

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 550.34:551.24

П.Н. Рожин¹

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ИЗОСТАТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ЦУНАМИГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

Предложена гипотеза о том, что цунамигенные землетрясения в зонах субдукции, в которых господствует геодинамическая обстановка поддвига (горизонтального сдвига вдоль горизонтальной же плоскости), обусловлены развитием субвертикальных мегасколов Риделя R' , нехарактерных для обстановки сдвига. Данные мониторинга изменения значений силы тяжести и GPS на примере Японского землетрясения 2011 г. указывают на проявление изостазии в виде тенденции к сглаживанию контраста рельефа между островной дугой и глубоководным желобом. Этот изостатический фактор и является причиной формирования очагов цунамигенных землетрясений.

Ключевые слова: сколы Риделя, цунамигенные землетрясения, зона субдукции, изостазия, данные о силе тяжести, данные GPS, Японское землетрясение 2011 г.

Your attention is invited to a hypothesis, which states that tsunamigenic earthquakes in a subduction zone where geodynamic situation of the underthrusting (horizontal shear along horizontal plane) prevails are caused by development of subvertical Riedel-megashears R' which are uncharacteristic for the shear situation. The monitoring data on gravity field evolution and GPS (evidence from the Japan earthquake 2011) point at isostasy which is appeared in tendency to smooth a relief between island arc and abyssal trench. Isostatic factor is suggested to be a cause of tsunamigenic earthquake focuses formation.

Key words: Riedel-shears, tsunamigenic earthquakes, subduction zone, isostasy, gravity data, GPS data, Japan earthquake 2011.

Введение. Установлено, главным образом на основе экспериментов, что в обстановках горизонтального сдвига (вдоль как вертикальной, так и горизонтальной плоскости) преобладают сколы Риделя, образующие небольшой угол с осью сдвиговой зоны (рис. 1). Однако в последнее время появились данные, свидетельствующие о существенной роли сколов в зонах субдукции, которые можно идентифицировать как сколы Риделя типа R' — взбросы поверхности океанского дна, вызывающие цунами.

Сведения касаются зон субдукции, в которых сильные землетрясения, не сопровождающиеся цунами, чередуются во времени с сильными цунамигенными землетрясениями [Рогожин, Захарова, 2006]. На рис. 2 показаны положение и ориентировка таких землетрясений. Их ориентировка такова, что в зоне сдвига, обусловленного поддвигом океанической плиты, полого падающие сейсмические очаги можно квалифицировать как сколы Риделя R , а круто падающие — как сколы R' [Гончаров, 2006].

Постановка задачи. Предположив, что цунамигенные землетрясения обусловлены именно развитием сколов Риделя R' , и при отсутствии экспериментальных данных автор попытался исследовать влияние дополнительных факторов.

Один из таких факторов — сила тяжести, которая в обстановке горизонтального сдвига вдоль вертикальной плоскости вызывает только литостатическое давление [Гончаров, 2006]. В рассматриваемом же

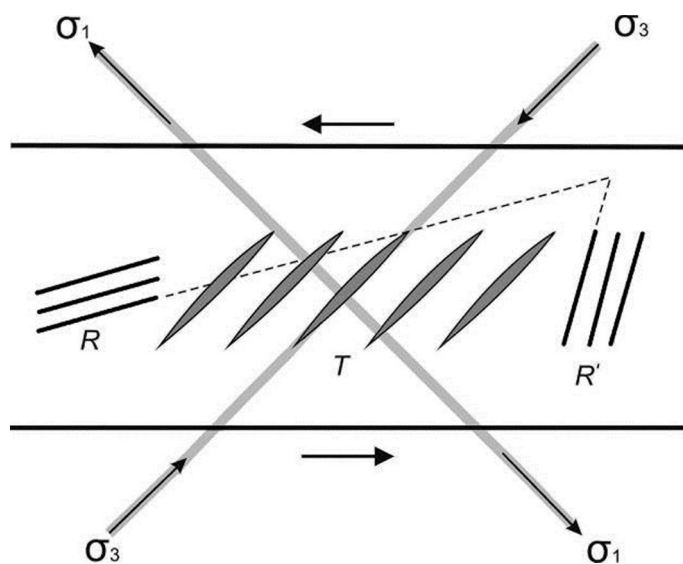


Рис. 1. Типичные сколы Риделя (R и R') и трещины отрыва (T) в обстановке сдвига, по [Гончаров и др., 2011]

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; e-mail: grayvoid@mail.ru

случае сама по себе сила тяжести должна препятствовать формированию крутопадающих сколов Риделя типа *R'*.

Однако одно из проявлений силы тяжести — ее аномалия в зонах субдукции — потенциально способно вызвать противоположный эффект, так как субдукция порождает не только «структурную пару» — глубоководный желоб и островную дугу, но и резкое нарушение гравитационного потенциала, т.е. отрицательную аномалию силы тяжести в области желоба и положительную аномалию в зоне дуги. Это нарушает изостатическое равновесие. Формирование же крутого скола — взброса, направленного со стороны желоба (рис. 2), восстанавливает это равновесие [Гончаров, 2006].

На примере землетрясения 11 марта 2011 г. у восточного побережья о. Хонсю в Японии (Тохоку-Оки) выявлены некоторые важные особенности в пользу фактора изостатического равновесия в предположении, что именно оно ответственно за формирование крутых сколов *R'*.

Особенности кинематики зоны субдукции во время землетрясения. Цунамигенное землетрясение с магнитудой 9,0 произошло 11 марта 2011 г. в р-не Японского желоба, где наблюдается процесс субдукции Тихоокеанской плиты под Охотскую континентальную плиту. В гипоцентре, на глубине 24–32 км, произошел взброс, плоскость сместителя которого круто (78–84°) падает в сторону океана [Геофизическая служба..., 2011]. В районе эпицентра, лежащем к юго-востоку от о. Хонсю, также образовался взброс поверхности морского дна с амплитудой более 8 м (рис. 3) [Takeshi Tsuji et al., 2011].

По данным GPS, во время землетрясения на о. Хонсю (юго-восточная часть островной дуги) были зафиксированы смещения как по горизонтали, так и нисходящие по вертикали (рис. 4) [Pollitz, 2011]. По амплитуде горизонтальные смещения значительно превосходят вертикальные и направлены центро-стремительно в сторону эпицентра. Амплитуда как горизонтальных, так и вертикальных смещений максимальна на юго-восточном побережье о. Хонсю и убывает на северо-запад. Это свидетельствует о том, что горизонтальные смещения не вызваны некой внешней силой, направленной с северо-запада, со стороны Японского моря, но, возможно, являются результатом изостатического сглаживания контраста рельефа между островной дугой и желобом.

Это предположение подтверждается и кинематической картиной на юго-востоке от эпицентра во время землетрясения. В этом районе, по данным [Takeshi Tsuji et al., 2011], во время землетрясения также зафиксировано горизонтальное смещение по-

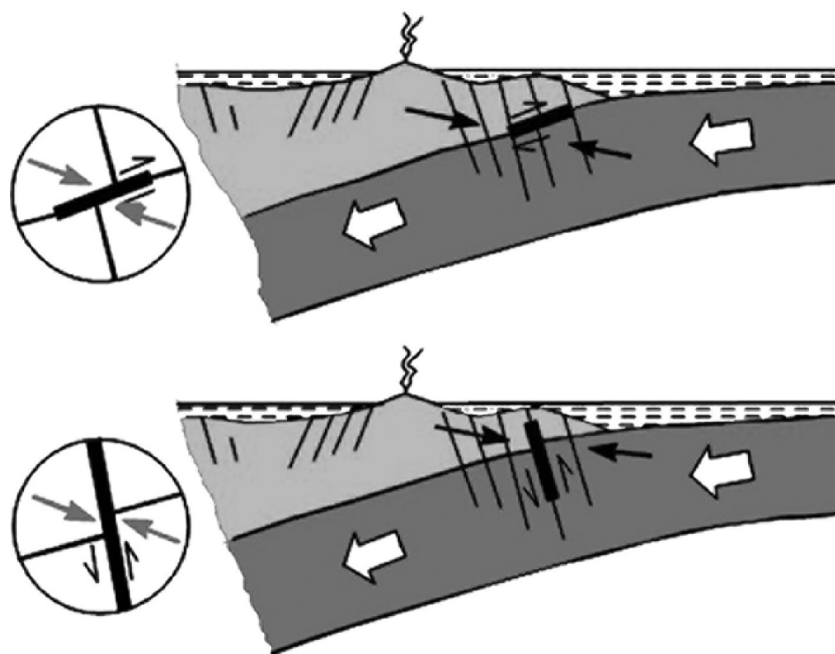


Рис. 2. Модель возникновения полого- и крутопадающих сейсмических очагов (толстые черные отрезки) на материковом склоне островной дуги (белые стрелки — направление движения океанической плиты, черные стрелки — оси напряжения сжатия, односторонние черные стрелки — смещение крыльев действующей плоскости в очаге). В кружках слева показаны в укрупненном виде смещения в очагах землетрясений, по [Рогожин, Захарова, 2006]

род поверхности океанского дна в сторону желоба, но с компонентой вертикального поднятия (рис. 5). Смещение проявилось во взбросовых движениях по разломам в районе аккреционной призмы (главный из них имеет амплитуду более 8 м, рис. 3), которые, по мнению [Takeshi Tsuji et al., 2011], имеют отношение непосредственно к цунамигенным разломам.

Как указано выше, в зоне субдукции наблюдается резкое нарушение гравитационного потен-

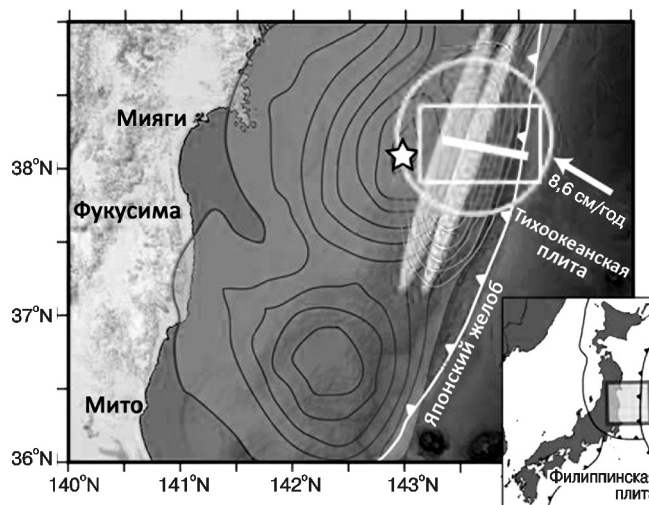


Рис. 3. Местоположение эпицентра цунамигенного землетрясения у восточного побережья о. Хонсю (Япония). На юго-восток от него — взброс поверхности морского дна с амплитудой более 8 м и протяженностью несколько десятков километров вдоль линии желоба (удлиненные светлые овалы), по [Takeshi Tsuji et al., 2011]

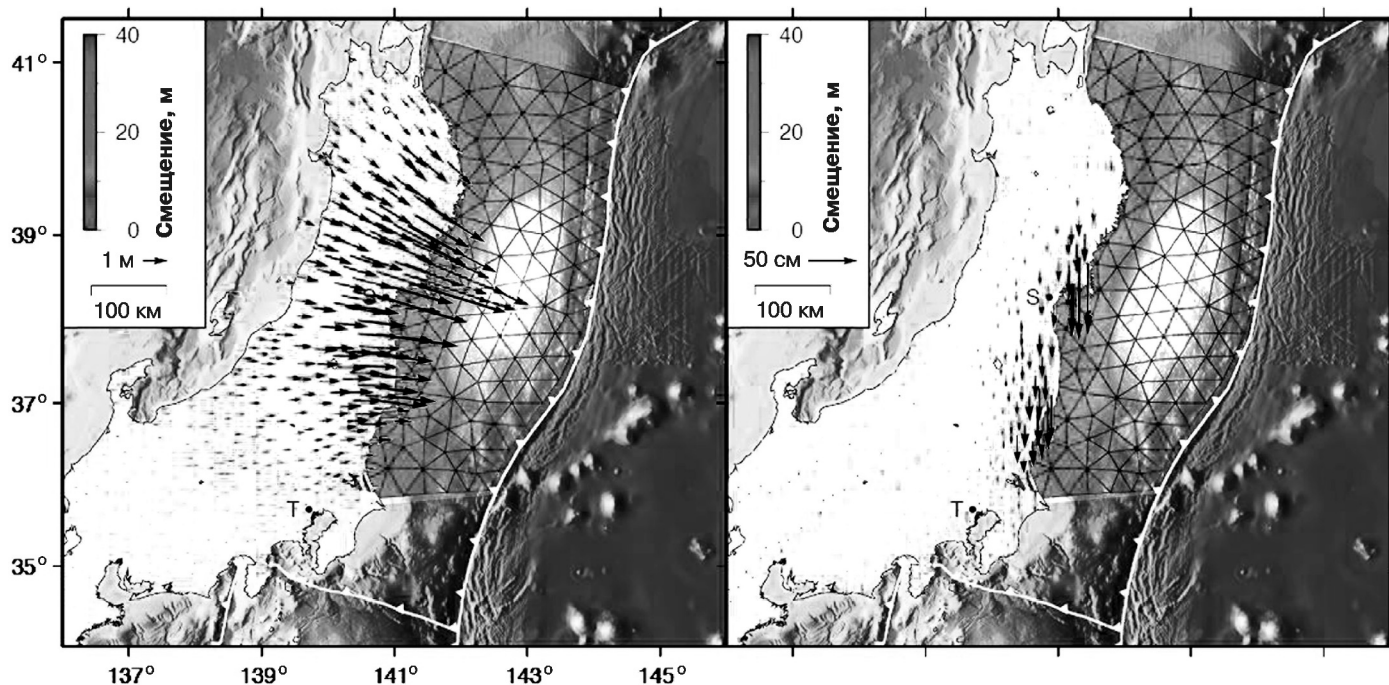


Рис. 4. Смещение поверхности юго-восточной части островной дуги (о. Хонсю), по данным GPS, во время землетрясения, по [Pollitz, 2011]

циала — отрицательная аномалия силы тяжести в области желоба и положительная аномалия в зоне дуги, что обусловлено процессом субдукции, который способствует поднятию островной дуги и углублению глубоководного желоба (рис. 6). Опускание же юго-восточной части островной дуги о. Хонсю и поднятие северо-западного борта желоба во время землетрясения представляют собой противоположный процесс. Этот процесс, по данным спутниковой миссии GRACE, вызвал изменения в поле силы тяжести во время землетрясения и в первые месяцы после него (рис. 7). Весьма примечательно, что очаг землетрясения находится как раз между аномалиями разного знака.

Исследуя влияние фактора изостазии на возникновение цунамигенных землетрясений, автор выявил корреляцию рассмотренной кинематической картины на поверхности литосферы с геодинамическими моделями [Злобин, 2006; Гончаров, 2006]. Согласно работе [Злобин, 2006], причиной формирования зоны субдукции служит подъем мантийного диапира (рис. 8). Исследования М.А. Гончарова [2006] экспериментально подтверждают эту концепцию (рис. 9): модель воспроизведения мантийного диапира предполагает наличие компенсирующего, резко асимметричного прогиба, имитирующего глубоководный желоб наверху и зону субдукции на глубине. В соответствии с моделью происходит опускание вещества

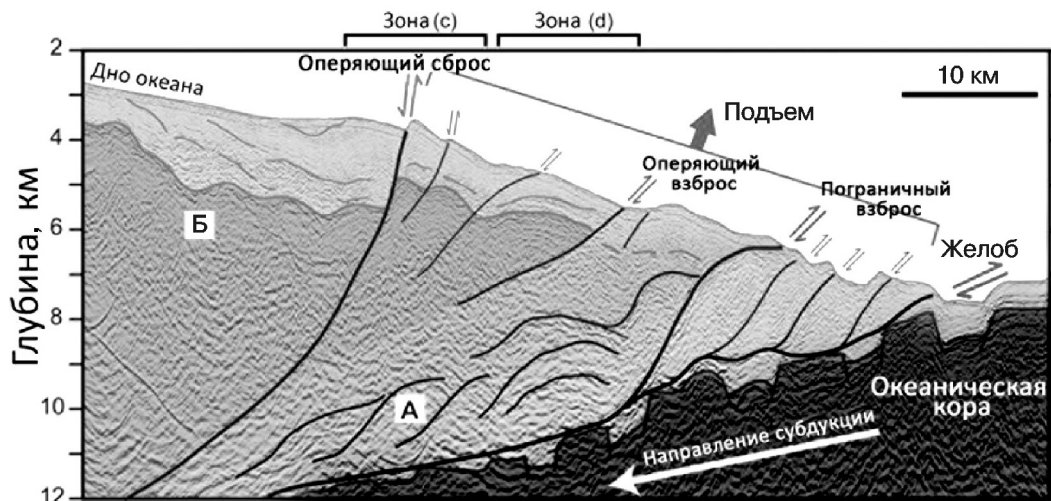


Рис. 5. Тектоническая интерпретация сейсмического профиля к юго-востоку от эпицентра, по [Takeshi Tsuji et al., 2011]. Показана зона взбросовых поднятий в районе аккреционной призмы (А — подслаивание (?), Б — меловой комплекс)

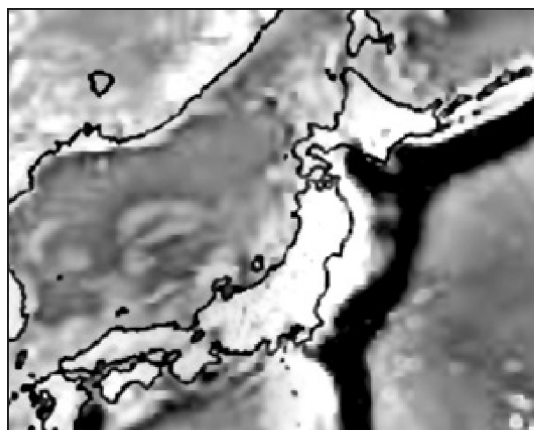


Рис. 6. Карта гравитационного поля в районе Японской зоны субдукции (до землетрясения) [Проект Gravity field and steady-state ocean circulation explorer, 2011]. Белое — область положительных аномалий силы тяжести, черное — отрицательных

в зону субдукции, в результате возникает аномалия силы тяжести. Крутой взброс в очаге цунамигенного землетрясения, схематично показанный на рис. 8, может восстановить изостатическое равновесие, «взбрасывая» желоб на дугу. Движение породных масс из-под островной дуги в сторону океана и вверх после

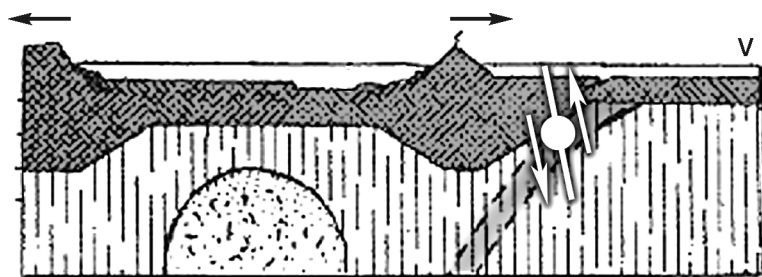


Рис. 8. Геодинамическая модель одного из этапов эволюции системы окраинное море—островная дуга—глубоководный желоб, по [Злобин, 2006], с сокращениями. Показан мантийный диапир — причина возникновения зоны субдукции

землетрясения, о чем свидетельствуют данные GPS, возможно, есть следствие изостатического стремления уменьшить контраст рельефа и тем самым гравитационную аномалию.

Заключение. При изучении влияния фактора изостатического равновесия на формирование очагов цунамигенных землетрясений в зоне субдукции обнаружены некоторые особенности кинематики поверхности литосферы сразу после сейсмического события (на примере Японского землетрясения 2011 г.). Опускание островной дуги, поднятие борта желоба и компенсационное горизонтальное движение

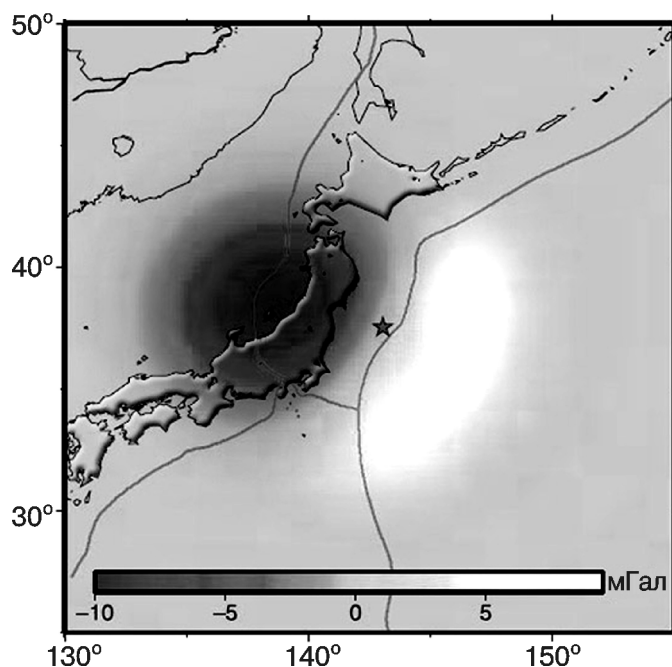


Рис. 7. Изменение поля силы тяжести во время землетрясения, по [Lei Wang et al., 2012] (темное — уменьшение, светлое — увеличение)

породных масс поверхности от дуги в сторону океана, возможно, являются проявлением изостатического сглаживания контраста рельефа в зоне гравитационной аномалии.

Также выявлена корреляция кинематической картины с геодинамической моделью, объясняющей возникновение процесса субдукции, и следовательно, аномалию силы тяжести, связанную с ней. Формирование взброса (скола Риделя типа R') можно трактовать как процесс, ведущий к восстановлению изостатического равновесия между дугой и желобом.

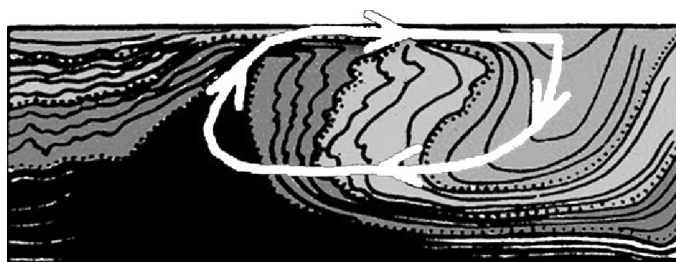


Рис. 9. Воспроизведение мантийного диапира и компенсирующего его прогиба, имитирующего глубоководный желоб наверху и зону субдукции на глубине, по [Гончаров, 2006]. Стрелками показано перемещение масс в процессе конвекции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геофизическая служба РАН, сейсмологический каталог, 2011. URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl?mode=1&id=168 (дата обращения: 15.09.2012).

Гончаров М.А. Количественные соотношения геодинамических систем и геодинамических циклов разного ранга // Геотектоника. 2006. № 2. С. 3–23.

Гончаров М.А., Фролова Н.С., Захаров В.С., Рожин П.Н. Цунамигенные землетрясения в зонах субдукции как результат быстротечного формирования мегасколов Риделя R' при формировании кулисообразно расположенных мегатрещин отрыва // Проблемы сеймотектоники: Мат-лы XVII Междунар. конф. 20–24 сентября 2011 г. / Под ред.

А.О. Глико, Е.А. Рогожина, Ю.К. Шукина и др. М., 2011. 590 с.

Злобин Т.К. Охотская литосферная плита и модель эволюции системы «окраинное море — островная дуга — глубоководный желоб» // Вестн. ДВО РАН. 2006. № 1. С. 26–32.

Проект GOCE (Gravity field and steady-state ocean circulation explorer), 2011. URL: <http://www.esa.int/esaLP/LPgoce.html> (дата обращения: 20.08.2012).

Рогожин Е.А., Захарова А.И. Сейсмоструктура очаговых зон цунамических землетрясений // Геофиз. исследования. 2006. Вып. 6. С. 3–12.

Lei Wang, Shum C.K., Simons Fr.J. et al. Coseismic and postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake constrained by GRACE gravimetry // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. LO7301, doi: 10.1029/2012GL051104.

Pollitz F. Preliminary geodetic slip model of the 2011 M9.0 Tohoku-chiho Taiheiyo-oki Earthquake // US GS publ. 2011.

Takeshi Tsuji, Yoshihiro Ito, Motoyuki Kido et al. Potential tsunamigenic faults of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* 2011. Vol. 63. P. 831–834.

Поступила в редакцию
25.10.2012