

**СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ и СЕЙМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ОЧАГА
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ 11 марта 2011 г. с $M_w=9$ (о. Хонсю, Япония)**

Е.А. Рогожин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, eurog@ifz.ru

Введение. В статье приводятся материалы предварительного анализа результатов обследования сильнейшего землетрясения, произошедшего 11 марта 2011 г. в $05^{\text{h}}46^{\text{m}}$ к востоку от о. Хонсю в Японии.

Изучение очаговых областей землетрясений в России и в ведущих зарубежных странах проводится обычно по нескольким основным направлениям. Первое направление – анализ телсейсмических данных, собранных мировой и национальной сетями сейсмических станций. Эти исследования дают сведения о координатах эпицентра, глубине очага, сейсмическом моменте, фокальном механизме, времени и магнитуде главного толчка.

Второе направление – эпицентральные наблюдения в очаговой области. В рамках этого направления осуществляются сеймотектонические, сейсмологические, геофизические и геодезические исследования в очаговой области. Детальное изучение деформаций поверхности на суше с помощью геодезических методов является единственным источником информации о характере дислокаций, возникших в эпицентральной области подводных сильных сейсмических событий, каким является описываемое в статье землетрясение. Геодезические данные позволяют составить обоснованное мнение о прямых геологических проявлениях сейсмического очага на поверхности земли – его размерах, структуре и характере сейсмогенерирующей подвижки. Изучение афтершокового процесса с помощью сетей мировых и близлежащих сейсмических станций дает представление о строении очага землетрясения на глубине и его проекции на поверхности. Макросейсмическое обследование эпицентральной зоны и региона сейсмического события позволяет понять закономерности распределения на поверхности сейсмических колебаний.

Третье направление – аналитическое. Здесь на основании всех собранных данных строится трехмерная модель сейсмического очага с реконструкцией главных плоскостей подвижек, амплитуды и направления импульсных смещений. Выясняется положение и строение сейсмогенерирующей структуры (зоны).

В процессе изучения очагов сильных землетрясений можно решить ряд важных фундаментальных и прикладных задач. Так, определение параметров каждого нового сильнейшего землетрясения, проводимое комплексом сейсмологических методов, дает возможность обновить и нарастить сейсмический каталог, а значит, и расширить наши знания о сейсмичности Японско-Курильской дуги в целом. Выявление и изучение геологической структуры, ответственной за происхождение данного землетрясения, позволяет понять, может ли эта структура породить еще более сильные толчки, как часто могут происходить такие толчки, и может ли сейсмическая активизация распространиться в соседние подвижные с геологической точки зрения зоны [1]. Так, при исследовании нескольких сильных сейсмических событий: Дагестанского землетрясения 1970 г., Газлийских землетрясений в Узбекистане 1976 и 1984 гг. часть эпицентров повторных толчков (афтершоков) проявилась западнее. В первом случае на территории Чечни, где на месте их концентрации в 1976 г. произошло Черногорское сильное землетрясение, а во втором случае – после каждого нового сильного удара повторные толчки распространялись все дальше на запад в область следующего сильного сейсмического события. Таким образом, выяснилось, что афтершоки одного землетрясения могут быть одновременно форшоками нового, готовящегося сейсмического толчка.

Приводимые в статье данные по эпицентральной области сильнейшего землетрясения Тохоку взяты из оперативных сведений, приведенных на сайтах Геофизической службы РАН, Геологической службы США, Метеорологического агентства Японии [2–5] и выставленных в Интернете работ японских специалистов. В то же время, автор имеет богатый опыт обследо-

вания многих сейсмических событий в разных геодинамических обстановках и, в частности, на Дальнем Востоке России.

Описание последствий. 11 марта 2011 г. в 05^h46^m у восточного побережья о. Хонсю, Япония, произошло разрушительное землетрясение с $M=8.8-9.0$ (по разным оценкам), повлекшее за собой человеческие жертвы и разрушения. Эпицентр события располагался в Тихом океане на материковом склоне примерно в 120 км восточнее побережья острова (рис. 1).

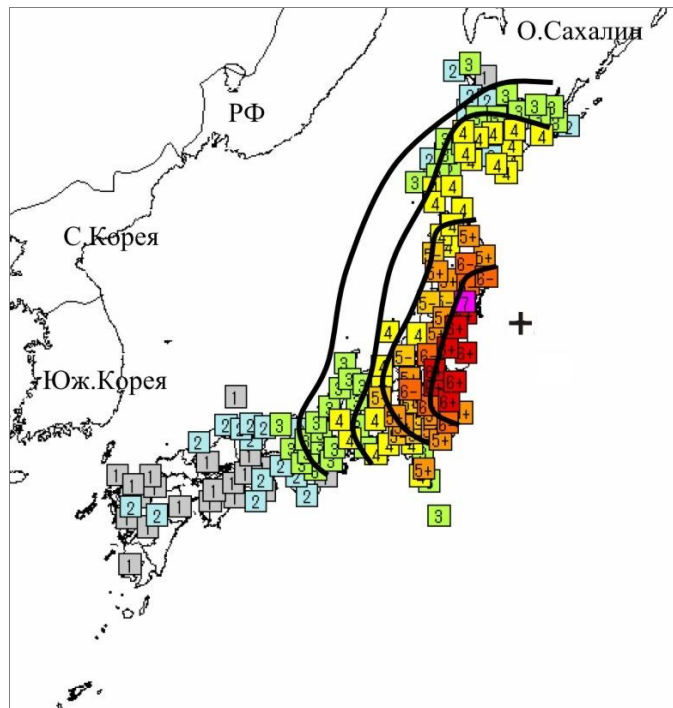


Рис. 1. Макросейсмические проявления землетрясения Тохоку по данным Японского метеорологического агентства – интенсивность в баллах шкалы JMA

Крестом отмечен эпицентр главного толчка. Цифра со знаком плюс означает, что интенсивность превышает указанное значение балльности, а со знаком минус – интенсивность ниже этого значения. Интенсивность 7 – наивысшая по шкале Шиндо (JMA) [http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/2011_Earthquake_Intensity.pdf].

Это землетрясение входит в ряд известных сейсмических катастроф 20-го и начала 21-го веков (Северо-Курильское 1952 г., $M=9.0$; Чилийские 1960 г., $M=9.5$ и 2010 г., $M=8.8$; Аляскинское 1964 г., $M=9.1-9.2$; Суматранские 2004 г., $M_w=9.2$ и 2005 г. с $M_w=8.5$). Оно – одно из сильнейших, произошедших в последнее время в мире. По данным Геологической службы США, его магнитуда 9.0 по шкале Рихтера. Глубина гипоцентра землетрясения составила около 30 км. Учитывая размеры очаговой области при такой магнитуде, верхняя кромка очага находится практически у поверхности дна, в океане. Землетрясение было хорошо изучено. Начиная с момента главного толчка, сейсмологическая сеть Японии и всего мира регистрировала повторные толчки. Ценный сейсмологический материал о главном ударе и афтершоках собран региональной сетью сейсмических станций Японии (Метеорологического агентства Японии и Геологической службы [2, 3, 6]). В ионосфере над эпицентром через 8.7 мин после события по наблюдениям со спутников GPS обнаружен четкий сигнал в виде вариаций полного электронного содержания, возникший в результате возникновения моментальной деформации дна океана и, соответственно, поверхности воды [7].

На Южных Курильских островах сработала система оповещения о цунами [8]. Как сообщило МЧС России, из зоны возможного подтопления были эвакуированы около 11 тысяч человек, все силы и средства спасателей были приведены в повышенную готовность. Волны цунами зарегистрированы в районе о. Кунашир (вблизи г. Южно-Курильск), у о-вов Шикотан и Итуруп, высота их достигала двух метров [9].

Японские и российские сейсмологи это землетрясение ожидали в долгосрочном аспекте [1, 5, 10–13], ожидалось и цунами сразу же после главного толчка, но никто не мог предсказать

такую высокую магнитуду и, соответственно, высоту волны. Кроме того, сильное ($M=7.7$) землетрясение [14], возникшее в том же сейсмическом очаге 9 марта 2011 г. за два дня до главного толчка Тохоку, было принято некоторыми японскими сейсмологами за реализацию сейсмического прогноза. Большая скорость распространения волны и малое расстояние от очаговой зоны до побережья не позволили властям Японии вовремя среагировать на прогноз цунами.

Землетрясение вызвало сильное цунами, в ряде районов высота приливной волны превысила десять метров. В нескольких префектурах цунами снесло дома и находившиеся на дорогах машины. Гигантская волна накрывала поля и дороги, разрушила многочисленные здания и сооружения, выбросила на берег корабли. По предварительным данным, в результате удара стихии были полностью или частично разрушены более 50 тысяч домов. В стране прекратили работу несколько атомных и теплоэлектростанций. Цунами полностью затопило взлетно-посадочные полосы аэропорта Сендай. Сильные пожары вспыхнули на нефтеочистных и газовых сооружениях, на сталелитейном заводе. На АЭС «Фукусима-1» произошли взрывы оболочек контура охлаждения реакторов. При этом сами реакторы и их оболочки повреждены не были. В радиусе 30 км была объявлена эвакуация. Число погибших и пропавших без вести в результате землетрясения и цунами в Японии превышает 25 тысяч человек, как сообщило информационное агентство Киодо. Число эвакуированных составляет 450 тысяч человек.

Макросейсмические проявления и сведения об ускорениях грунта. Землетрясение ощущалось на северо-востоке о. Хонсю с интенсивностью до 7 баллов по девятибалльной японской шкале JMA [15] (рис. 1). По принятой в России шкале MSK-64 [16] на Корейском полуострове и на востоке КНР – $I_i=3-5$ баллов, а также на территории России на юге Сахалина и Курильских островах: в Южно-Курильске, Курильске – 4 балла, в Малокурильском – 3 балла. Афтершок в 06^h25^m ощущался в Южно-Курильске с $I_i=5$ баллов, в Курильске – 4 балла [9].

Следует подчеркнуть, что зона шести- и семибалльных разрушительных сотрясений (в баллах JMA) занимает сравнительно небольшую площадь на востоке о. Хонсю. В целом же на суше макросейсмический эффект был умеренным. Только небольшая по площади область на востоке острова испытала сотрясения интенсивностью до 9 баллов по принятой в России двенадцатибалльной шкале MSK-64. Похожим образом распределились зарегистрированные значения пиковых ускорений грунта¹. В западной части острова они составили $5-20 \text{ см/с}^2$, а в северо-восточной достигали величины $50-200 \text{ см/с}^2$. Только на небольших участках восточного побережья Хонсю отмечены значения 500 см/с^2 , а в единичных случаях ускорения достигали значения $1 g$. Поскольку в стране распространено сейсмостойкое строительство зданий и сооружений, собственно с сейсмическими колебаниями было связано не так много разрушений и жертв.

Структура очага по сейсмологическим данным. Главный толчок землетрясения Тохоку, как сказано выше, предварялся сильным подводным землетрясением 9 марта 2011 г. с $M=7.7$ [14]. Эпицентр этого предварительного толчка был пространственно близок по положению к эпицентру главного толчка землетрясения 11 марта (рис. 2).

У этого события зарегистрирован шлейф собственных афтершоков, которые в ретроспективе можно рассматривать как форшоки главного толчка 11 марта.

За первые 10 дней после главного толчка произошло несколько тысяч афтершоков с магнитудой от 3 до 7.5. Причем эпицентры сильнейших из них располагались в разных частях очаговой области (рис. 3). Так, повторный толчок, произошедший в $06^h25^m50^s$, $M=7.7$, был приурочен к восточной части этой области, к океаническому склону глубоководного желоба, а афтершок, возникший по времени в $06^h15^m40^s$ с $M=7.9$, – к южной части эпицентральной зоны в пределах глубоководной морской террасы на материковом склоне.

Сеймотектоническая позиция очага землетрясения Тохоку определяется, исходя из положения облака эпицентров главного толчка 11 марта и повторных толчков в первые несколько дней активизации (рис. 3). Согласно картине распространения эпицентров афтершоков трех дней после главного удара, очаг был вытянут в север–северо-восточном направлении вдоль восточного побережья о. Хонсю, имел длину около $L_1=560-600 \text{ км}$ и ширину порядка $W_1=200 \text{ км}$. Облако эпицентров представлялось единым, не разделялось на отдельные ветви и охватывало весь материковый склон о. Хонсю, глубоководный желоб и его восточный, океанический склон (рис. 2).

¹ Сейсмические воздействия, зарегистрированные на поверхности земли с помощью сейсмических приборов акселерографов и измеряющиеся в единицах ускорений (см/с^2) или долей ускорения свободного падения (g).

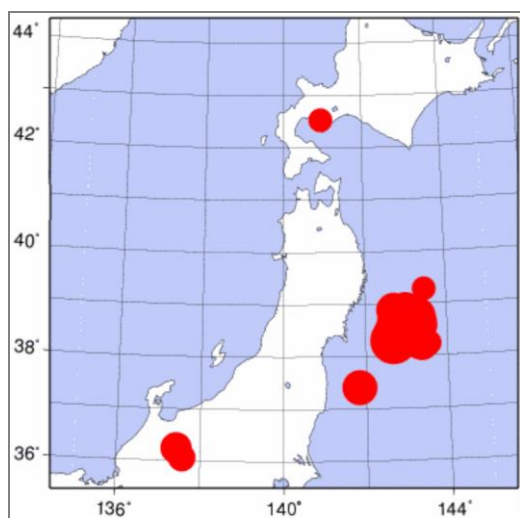


Рис. 2. Распределение² эпицентров афтершоков в первые три дня после форшока 9 марта с показом положения эпицентра главного толчка землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г.

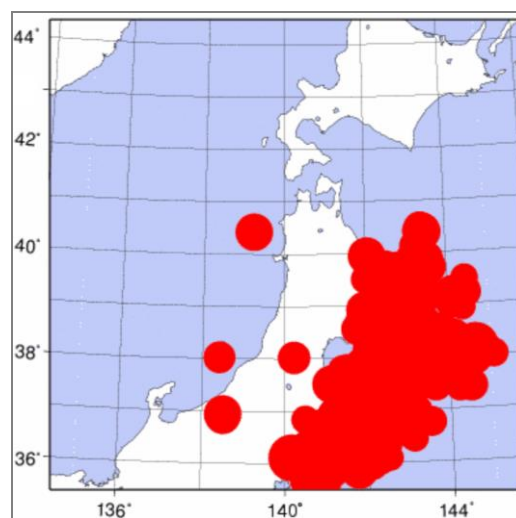


Рис. 3. Распределение эпицентров главного толчка и сильнейших афтершоков в период 11–16 марта после главного толчка землетрясения Тохоку

Однако, уже через две недели, когда интенсивность афтершокового процесса несколько снизилась, облако афтершоков отчетливо разделилось на несколько ветвей (рис. 4). Так, обозначилась линейно вытянутая в север–северо-восточном направлении зона эпицентров на восточном склоне глубоководного желоба длиной порядка $L_2=300$ км и шириной – $W_2=20$ км. Обособились северная и южная области сгущения эпицентров на приостровном склоне о. Хонсю, которые как бы оконтуривают края очаговой области в целом. К северному сгущению относится эпицентр форшока 9 марта с его афтершоковыми последовательностями, а к южному сгущению тяготеет эпицентр сильнейшего афтершока 11 марта с $M=7.9$ с последовавшими за ним афтершоками, т.е. единая очаговая область распалась на три отдельных субочага.

Эта тенденция сохранилась и в последующий период (рис. 5). В силу затухания афтершоковой активности южное и северное сгущения эпицентров стали не столь плотными, и южное облако распалось на две отдельные группы эпицентров. При этом сохранилась линейная зона эпицентров, вытянутая вдоль оси глубоководного желоба и на восточном, океаническом склоне желоба.

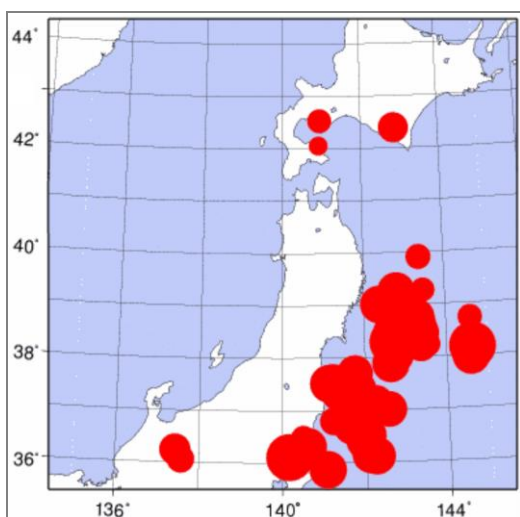


Рис. 4. Распределение эпицентров афтершоков землетрясения Тохоку по состоянию на 24 марта 2011 г.

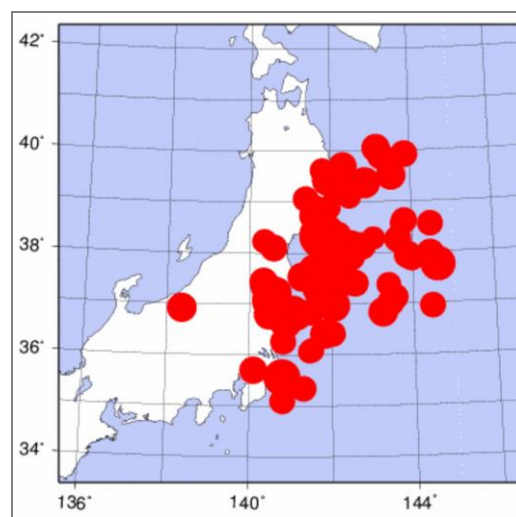


Рис. 5. Распределение эпицентров афтершоков землетрясения Тохоку по состоянию на 6–13 апреля 2011 г.

² На рис. 2–5 использованы данные Геофизической службы РАН [<http://www.ceme.gsras.ru>]

Развитие процесса в очаге во время возникновения главного толчка и афтершоковой последовательности можно проследить на основании анализа решений фокального механизма, опубликованных на сайтах Геологической службы США и Геофизической службы РАН (<http://www.USGS.gov>, <http://www.ceme.gsras.ru>), [17] (рис. 6). Очаг главного толчка был приурочен к верхней части сейсмофокальной зоны Заварицкого-Беньофа и располагался под глубоководной морской террасой на материковом склоне к юго-востоку от острова Хонсю (рис. 6 а) [18].

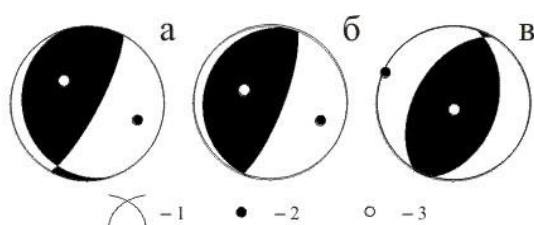


Рис. 6. Стереогаммы решений фокального механизма для главных толчков и землетрясений 9-го (б) и 11-го (а) марта 2011 г. на восточном побережье о. Хонсю; и сильного повторного толчка 7 апреля (в) 2011 г. [9, 14, 27]

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернена область волн сжатия.

Поле напряжений в земной коре на приостровном склоне Японской дуги в зоне сочленения Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит характеризуется пологим наклоном оси сжатия в сторону глубоководного желоба и круто наклоненным под дугу положением оси растяжения. В таком поле напряжений положение обеих нодальных плоскостей в типичных решениях фокального механизма заметных землетрясений характеризуется север–северо-восточным простиранием параллельно ориентировке глубоководного желоба и островной дуги. При этом одна из плоскостей круто погружается в сторону океана, и подвижка по ней представляет собой взброс приокеанического крыла относительно опускающегося приостровного. Вторая, альтернативная, плоскость полого падает под островную дугу, и смещение по ней представляет собой пологий надвиг приостровного склона на глубоководный желоб. Первая плоскость в случае, если она выступает в очаге в качестве действующей при сейсмическом событии, относительно зоны Беньоффа по классификации японских сейсмологов [19, 20] является внутриплитной, т.е. секущей относительно границы плит в зоне субдукции. Очаг, связанный со вторым типом нодальных плоскостей, квалифицируется в качестве межплитного и ориентирован в пространстве вдоль конкретных нарушений зоны Беньоффа.

Автору статьи пришлось исследовать ряд сильных землетрясений на Курило-Камчатской дуге. Среди них следует назвать такие известные события, как Шикотанское землетрясение 1994 г. с $M=8.3$ на Южных Курилах, Кроноцкое землетрясение 1997 г. с $M=7.9$ на Камчатке, Симуширские землетрясения 2006 и 2007 гг. [21–25]. При этом Шикотанское сейсмическое событие продемонстрировало внутриплитный характер очага, а Кроноцкое и Симуширское 2006 г. – межплитный [26].

В ряде случаев при определениях фокального механизма получаются решения, отличные от типичных: либо одна из нодальных плоскостей ориентирована не параллельно островной дуге, либо оси сжатия и растяжения занимают иное положение. В последнем случае нодальные плоскости могут соответствовать смещениям в очаге, совершенно нехарактерным для данной сеймотектонической обстановки.

Для главного толчка Тохоку, сильного форшока 9 марта и всех заметных афтершоков рассчитаны фокальные механизмы очага (рис. 6) [17]. Из этих материалов видно, что по большей части стереогаммы механизмов представляются достаточно типичными для этой зоны Японской островной дуги. Обе альтернативные нодальные плоскости в очаге ориентированы вдоль дуги. Таковы в основном стереогаммы толчков в северной части эпицентральной области, а также в центральной и южной ее частях.

Имеются, правда, и участки, где механизмы значительно отклоняются от «типичных». Обращает на себя внимание протяженная и ориентированная вдоль дуги линейная цепочка эпицентров толчков в районе глубоководного желоба, решения механизма у которых характеризуются вертикальным положением оси сжатия и близгоризонтальным осью растяжения. Подвижка в этом случае по обеим плоскостям выглядит как сброс под углом $40\text{--}60^\circ$. Именно такое решение имеет сильнейший афтершок, произошедший 11 марта 2011 г. в $06^{\text{h}}25^{\text{m}}50^{\text{s}}$, $M=7.7$, эпицентр которого был приурочен к восточной части этой цепочки, к океаническому склону

глубоководного желоба. Имеется несколько таких очагов афтершоков и на границе между центральной и южной частями облака повторных толчков примерно на широте 37°N и между $140\text{--}143^\circ\text{E}$ [17]. Однако такие аномалии говорят скорее о второстепенных неоднородностях очага землетрясения, чем о характере основной подвижки и строении очага в недрах земли.

Рассмотрим, каковы же были сейсмогенные подвижки в очагах сильнейшего форшока 9 марта, главного толчка и сильнейших афтершоков 11 марта 2011 г.

Форшок 9 марта имел вполне характерное решение фокального механизма. Обе нодальные плоскости ориентированы на север–северо-восток, вдоль островной дуги (рис. 6 б). Землетрясение возникло под действием сжимающих напряжений, ориентированных близгоризонтально в направлении северо-запад–юго-восток. Одна из плоскостей залегает в недрах круто, практически вертикально ($76^\circ\text{--}83^\circ$), другая – полого ($7^\circ\text{--}14^\circ$). Тип движения по крутопадающей плоскости – взброс с небольшим правым сдвигом, по пологой – надвиг с небольшой компонентой левостороннего сдвига. В качестве действующей плоскости следует выбрать ту, которая полого погружается в направлении острова в связи с малой глубиной гипоцентров последовавших за этим толчком афтершоков.

Основное землетрясение возникло под действием сжимающих напряжений, ось которых очень полого погружается к океану и ориентирована в направлении северо-запад–юго-восток (рис. 6 а). Нодальная плоскость север–северо-восточного простирания имеет крутое залегание ($78^\circ\text{--}84^\circ$), тип движения по ней – взброс с компонентой правостороннего сдвига. Вторая нодальная плоскость залегает полого и простирается с северо-запада на юго-восток, тип движения – надвиг с компонентами левостороннего сдвига (угол падения этой плоскости пологий – $17^\circ\text{--}19^\circ$). В очаге главного толчка из двух альтернативных плоскостей в качестве рабочей можно выбрать крутую, имеющую север–северо-восточное простирание и погружающуюся к восток–юго-востоку под углом около 80° . Такой выбор объясняется тем, что альтернативная плоскость ориентирована почти вкрест простирания дуги – по азимуту 162° ЮВ).

Таким образом, очаг форшока имеет характер межплитного события, а главного толчка – внутриплитного. Сильнейший афтершок 11 марта с $M=7.9$, эпицентр которого приурочен к южной части эпицентральной зоны, имеет все признаки межплитного очага. Его пологая нодальная плоскость погружается в запад-северо-западном направлении в соответствии с падением зоны Беньоффа.

Повторный толчок 11 марта с $M=7.7$, эпицентр которого приурочен к восточному склону желоба, характеризуется нетипичным механизмом очага, смещение в котором произошло под действием близвертикальных сжимающих напряжений и близгоризонтальных растягивающих. Подвижка при этом по обеим плоскостям может быть интерпретирована как почти чистый сброс. В то же время и сильный афтершок 7 апреля 2011 г. с магнитудой 7.2, возникший в средней части облака афтершоков вблизи восточного побережья Хонсю на глубине 53 км, характеризовался не вполне типичным решением фокального механизма (рис. 6 в). При вертикальном положении оси растяжения и практически горизонтальном размещении оси сжатия обе плоскости простираются в северо-восточном направлении и примерно под углом около 45° погружаются одна на северо-запад, а другая на юго-восток. Такое решение свидетельствует, по-видимому, о значительном изменении особенностей поля напряжений в ходе афтершокового процесса.

СейсмоTECTоническая позиция очага. В прежние годы геофизическими методами было подробно исследовано строение земной коры на материковом склоне Японской гряды [18, 4]. Таким образом, оказалось возможным составить более ясное представление о структуре среды, в которой возник очаг землетрясения Тохоку (рис. 7). На представленном профиле отчетливо видно падение пологого надвига от глубоководного желоба под континентальный склон. С другой стороны, на границе сравнительно пологой глубоководной морской террасы, четко выраженной в западной части профиля, и верхнего сегмента континентального склона наблюдается выступ на поверхности дна, возникший на взброшенном восточном крыле крутого разлома, проникающего в недра на всю глубину профиля и нарушающего поверхность пологого надвига в верхнем горизонте зоны Беньоффа. По-видимому, именно с этим разломом был связан очаг главного толчка землетрясения, а очаги форшока и сильнейшего межплитного афтершока 11 марта были приурочены к зоне зарегистрированного на профиле надвига.

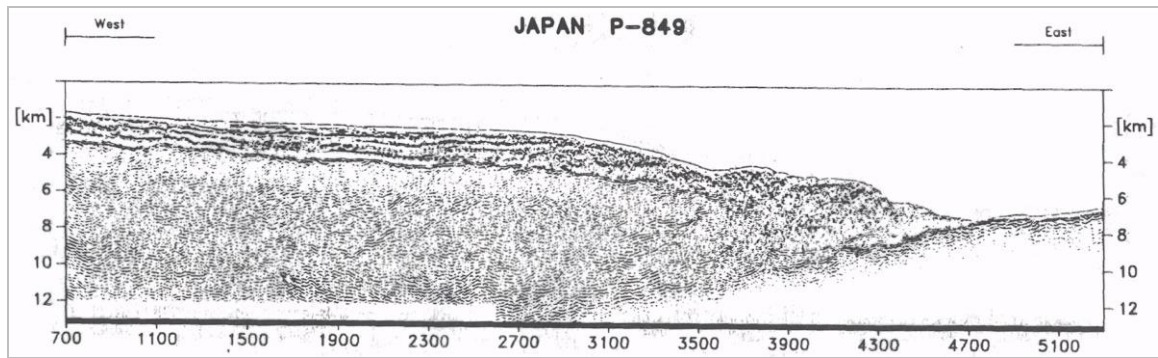


Рис. 7. Сейсмический профиль P-849 вкрест простирания океанической террасы, материкового склона и глубоководного желоба у о. Хонсю

Вертикальный масштаб увеличен в два раза по сравнению с горизонтальным [18], запад слева; черными толстыми линиями обозначены круто падающие разломы взбросового и сбросового типа.

О таком сложном строении очага говорит распределение по глубине гипоцентров повторных толчков в эпицентральной области землетрясения Тохоку (рис. 8). Здесь очевидно, что на западном, островном, склоне желоба, где располагается эпицентр главного толчка, зарегистрированы афтершоки с глубиной гипоцентров от 0 до 40 км. Западнее этой узкой полосы под глубоководной морской террасой отмечаются гипоцентры с глубиной 0–20 км, а еще западнее – 20–40 км, причем глубина постепенно нарастает в западном направлении согласно с погружением зоны Бенюффа под континентальную окраину. То есть в распределении гипоцентров афтершоков по глубине проглядывает реальность существования и межплитной, и внутриплитной действующих плоскостей одновременно. Интересно, что под восточным, океаническим, склоном желоба также зарегистрированы повторные толчки с глубиной гипоцентров от 10 до 30 км. По-видимому, эти землетрясения являются шлейфом сильнейшего афтершока с аномальным типом очага и приурочены к зоне сбросового смещения по одной из поверхностей близвертикальных разрывов, наблюдаемых в восточной части сейсмического профиля (рис. 7).

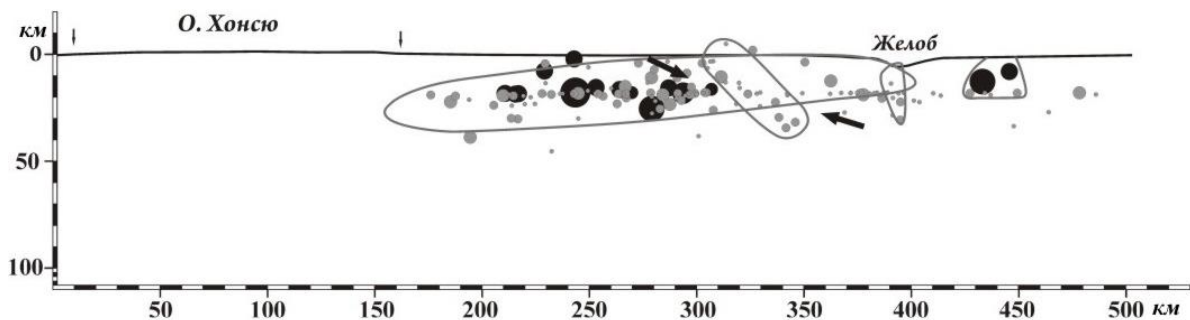


Рис. 8. Распределение повторных толчков землетрясения Тохоку по глубине гипоцентров [http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/ul/EVENT/201103_Tohoku_Danwa_saigai.pdf]

Черными контурами обозначены области субочагов внутриплитного (круто падающие) и межплитного (полого падающая на запад) типов; разными оттенками показаны гипоцентры толчков разной магнитуды: серые кружки – с $M < 6$, черные – с $M \geq 6.0$; толстые стрелки – положение осей напряжения сжатия, тонкие вертикальные стрелки – контуры о. Хонсю.

Исходя из этих заключений, очаг землетрясения Тохоку имел, по-видимому, сложное строение. По результатам сеймотектонического изучения очагов сильнейших континентальных землетрясений [28, 29] их очаги могут реализоваться сразу по нескольким плоскостям в недрах, образуя узлы их пересечений или обрамляя крупные блоки коры.

Важным представляется, что материалы изучения двух сильных землетрясений на юге Курильской дуги и на севере о. Хонсю, произошедших в 1994 г., продемонстрировали реальность существования как внутриплитных, так и межплитных очагов (рис. 9). Кроме того, при Шикотанском землетрясении главный толчок имел характер внутриплитного, а сильнейший афтершок, произошедший в тот же день, – межплитного.

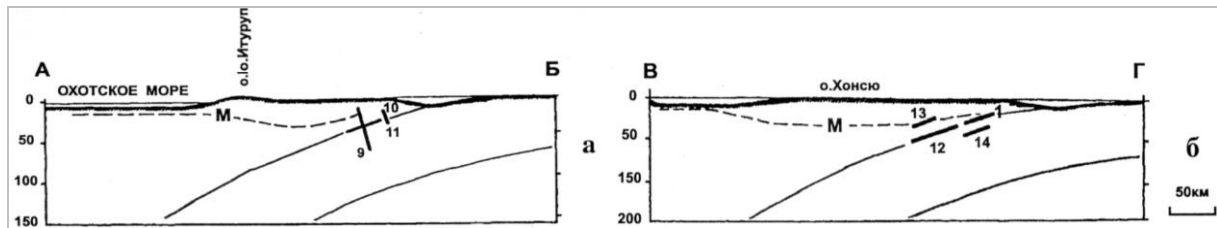


Рис. 9. Схематические глубинные разрезы островных дуг Дальнего Востока [10, 24]

а – разрез по линии АБ через Южные Курилы – очаговую зону Шикотанского землетрясения; б – разрез по линии ВГ через о. Хонсю – очаговую зону землетрясения 28.12.1994 г.
 Пунктир М – граница Мохо; жирная линия – поверхность земли; тонкие, погружающиеся к западу линии – границы зоны Бенъоффа; толстые отрезки с числами – действующие плоскости очагов сильных землетрясений 1994 г.: 9 – Шикотанского, 12 – и их афтершоков (обозначены номерами).

Деформации поверхности по данным геодезических измерений. В первый же день после главного толчка плотная сеть станций GPS, размещенная на всей территории Японии, зарегистрировала интенсивные горизонтальные и вертикальные деформации поверхности в северо-восточной части о. Хонсю (рис. 10, 11). Стрелки горизонтальных смещений направлены на восток–юго-восток сторону океана, но не полностью параллельны друг другу, а веерообразно расходятся в западном направлении – от очаговой зоны землетрясения Тохоку (рис. 10). Амплитуда горизонтальной подвижки поверхности земли на востоке острова, в центральной, наиболее узкой части «веера» достигает 3.5–4.0 м. При этом наиболее сильно затронутая смещениями часть острова имеет размер с юга на север около 450 км. В западном, южном и северном направлениях эти амплитуды существенно уменьшаются, а ориентировка направлений смещений на севере меняется на юго-восточную, а на юге зоны деформаций – на восточную и восток–северо-восточную. Учитывая амплитуду горизонтальных смещений на суше, можно предположить, что в районе инструментального эпицентра смещения материкового склона в сторону океана могли достигать 10–15 м.

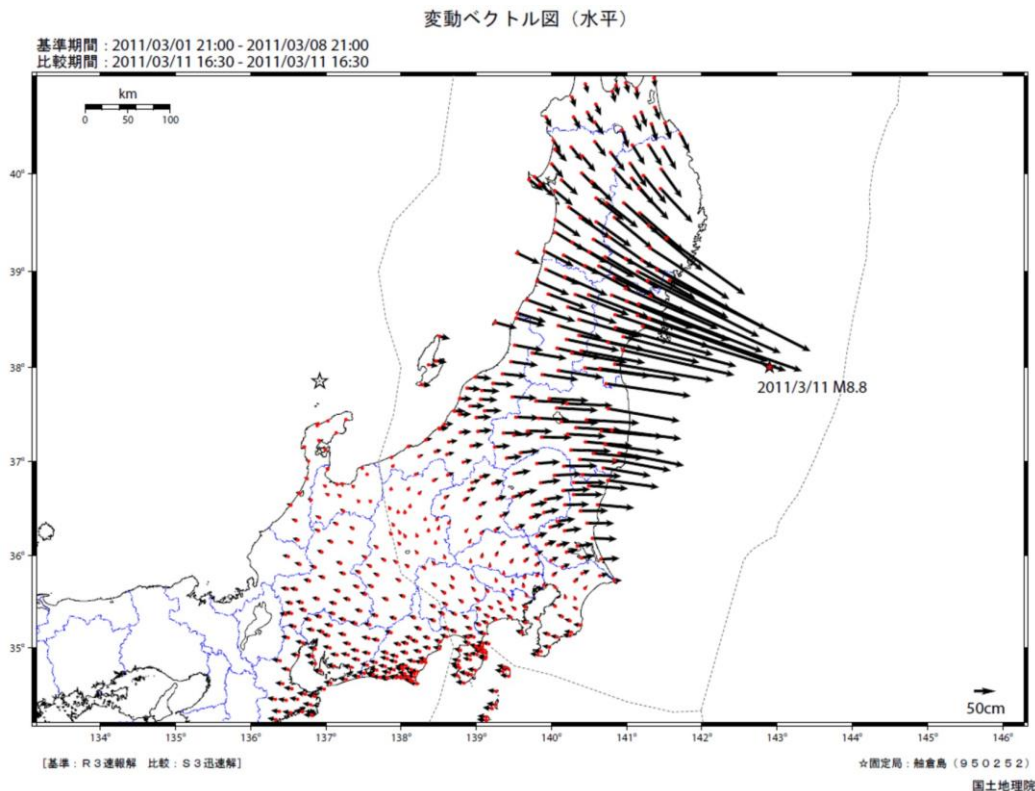


Рис. 10. Векторы и амплитуды горизонтальных смещений, зарегистрированных сетью станций GPS в первый день после главного толчка землетрясения Тохоку [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11mar_sanriku-oki/p05-e.htm]

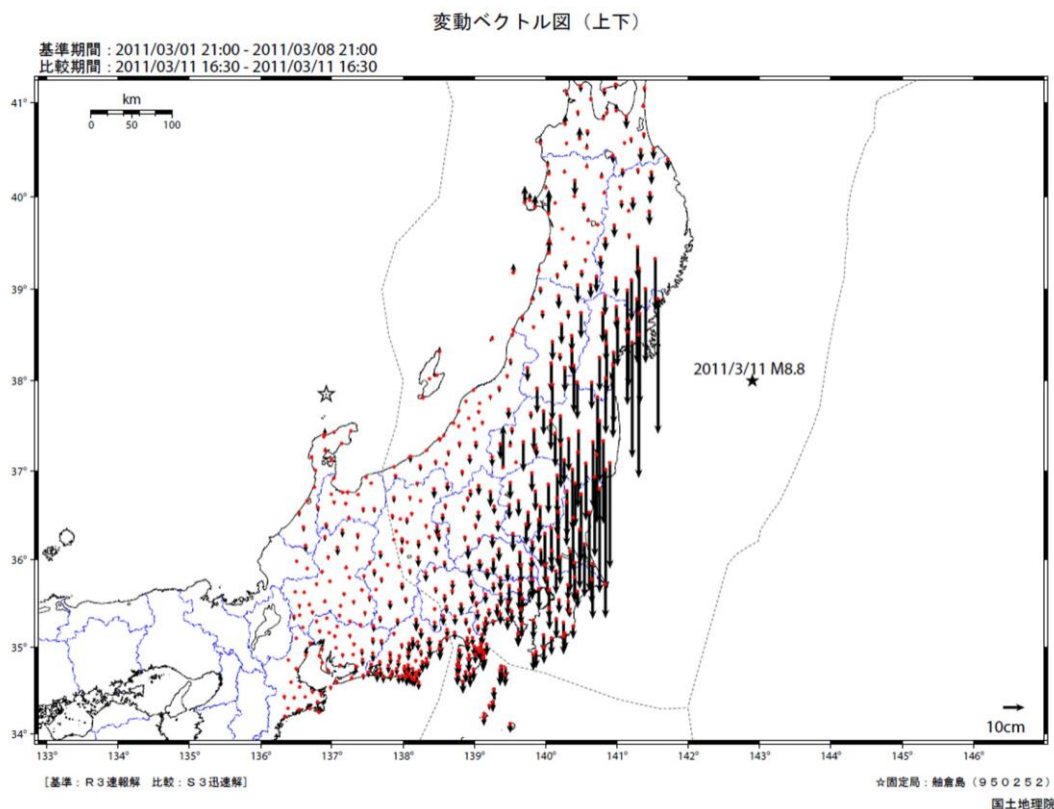


Рис. 11. Векторы и амплитуды вертикальных смещений, зарегистрированных сетью станций GPS в первый день после главного толчка землетрясения Тохоку [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11mar_sanriku-oki/p07-e.htm]

Зарегистрированные методом спутниковой геодезии вертикальные деформации поверхности на острове охватили практически всю его северную часть (рис. 11). В основном они выразились в опускании поверхности на разную величину. Максимальная амплитуда смещений отмечается на восточном побережье острова от широты 36° до 39° N. Здесь они составляют от 30 до 70 см. В северном, западном и южном направлениях амплитуда этих опусканий быстро сокращается. Очевидно, что вертикальные деформации охватили часть острова, наиболее близкую к сейсмическому очагу. Если попытаться, используя тенденцию нарастания величины деформации от западного берега о. Хонсю к восточному (от 5 см до 70 см на расстоянии 100 км), оценить амплитуду вертикального смещения дна в районе инструментального эпицентра, то можно обосновано предположить, что там она составит порядка 5–7 м.

Наличие в прибрежной части острова столь значительных горизонтальных и вертикальных смещений поверхности может свидетельствовать о выходе очага землетрясения в эпицентральной зоне на дне моря в виде сложной системы первичных сейсмодислокаций (сейсморазрывов) взбросо-надвигового типа с очень большими амплитудами сейсмогенных смещений. Наличие таких скрытых подводных тектонических нарушений может объяснить возникновение высокой волны цунами в момент землетрясения. Хочется отметить, что цунами возникает обычно в случае, когда очаг подводного землетрясения выходит на поверхность дна в виде крутого уступа [24]. В случае землетрясения Тохоку такой уступ мог возникнуть при наличии близвертикального сейсморазрыва, характерного для внутриплитных сейсмических очагов. Это неплохо согласуется с результатами интерпретации решения фокального механизма, приведенными выше (рис. 6 А).

Такие деформации поверхности были зарегистрированы при Шикотанском землетрясении 1994 г. на Южных Курилах. Тогда полевые геодезические исследования на о-ве Шикотан позволили установить его опускание в виде единого целого блока на 0.5–0.6 м, следовавшее после главного толчка [22]. Эта необратимая деформация поверхности свидетельствует об относительном опускании северо-западного крыла действующего разрыва в очаге Шикотанского толчка и относительном воздымании юго-восточного [19, 30], исходя из представлений о внутриплитном характере его очага. Материалы геодезических наблюдений, проведенных японскими исследова-

телями на о. Хоккайдо после этого события, свидетельствуют о значимом северо-восточном горизонтальном смещении восточной части острова и небольшом опускании здесь поверхности земли [30]. Вероятнее всего, вертикальные поверхностные деформации были связаны с подвижкой в очаге главного толчка, имевшего внутриплитный характер, а горизонтальные – со смещениями в результате сильнейшего афтершока, имевшего межплитный характер (рис. 9).

То есть ситуация в очаговой области этих двух сильнейших сейсмических событий Дальнего Востока была сходной и возможно типичной для всей переходной зоны. Об этом, в частности, говорят результаты измерений методом GPS, проведенных перед, во время и после двух сильнейших (с магнитудой более 8) Симуширских землетрясений 2006 и 2007 г. на Средних Курилах [21, 31]. Тогда были установлены интенсивные горизонтальные смещения в пределах всей Курильской дуги, особенно сильные в эпицентральных зонах обоих событий. При этом перед землетрясениями на Средних Курилах отмечалось полное отсутствие горизонтальных смещений, после первого сейсмического толчка острова Средних Курил испытали смещение в сторону океана с амплитудой от 10 до 40 см, а после второго – в сторону Охотского моря около 10 см.

Во время проведения геодезических измерений на о. Хонсю до землетрясения Тохоку японские специалисты также отмечали весьма низкие скорости горизонтальных движений на его восточном побережье [<http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/189/image189/002.pdf>], т.е. как раз в той зоне, которая после землетрясения испытала наиболее сильные горизонтальные деформации (рис. 10). В обоих случаях такие аномалии в распределении скоростей горизонтальных смещений поверхности вблизи очаговой зоны можно связать с длительным существованием «сейсмической брешы», то есть области сейсмического затишья, которая фиксировалась в ходе сейсмологических наблюдений в течение многих десятилетий [32].

Обсуждение результатов. Собранные разными исследователями сейсмологические, геодезические и геолого-геофизические материалы о сильнейшем сейсмическом событии Японского архипелага и о строении области его возникновения позволяют, с одной стороны, лучше понять процессы в очаге землетрясения, а с другой – интерпретировать эти процессы для воссоздания картины современной геодинамики данного участка Японской островной дуги как области сочленения Евразийского континента и Тихоокеанской океанической плиты. Землетрясение Тохоку возникло в подводных условиях, где приемы континентальной сейсмогеологии неприменимы для изучения поверхностных деформаций. Нет также достаточных данных о разрушении зданий для оценки воздействия сейсмических волн на дневную поверхность. В связи с этим на первое место выступают сейсмологические подходы к исследованию структуры и кинематики сейсмического очага. Важны геолого-геофизические сведения о структурном устройстве очаговой области, а также материалы геодезических измерений методами GPS.

Согласно результатам интерпретации всех разнообразных данных, очаг этого аномально сильного даже для Японии землетрясения имел сложную структуру. По-видимому, в его устройстве можно выделить межплитную составляющую, связанную с очень большой по амплитуде надвиговой подвижкой «субдукционного» типа по пологому разрыву в верхней части зоны Бенъофа, проявившуюся в решениях фокального механизма сильнейших форшока 9 марта и афтершока 11 марта 2011 г. в северной и южной частях эпицентральной области соответственно, а также внутриплитную – по крутому взбросу, выразившуюся во взбросовом смещении по близвертикальному тектоническому нарушению (рис. 8). Оба типа тектонических разломов выявлены в ходе сейсмического профилирования континентального склона о. Хонсю [18]. Есть такие разломы и на континентальном склоне Курильских островов [33].

Подвижки по пологой поверхности очага межплитного типа обусловили большие горизонтальные перемещения, зарегистрированные геодезическими методами на поверхности о. Хонсю. Сейсмогенное смещение по крутой поверхности внутриплитного типа определило значительное погружение восточной части острова и подводной морской террасы, а также возникновение волны цунами в связи с образованием крутого уступа на морском дне в эпицентральной зоне.

В целом при землетрясении Тохоку огромный блок литосферы длиной около 600 км, шириной порядка 100 км испытал относительное поднятие на континентальном склоне о. Хонсю. При этом, по-видимому, изменился рельеф морского дна. Континентальный склон приподнялся и надвинулся на глубоководный желоб. На восточном, океаническом, его склоне создалась обстановка растяжения, в связи с чем возникли сильный афтершок со сбросовым типом смещения в очаге и его многочисленные повторные толчки.

Закключение. Оперативно собранные разными агентствами, помещенные на разных сайтах Интернета, полученные из предварительных публикаций и обобщенные разнообразные данные о проявлениях великого землетрясения Тохоку в Японии позволили нарисовать картину сложного устройства его очага в недрах литосферы. Можно полагать, что смещения по разрывам в процессе вспарывания очагов главного толчка, форшоков и афтершоков вызвали значительные, необратимые изменения рельефа континентального склона и о. Хонсю. Одна из ветвей очага, связанная с подвижкой внутриплитного типа, вышла на поверхность дна в виде новообразованного тектонического уступа высотой в несколько метров, что обусловило возникновение волны цунами.

Сильное землетрясение с $M=7.7$, произошедшее на континентальном склоне о. Хонсю 9 марта 2011 г. и шлейф его афтершоков по сути дела явились форшоками более сильного землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. с $M=9.0$.

Интенсивность сейсмических сотрясений и уровень пиковых ускорений грунта, зарегистрированные на территории острова, не столь значительны, как это можно было бы ожидать при землетрясении такой силы. Это, по-видимому, связано с удаленностью очаговой зоны от острова почти на 100 км.

Зарегистрированные методом спутниковой геодезии горизонтальные и вертикальные необратимые смещения поверхности о. Хонсю позволяют предположить, что при землетрясении Тохоку огромный блок литосферы длиной около 600 км, шириной порядка 100 км испытал относительное поднятие на континентальном склоне о. Хонсю. При этом, по-видимому, изменился рельеф морского дна (рис. 12). Такие смещения не удастся адекватно объяснить с точки зрения классической теории тектоники плит. По-видимому, сложное строение сейсмического очага этого великого землетрясения и сопровождающий его процесс деформации литосферы более реально объясняется с позиций нелинейной геодинамики [34].

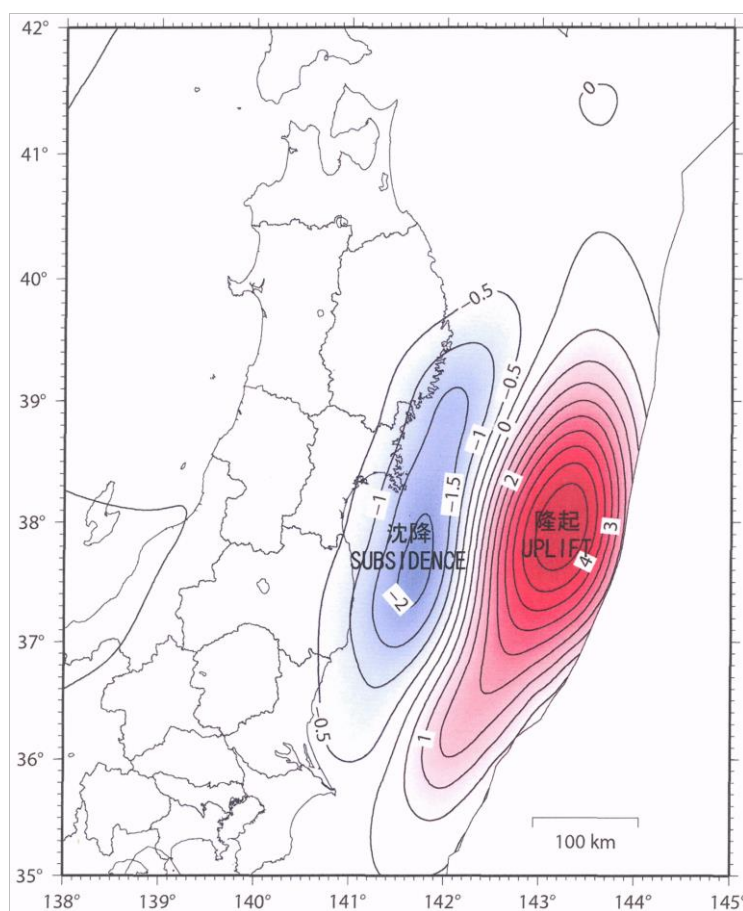


Рис. 12. Модель деформирования поверхности земли в очаговой зоне землетрясения Тохоку (показаны области относительного сейсмогенного поднятия (UPLIFT) и опускания (SUBSIDENCE) поверхности в очаговой области)

[http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/2011_Earthquake_SourceProcess.pdf]

В долгосрочном аспекте можно полагать, что при сейсмическом событии Тохoku проявилась тенденция современного геодинамического развития Японской и Курильской островных дуг, заключающаяся в вертикальном поднятии и горизонтальном надвигании континентального склона на глубоководный желоб, а также в поступательном необратимом опускании морской террасы и восточной части островов.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 11-05-00205-а) и Программы 4 Президиума РАН.

Л и т е р а т у р а

1. **Шебалин П.Н.** Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // Докл. РАН. – 2004. – **398**. – № 2. – С. 249–254.
2. **The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake** Location of the Main Shock and Aftershocks. – URL: http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11mar_sanriku-oki/p01-e.htm.
3. **2011 Tohoku earthquake.** Earthquake Research Institute, University of Tokyo. – URL: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/eng/>.
4. **Zhao D., Hasegawa A., Kanamori H.** Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events // Journal of Geophysical Research. – 1994. – **99**. – N B11. – P. 22313–22329.
5. **Shebalin P., Narteau C., Holschneider M., Schorlemmer D.** Short-term earthquake forecasting using early aftershock statistics // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2011. – 101. – iss 1. – P. 297–312.
6. **The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake** Source process analysis with local strong motion data. – URL: http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/2011_Earthquake_SourceProcess.pdf.
7. **Гохберг М.Б., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л., Вейс В.А., Грехова Е.А.** Ионосферный отклик на подводное землетрясение в Японии 11.03.2011 г. по наблюдениям со спутников GPS // Геофизические процессы и биосфера. – 2011. – 10. – № 1. – С. 47–63.
8. **Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н.** Проявления цунами Тохoku 11 марта 2011 г. на Тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2011. – **38**. – № 1. – С. 41–64.
9. **Геофизическая служба РАН.** Информационное сообщение о разрушительном землетрясении у восточного побережья острова Хонсю, Япония, 11 марта 2011 года. – URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl?mode=1&id=168.
10. **Захарова А.И., Рогожин Е.А.** Предвестники сильных землетрясений в регионе Курильских островов после 2004 г. // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сборник трудов 7-х геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный мир, 2006. – С. 268–275.
11. **Любушин А.А.** Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // Геофизические процессы и биосфера. – 2011а. – **10**. – № 1. – С. 9–35.
12. **Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.** Loading rates in California inferred from aftershocks // Nonlinear processes in geophysics. – 2008. – **15**. – iss 2. – P. 245–263.
13. **Narteau C., Byrdina S., Shebalin P., Holschneider M.** Common dependence on stress for the two fundamental laws of statistical seismology // Nature. – 2009. – 462. – P. 642–646. doi:10.1038.
14. **Геофизическая служба РАН.** Информационное сообщение о сильном землетрясении у восточного побережья острова Хонсю, Япония, 9 марта 2011 года. – URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl?mode=1&id=167.
15. **Hisada T., Nakagawa K.** Present Japanese Development in Engineering Seismology and their Application to Buildings. – Japan: 1958.
16. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага).** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
17. **Nettles M., Extrem G., Koss H.C.** Centroid-moment-tensor analysis of the 2011 Tohoku earthquake and its larger foreshocks and aftershocks // Earth Planets Space. – 2011. – **99**. – P. 1–8. (http://www.ldeo.columbia.edu/~gcmt/projects/CMT/catalog/TOHOKU/Nettles_etal_2011.pdf).
18. **Huene von R., Klaeschen D., Cropp B. and Miller J.** Tectonic structure across the accretionary and erosional parts of the Japan Trench margin // Journal of Geophysical Research. – 1994. – **99**. – No. B11. – P. 22349–22361.

19. **Kikuchi M., Kanamori H.** The Shikotan earthquake of October 4, 1994: lithospheric earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 1995. – **22**. – N 9. – P. 1025–1028.
20. **Seno T.** Intraplate seismicity in Tohoku and Hokkaido and large interplate earthquakes: a possibility of a large interplate earthquake off the Southern Sauriku coast, Northern Japan // *Journal of Physics of the Earth.* – 1979. – **27**. – N 1. – P. 21–51.
21. **Захарова А.И., Рогожин Е.А.** Сильные Курильские землетрясения 2006–2007 гг. // *Геофизика XXI столетия: 2007 год. Сборник трудов Девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского (1–3 марта 2007 г., Москва).* – Тверь: ГЕРС, 2008. – С. 76–81.
22. **Рогожин Е.А.** Шикотанское землетрясение 1994 г.: тектоническая позиция, геодинамические условия // *Геотектоника.* – 1996. – № 1. – С. 33–46.
23. **Рогожин Е.А.** Сеймотектоника зон сильнейших землетрясений России 2003–2006 гг. // *НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОТЧЕТ Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Международного геодезического и геофизического Союза за 2003–2006.* М.: Национальный геофизический комитет РАН. К XXIV Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза. – 2007. – С. 29–38.
24. **Рогожин Е.А., Захарова А.И.** Сеймотектоника очаговых зон цунамигенных землетрясений // *Геофизические исследования.* – М.: ИФЗ РАН. 2006. – Вып. 6. – С. 3–12.
25. **Рогожин Е.А., Захарова А.И.** Геодинамическая позиция очага Кроноцкого землетрясения 1997 г. на Восточной Камчатке // *Физика Земли.* – 2000. – № 5. – С. 22–27.
26. **Злобин Т.К., Полец А.Ю.** Очаговые зоны Симуширских катастрофических землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M=8.3$) и 13 января 2007 г. ($M=8.1$) и глубинное строение земной коры Средних Курил // *Тихоокеанская геология.* – 2009. – **28**. – № 5. – С. 54–63.
27. **Геофизическая служба РАН.** Информационное сообщение о сильном землетрясении у восточного побережья острова Хонсю, Япония, 7 апреля 2011 года. – URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl?mode=1&id=170.
28. **Гоби-Алтайское землетрясение** / Ред. Н.А. Флоренсов, В.П. Солоненко. – М.: АН СССР, 1963. – 392 с.
29. **Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии.** – М.: Наука, 1985. – 224 с.
30. **Katsumata K., Ichiyanagi M., Miwa M., and Kasahara M.** Aftershock Distribution of the October 4, 1994 $M_w=8.3$ Kurile Islands Earthquake Determined by a Local Seismic Network in Hokkaido, Japan // *Geophys. Res. Lett.* – 1995. – **22**. – No 11. – P. 1321–1324.
31. **Стеблов Г.М., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Грекова Т.А.** Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS // *Физика Земли*, 2010, № 5, с. 77–82.
32. **Федотов С.А.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. – М.: Наука, 2005. – 302 с.
33. **Строение дна Охотского моря** / Отв. редакторы В.В. Белоусов, Г.Б. Удинцев – М.: Наука, 1981. – 176 с.
34. **Пуцаровский Ю.М.** О «субдуктологии» в свете нелинейной геодинамики // *Тихо-океанская геология.* – 1994. – № 4. – С. 3–13.