru, reb@ifz.ru, vvp@ifz.ru

Введение

Целью работы является попытка объяснения необычного изменения (смены типа) напряженного состояния в ходе афтершоковой стадии мега-землетрясения Тохоку (2011), наблюдавшегося по данным о механизмах афтершоков [15]. Оно заключается в изменении ориентировки главных осей напряжений сразу после землетрясения, а затем наблюдается постепенное, но достаточно быстрое, возвращение к исходному полю напряжений в ходе последовательности афтершоков. Такая смена ориентации главных осей напряжений фактически означает, что вся энергия, обусловленная давлением со стороны океанической литосферной плиты, высвободилась при землетрясении. Для поиска причин изменения напряженного состояния на афтершоковой стадии при проведении исследований методами численного моделирования необходимо подобрать условия на плоскости разрыва очага землетрясения, способствовавшие такому сбросу напряжений горизонтального сжатия, и сформировать модель начального напряженного состояния, отвечающую модели природного напряженного состояния. Эта модель в развиваемой нами методологии тектонофизического моделирования должна соответствовать результатам тектонофизической реконструкции природного напряженного состояния, выполненной с использованием данных о механизмах очагов землетрясений. Для района острова Хонсю модель природного напряженногосостояния получена в работах [9, 22]. Анализ наиболее вероятных источников энергии, которые могли определить подобное изменение, выполняется на основе численного моделирования.

Результаты реконструкции напряжений метода катакластического анализа (МКА), по данным о сейсмических событиях в районе острова Хонсю

Результаты, характеризующие особенности напряженного состояния литосферы в районе очаговой области будущего землетрясения Тохоку, показывают, что преобладающим типом напряженного состояния является горизонтальное сжатие. Обширные зоны горизонтального сдвига появились в самом верхнем уровне (глубины слоя 0–20 км) в южной части коры о. Хонсю, а на больших глубинах они проявились и в океанической части к востоку от о. Хоккайдо. Крайне важно отметить, что для обширных участков океанической коры к востоку от Японского и Идзу-Бонинского желобов установлен режим напряженного состояния, отвечающий горизонтальному растяжению. Особенно большие площади, характеризуемые этим режимом,также присутствуют на глубинном уровне 0–20 км. Второй важной особенностью поля напряжений является устойчивая ориентация касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормалями вниз,с юговостока на северо-запад. Такая их ориентация отвечает пододвиганиюокеанической литосферы под субконтинентальную, или, наоборот, надвиганию континентальной части на океаническую.

Таким образом, океанический желоб разделяет верхнюю часть тектоносферы на два геодинамических режима:

1) субгоризонтального сжатия к западу от оси желоба;

2) субгоризонтального растяжения к востоку от оси желоба.Напряженное состояние литосферы Накайского желоба существенно отличается от напряженного состояния литосферы Японского и Идзу-Бонинского желобов. Вероятно, эти различия проявятся и в глубинном строении.

По результатам реконструкции выявлена область пониженного уровня эффективного давления шириной около 40 км, вытянутая параллельно оси океанического желоба на 200-250 км. Участки коры с пониженным уровнем эффективных напряжений как раз и являются участками, где формируется очаг сильного землетрясения [5-7]. В верхних горизонтах в направлении восстания от начала развития очага землетрясения области пониженного уровня эффективного давления имеют меньшую латеральную ширину и отделяются от оси желоба участком повышенного эффективного

давления. В более глубоких горизонтах в направлениях вдоль оси океанического желоба также существовали области пониженного эффективного давления с протяженностью порядка 300 км.

Поверхность вспарывания разрыва землетрясения Тохоку на разных глубинных уровнях отделяла области пониженного эффективного давления, располагавшиеся преимущественно к западу от нее, от областей повышенного давления – к востоку. Это фактически означает, что плоскость очага землетрясения проходила в области максимального градиента напряжений. Были получены редуцированные величины псевдоглавных напряжений, действующих в латеральном направлении. На рис. 1 показана обобщенная модель напряженного состояния (ОМНС) вкрестсейсмофокальной области [8]. Важно отметить, что данные о природных напряжениях были получены не во всем объеме исследуемого региона, а только там, где происходили землетрясения. Таким образом, площади с данным о напряжениях покрывали кору о. Хонсю и к востоку от него области континентального склона, которые на малой глубине (до 10 км) были сосредоточены вблизи океанического желоба, а с увеличением глубины приближались в коре острова.



Рис. 1 - Обобщенная модель напряженного состояния на вертикальном профиле, секущем сейсмофокальную область с данными об ориентации осей главных напряжений (перекрещенные стрелки – черными – оси сжатия, берыми – оси растяжения), направлениями поддвиговых касательных напряжений на подошве коры и интенсивности эффективных давлений и девиаторных напряжений (1-минимальной интенсивности, 2-средней и 3- максимальной интенсивности); 4 – вертикальная зона средней интенсивности эффективных давления, в которой наблюдается режим горизонтального растяжения по данным о механизмах очагов землетрясений. Треугольником обозначен тальвег Японского глубоководного желоба, схематически показано положение эпицентра землетрясения Тохоку, пунктирной линией изображена поверхность разрыва, овалом оконтурена обсуждаемая особенность.

После катастрофического мега-землетрясения Тохоку 2011 г. (Мw 9.15) в большей части очаговой области возник режим горизонтального растяжения с ориентацией минимального сжатия ортогональной тальвегу океанического желоба. За прошедшие шесть лет в этой зоне растяжения произошли изменения в сторону восстановления ранее существовавшего напряженного состояния, но всё же часть этой зоны осталась в состоянии растяжения.

Задача исследования состоит в выяснении механизма релаксации напряжений в афтершоковый период, т.к. столь быстрое восстановление напряженного состояния требует либо снижения вязкости литосферы и мантии [1, 23], либо нахождения внешних или внутренних сил, обеспечивающих быстрое восстановление горизонтального сжатия.

Расчетная модель

Обобщенный профиль коры переходной области в районе о. Хонсю – очагмега-землетрясения Тохоку (2011 г.) создавался на основе геофизических профилей по работам [16, 18-20, 24, 26]. Была создана двумерная принципиальная модель, которая в субконтинентальной части содержала 4 слоя: осадочный чехол (скорости Vp=5.6 км/сек), два слоя кристаллической коры (скорости Vp=6.2 км/сек, 6.7 км/сек) и подкороваямантия (скорости Vp=7.9 км/сек), модель коры океанической части принималась трехслойной. По данным о скоростях продольных волн и работам [3, 4, 10-13,17,21] были заданы плотности и реологические параметры слоев модели, использованной в расчетах.

2D-модель представляла из себя прямоугольный профиль с горизонтальными размерами 750 км (от 136° до 143° ВД) глубиной 100 км.Кроме структур коры и подкоровой литосферы в разрез коры также была включена часть астеносферы (рис. 2). На нижней горизонтальной границе профиля задавались нулевые касательные напряжения и вертикальные перемещения (второй тип краевых условий) или нулевые перемещения (первый и третий тип краевых условий).

Отсутствие в геометрии профиля области, которая могла бы быть традиционно отождествлена с погруженной частью слэба было принято умышленно: предполагается, что такая геометрия предоставит возможность более детально определить вклад возможных источников нагружения в напряженное состояние литосферы. Отметим, что подобные модели также использовались в ряде последних работ по исследованию особенностей напряженного состояния в литосфере субдукционных областей (например, [2]). Модели с более традиционной геометрией ранее изучались нами для исследования напряженного состояния для Андийской (Т.В. Романюк [10-13]) и Суматра-Андаманскойсубдукционных зон (В.В. Погорелов [3, 4]).

При численных расчетах применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел [25] И усовершенствованная Ю.П. Стефановым [14] для применения в геомеханике. Задача решается в рамках подхода Лагранжа. Для стабилизации алгоритма вводятся искусственные вязкости различных типов, правильное использование которых обеспечивает устойчивость алгоритма. Основной особенностью подхода является использование уравнений движения (уравнения равновесия с инерционными членами), что приводит расчету для описания квазистатического состояния среды в динамической форме. Любое мгновенное изменения состояния системы вводится как переходный процесс, занимающий некоторый условный промежуток времени, подбирающийся специально и так, чтобы сугубо динамические процессы в системе пришли в квазистационарное состояние, в том числе благодаря наличию искусственной вязкости.



Crust and upper-mantle section across the NE Japan Arc (Profiles A1–3 in Fig. 1) modified from Iwasaki and Sato (2009). Original structural models were presented by Nishisaka et al. (1999, 2001), Iwasaki et al. (2001) and Takahashi et al. (2004). Open triangles indicate coast lines. A: Kitakami Mountains. B: Kitakami Iowland. C: Ou backbone range. F1: Western boundary fault of the Kitakami Iowland. F2: Kawafune fault. F3: Sen'ya fault. QVF: Quaternary volcanic front. Crustal thinning is evident in a region from – 150 to 0 km. Beneath the Yamato basin (shaded area), the upper and lower crustal thicknesses are almost constant. Lines a–d are Moho depths by Nakajima et al. (2002), Zhao et al. (1990, 1992a) and Katsumata (2010), respectively.



Рис. 2-Геометрия разреза по работе [16] (сверху) и обобщенный геофизический профиль, созданный нами для при проведения численного моделирования (снизу). Треугольником на нижнем рисунке отмечен тальвег Японского глубоководного желоба.

Численное моделирование. Вероятные механизмы воздействия

В качестве альтернативы традиционным механизмам нагружения(латеральное давления со стороны океанической литосферы нами была рассмотрена гипотеза, развиваемая Ю.Л. Ребецким[8], о возможности создания горизонтального сжатия в литосфере активных континентальных окраин за счет действия малых тангенциальных массовых сил. Согласно этой гипотезе в литосфере Охотского и Японского морей эти массовые силы направлены субортогонально тальвегам Курильского и Японского желобов.

В течение длительного периода времени, предшествовавшего сильному землетрясению, эти массовые силы вместе с действием других процессов формировали в литосфере режим напряженного состояния, полученный по результатам тектонофизической реконструкции (см. рис. 1). При этом горизонтальные массовые силы были уравновешены касательными напряжениями, действовавшими в противоположном направлении со стороны мантии.

После мега-землетрясения Тохоку произошло резкое надвигание субконтинентальной литосферы на океаническую (в направлении на восток – юго-восток) и напряжения горизонтального сжатия сменились на горизонтальное растяжение. В численном расчете оценивалась возможность восстановления горизонтального сжатия зав счет действия распределенных в объеме тангенциальных сил.



Рис. 3 - Результаты расчета для базовой модели начального гравитационного состояния (a)и модели с тангенциальными силами (b): отношение вертикального и горизонтального нормальных напряжений. Массовые силы ориентированы латерально, действуют в сторону океана в коре модели (центральная часть).

Как следует из рис. 3*б*, действие тангенциальных массовых сил привело к тому, что в литосфере субконтинентального склона в области, отмеченной пунктиром формируется режим латерального сжатия.

Заключение

По результатам численного моделирования, выполненного на модельном профиле земной коры переходной области «океан-континент» в районе очаговой области мега-землетрясения Тохоку (2011 г.),и совместного анализаобобщенной модели напряженного состояния этого региона, построенной на основе реконструкции напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений (метод катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого) в окрестностях острова Хонсю, показано, что в рамках упруго-пластической реологии тангенциальные силы могут быть источником передачи тектонических напряжений и формировать напряженное состояние, по характеру соответствующее результатам тектонофизической реконструкции методом катакластического анализа.

Благодарности

Авторы искренне благодарны научному коллективу под руководством Ю.П. Стефанова (ИНГГ СО РАН, ИФПМ СО РАН) за предоставление разработанного ими расчетного комплекса для численного моделирования и консультации по его применению к решению задач изучения особенностей регионального напряженно-деформированного состояния земной коры.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ 16-05-01-115.

Список литературы:

1. Владимирова И.С. Моделирование постсейсмических процессов в субдукционных зонах // Геодинамика и тектонофизика. 2012. №3(2). С. 167-178. DOI:10.5800/GT-2012-3-2-0068

2. Ермаков В.А., Гарагаш И.А., Гонтовая Л.И. Модель тектоно-магматических процессов в Ключевской группе вулканов (по геолого-геофизическим данным) // Вестник КРАУНЦ: Науки о Земле. 2014. № 2.Вып. 24. С. 116-129.

3. Погорелов В.В., Конешов В.Н., Ребецкий Ю.Л. Численное моделирование напряжений западного фланга Зондскойсубдукционной области // Вестник КРАУНЦ: Науки о Земле. 2010. № 2.Вып. 15. С. 174-192.

4. Погорелов В.В. Тектонофизический анализ напряжений земной коры Зондской сейсмоактивной области / Диссертация на соискание степени кандидата физ.-мат. наук. ИФЗ РАН. 201 с.

5. Ребецкий Ю.Л.Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения // Геофизический журнал. 2007. Т 29. №6. С. 92-110.

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

406 с. 7. Ребецкий Ю.Л.Напряженное состояние, благоприятное для крупномасштабного хрупкого разрушения горных пород // Доклады РАН. 2007. Т 416. № 5. С. 106-109.

8. Ребецкий Ю.Л.О возможности существования в литосфере малых тангенциальных массовых сил. Их роль в тектонике и геодинамике // Геодинамика и тектонофизика. 2016. № 7(4). С. 691-704. DOI: <u>10.5800/GT-2016-7-4-0229</u>

9. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, Вып. 2. С. 469-506.DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0137.

10. Романюк Т.В., Власов А.Н., Мнушкин М.Г., Михайлова А.В., Марчук Н.А. Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас (Калифорния). Статья 1. Разлом Сан-Андреас как тектонофизическая структура // МОИП, отд. Геологич. 2013. Т.88. Вып. 1. С. 3-19.

11. Романюк Т.В., Власов А.Н., Мнушкин М.Г., Михайлова А.В., Марчук Н.А. Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас (Калифорния). Статья 2. Тектонофизическая модель литосферы // МОИП, отд. Геологич. 2013. Т.88. Вып. 2. С. 3-17.

12. Романюк Т.В., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Михайлова А.В. Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас (Калифорния). Статья З. З-D моделирование напряженно-деформированного состояния литосферы методом конечных элементов // МОИП, отд. Геологич. 2014. Т.89. Вып. 2. С. 3-26.

13. Романюк Т.В.Литолого-петрофизические характеристики пород, флюидный и геодинамический режимы крипового сегмента разлома Сан-Андреас // МОИП, отд. Геологич. 2016. Т.91. Вып. 2-3. С. 3-23.

14. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упругохрупкопластичных материалов // Физическаямезомеханика.2005. Т. 8. № 3. С. 129–142.

15. Hardebeck J. Coseismic and postseismic stress rotations due to great subduction zone earthquakes // Geophysical Research Letters 39 (21), L21313. DOI: 10.1029/2012GL053438.

16. Iwasaki T., Levin V., Nikulin A., Iidaka T. Constraints on the Moho in Japan and Kamchatka // Tectonophysics. 2013. V. 609. C. 184–201.

17. Kopp H., Klaeschen D., Flueh J., Bialas J., Reichert Ch. Crustal structure of the Java margin from seismic wide-angle and multichanel refraction data // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № B2. P. 1029. DOI: 10.1029/2000JB000095

18. Nakamura Y., Kodaira S., Cook B.J., Jeppson T., Kasaya T., Yamamoto Y., Hashimoto Y., Yamaguchi M., Obana K., Fujie G. Seismic imaging and velocity structure around the JFAST drill site in the Japan Trench: low Vp, high Vp/Vs in the transparent frontal prism // Earth, Planets and Space. 2014. V.66. C. 121–132

19. Nugraha A. D., Mori J., Ohmi Sh. Thermal structure of the subduction zone in western Japan derived from seismic attenuation data // GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS. 2010 V. 37. L06310. DOI:10.1029/2009GL041522

20. NishizawaA., Kaneda K., Oikawa M. Seismic structure of the northern end of the Ryukyu Trench subduction zone, southeast of Kyushu // Earth, Planets and Space. 2009. V.61. C. 37–40

21. *Pauselli C., Federico C. Braun J.* Crustal deformation in subduction zones: information from numerical modelling // GNGTS – Atti del 19 Convegno Nazionale14.05.2005. C.110-126.

22. *RebetskyYu.L., PoletsA.Yu., Zlobin T.K.* The state of stress in the Earth's crust along the northwesternflank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // Tectonophysics. 2016. V. 685. P. 60-76.

23. Steblov G.M., Vladimirova I.S. Rheological Models of Great Subduction Earthquakes from Simultaneous Inversion of Coseismic and Postseismic GPS Data / Abstract T22A-04 presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif. 2012.

24. Wang J., Zhao D. P wave anisotropic tomography of the Nankai subduction zone in Southwest Japan // Geochem.Geophys.Geosyst. 2012. V. 13. N 5. Q05017.doi:10.1029/2012GC004081

25. Wilkins M.L. Computer Simulation of Fracture / Lawrence Livermore Laboratory, Rept. UCRL-75246. 1972.

Электронныересурсы:

26. Japan AgensyforMarine-Earth Sciences and Technology (JAMSTEC). Официальный сайтагентства: http://www.jamstec.go.jp