

УДК 550.834:550.348(265.5)

## ВЕЛИКОЕ ЯПОНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 11 МАРТА 2011 г.: ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

© 2011 г. И.Н. Тихонов, В.Л. Ломтев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

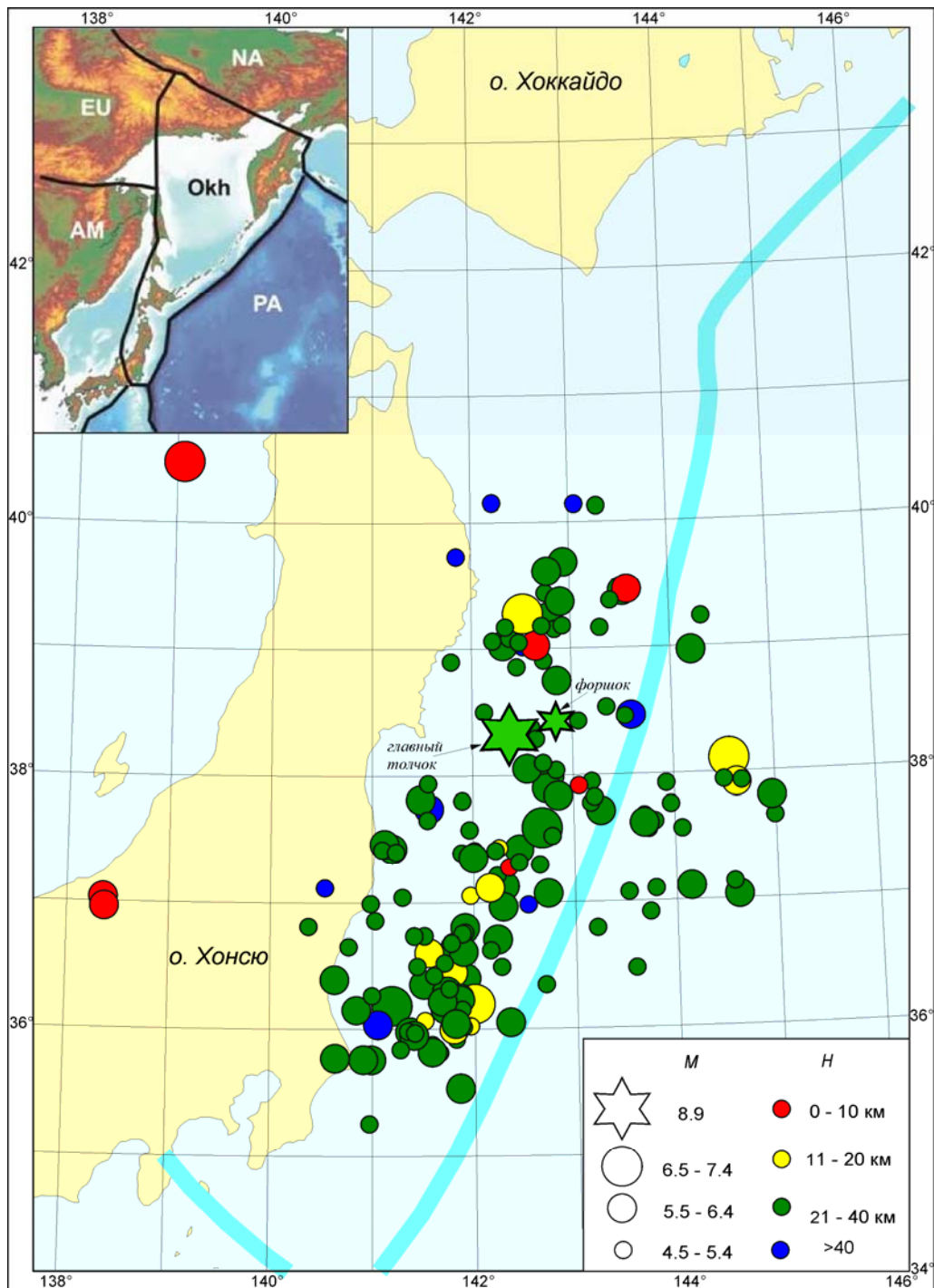
Обсуждаются тектонические и сейсмологические аспекты Великого Японского землетрясения 11.03.2011 г. ( $M_w = 9.0$ ) на тихоокеанской окраине северо-восточной части о-ва Хонсю. Представлены сведения по строению и сеймотектонике данного района, а также сейсмичности и периодам повторяемости сильнейших ( $M \geq 7.6$ ) землетрясений за исторический и современный период. Показано, что период повторяемости сильнейших событий составляет около 40 лет, а мегаземлетрясений – 1000 и более лет. В изучаемом районе установлено существование сейсмической брешки протяженностью ~800 км, расположенной южнее  $39^\circ$  с.ш. и заполненной афтершоками мегаземлетрясения 11.03.2011 г. Данное событие, вероятно, связано с глубинным надвигом по зоне Беньофа и его структурным козырьком – шарьяжем Ойасио в средней части тихоокеанского склона.

Сопоставлены афтершоковые последовательности данного и Суматра-Андаманского (2004 г.) мегаземлетрясений. Оказалось, что за 25 сут ряд их важнейших характеристик (число повторных толчков, магнитуда сильнейшего толчка и время его появления) в обоих случаях сопоставимы при существенном различии в энергетике афтершоковых процессов. Обсуждается вероятный сценарий возникновения повторного толчка с  $M \sim 8.0$  в районе Японского желоба.

*Ключевые слова:* активная окраина, желоб, фокальная зона, глубинный надвиг, шарьяж, землетрясение, мегаземлетрясение, афтершоковая последовательность, сильнейший афтершок, сценарий развития афтершоков.

### Введение

11.03.2011 г. в 05 ч 46 мин по Гринвичу (местное время – 14 ч 46 мин) восточнее о-ва Хонсю (Япония) произошло землетрясение с  $M_w=9.0$  (рис. 1). Такие сейсмические явления относятся к классу мегасобытий, т.е. землетрясений планетарного масштаба. По сложившейся традиции каждому катастрофическому событию присваивается собственное имя. В данном случае окончательное название, по-видимому, пока еще не устоялось.



**Рис. 1.** Положение эпицентра главного толчка землетрясения 11.03.2011 г. (большая звезда), его форшока (маленькая звездочка) и афтершоков (кружки), зарегистрированных в течение первых суток по данным оперативного каталога NEIC/USGS. Узкая полоса – ось глубоководного желоба. На врезке – региональная схема плитовых границ в модели [Wei, Seno, 1998]. Плиты: NA – Североамериканская, EU – Евразийская, AM – Амурская, PA – Тихоокеанская, Okh – Охотская

По данным из разных источников этому событию присваивались следующие названия: Северо-восточное Тайхейю землетрясение (Northeastern Taiheiyou Earthquake), по другим – Тохоку-Чино Тайхейю-оки (Tohoku-Chino Taiheiyou-oki Earthquake), по третьим – Великое Японское землетрясение (Great Japan Earthquake).

Отметим интересную закономерность. Подобные сейсмические катастрофы имеют свойство группироваться во времени (конечно, по сейсмологическим меркам). Последняя такая группа наблюдалась в 60-е и 70-е годы прошлого века. В нее вошли землетрясения: Камчатское 4.11.1952 г. ( $M_w = 9.0$ ), Чилийское 22 мая 1960 г. ( $M_w = 9.6$ ) и Аляскинское 28.03.1964 г. ( $M_w = 9.2$ ).

Спустя 40 лет начала формироваться новая группа землетрясений: Суматра-Андаманское 26.12.2004 г. ( $M_w = 9.3$ ), Чилийское 27.02.2010 г. ( $M_w = 8.8$ ). К этой же группе принадлежит и Великое Японское землетрясение 11.03.2011 г. ( $M_w = 9.03$ ).

Оно сопровождалось катастрофическим по своим последствиям цунами. Волны высотой до 10–15 м (в отдельных пунктах до 20 м) прокатились по всему северо-восточному побережью о-ва Хонсю, проникая местами в глубь острова на несколько километров и разрушая все на своем пути. Перехлестнув дамбу высотой 6 м в районе АЭС «Фукусима-1», цунами вывело из строя систему электроснабжения на частично разрушенной землетрясением АЭС и спровоцировало небывалую по своим последствиям техногенную катастрофу.

Японские острова располагаются в пределах Тихоокеанского сейсмического пояса и характеризуются одним из самых высоких уровней сейсмичности на Земле. Тем не менее подобного землетрясения в Японии не наблюдалось за всю историю XX в., а может быть и за историческое время. По роковому стечению обстоятельств упомянутые природные и техногенные катастрофы произошли на одном из самых густонаселенных побережий Тихого океана. Это обусловило масштабы человеческих жертв (13.1 тыс.) и пропавших без вести (17.1 тыс.), разрушений и материальных потерь (по официальным данным правительства Японии, более 300 млрд долл. США). Случившееся стало трагедией общенационального масштаба.

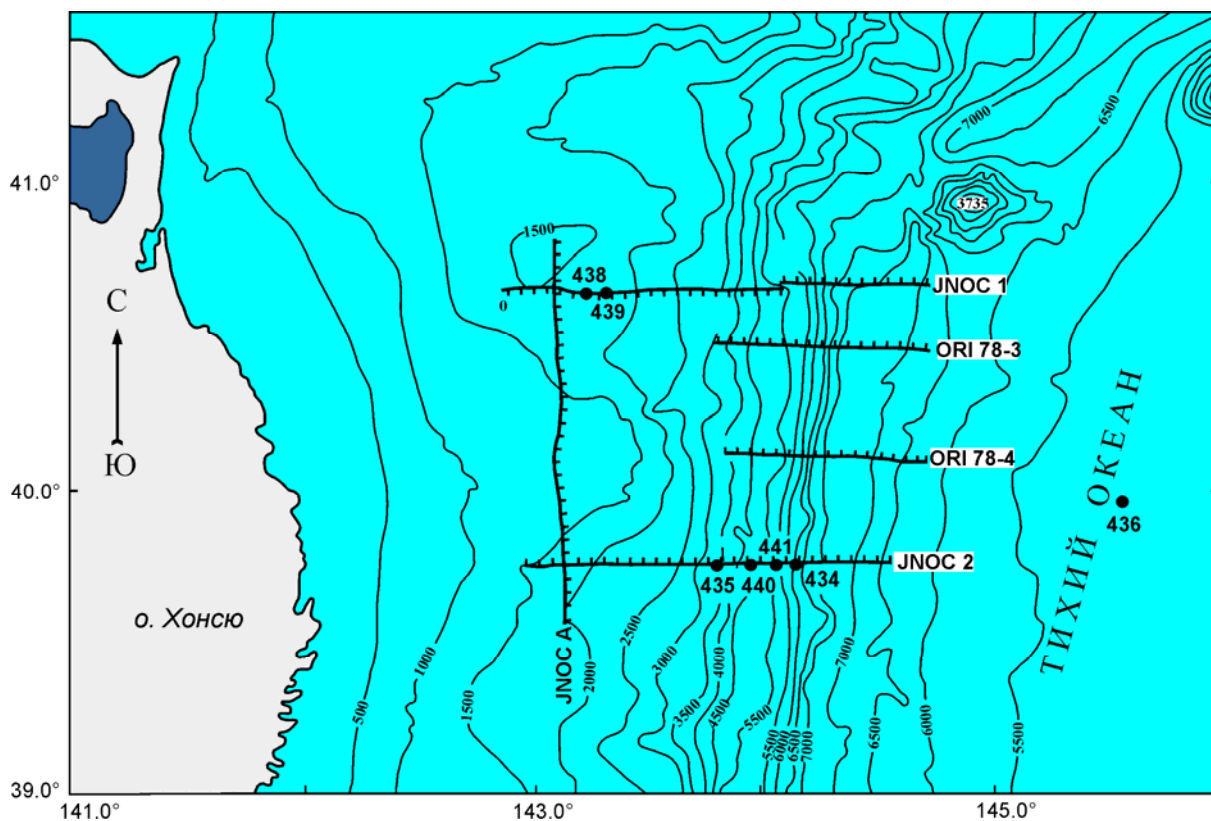
Необходимо также заметить, что эти события произошли в хорошо изученном регионе с плотной сетью сейсмических станций, современной системой оповещения о цунами, квалифицированными кадрами специалистов и, пожалуй, самым подготовленным по отношению к стихийным бедствиям населением Японии [Уэда, 1978; Методы..., 1984; Моги, 1988].

Описание всякого разрушительного землетрясения и его последствий представляет собой комплексную многоплановую задачу. Как правило, оно включает очерк по сейсмотектонике района, где произошло событие; позиционирование данного события в ряду подобных землетрясений этого района, бывших ранее; описание сейсмичности, предвещавшей событие; выявление постфактум различных предвестниковых эффектов; оценку параметров главного удара и развития афтершокового процесса, картирование макросейсмических проявлений и т.д.

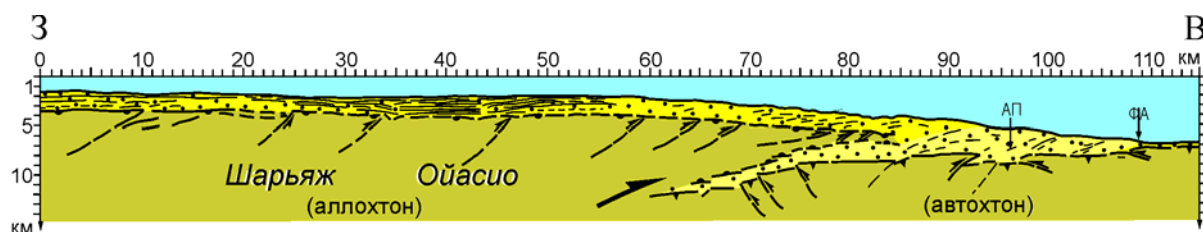
Вне всякого сомнения, Великому землетрясению в Японии 2011 г. будет посвящено множество отчетов, статей, монографий и других публикаций. С учетом этого, данное сообщение преследует цель – дать сведения по строению и сейсмотектонике тихоокеанской окраины северо-восточной части о-ва Хонсю, т.е. обозначить причинно-следственные связи тектонических и сейсмических процессов. Затем, используя сведения об исторических и современных землетрясениях, составить представление о повторяемости сильнейших ( $M \geq 7.6$ ) сейсмических событий в данном районе. И наконец, на основе оперативных сейсмологических данных за первые 25 сут после возникновения мегасобытия оценить масштаб явления, характер развития афтершокового процесса, наметить возможные сценарии его развития.

### Тектоническое строение изучаемого района

Батиметрия и тектоническое строение тихоокеанской окраины дуги Хонсю (Тохоку) и Японского желоба протяженностью 900 и шириной 100 км изучаются более 100 лет [Уэда, 1978]. Современные представления начали складываться в 70-80-е годы прошлого столетия после отработки бурового геотраверза судна «Гломара Челленджера» (рис. 2, 3), многоканального сейсмопрофилирования МОВ–ОГТ (метод отраженных волн – общая глубинная точка) [Шику, Мисава, 1980; Initial..., 1980; Matsuzawa et al., 1980]. Важным дополнением стала геолого-геофизическая съемка подводных окраин Японского архипелага, выполненная Геологической службой Японии под руководством проф. Е. Хонза



**Рис. 2.** Батиметрическая карта исследуемого района с положением профилей МОВ–ОГТ Японской национальной нефтяной компании (JNOC) и скважин 56-го рейса судна «Гломара Челленджера» [Initial..., 1980]



**Рис. 3.** Интерпретированный глубинный разрез JNOC 2 [Ломтев, Патрикеев, 1983а]. АП – аккреционная призма; ФА – фронт аккреции. Цветом выделены водная толща Пацифики, кайнозойский осадочный чехол, аккреционная призма и акустический фундамент аллохтона и автохтона. Пунктиры со стрелками – отражающие площадки, маркирующие разломы сжатия и предполагаемые смещения по ним. Толстой стрелкой обозначено направление движения среднечетвертичного шарьяжа Ойасио (аллохтон) и дуги Хонсю на прилегающее ложе Тихого океана

[Geological..., 1978 и др.]. Представленные ниже материалы и взгляды на строение и сейсмотектонику региона основаны на результатах геологической интерпретации данных МОВ и бурения в этом регионе [Ломтев, 1989, 2010; Ломтев, Патрикеев, 1983а,б, 1985; Ломтев и др., 1997, 2004, 2007].

В рельефе тихоокеанской окраины северо-восточной части дуги Хонсю (далее СВ Хонсю) выделяют узкий шельф и широкий континентальный склон. Он включает в себя пологий верхний уступ, средний склон с широкой верхней и узкой нижней глубоко-водными террасами на глубинах 1-2 и 5 км соответственно и нижний уступ, или внутренний склон, Японского желоба, опирающийся на его аккумулятивное дно, сложенное турбидитами Сангарского каньона (см. рис. 2, 3).

На глубинном разрезе JNOC 2 в структуре среднего склона отчетливо выделяется клиновидный выступ акустического фундамента Ойасио видимой мощностью до 8 км, драпированный кайнозойским чехлом. Его слагают осадочные отложения позднего мела, вскрытые скв. 439, и, вероятно, более древние комплексы [Choi, 1987]. С учетом данных скв. 436 на краевом валу, вскрывшей породы позднего мела (опаковый горизонт слоя 2 [Initial..., 1980; Патрикеев, 2009]), приходим к выводу, что акустический фундамент среднего склона между верхней и нижней террасами сдвоен (рис. 3).

В тектонике такие пологонаклонные аллохтонные клинья называют шарьяжами или тектоническими покровами [Ломтев, Патрикеев, 1985]. Прерывистые наклонные отражающие площадки внутри акустического фундамента маркируют чешуйчатые надвиги, связанные с трением в подошве при движении шарьяжа к востоку вверх по кровле слоя 2 (автохтон). Внутренний склон Японского глубоководного желоба шириной 25 км, по данным бурения и МОВ–ОГТ, сложен дислоцированными кайнозойскими породами аккреционной призмы мощностью до 4 км, нередко сдвоенными по надвигам западного падения (скв. 434 и 441 [Initial..., 1980; Ломтев, Патрикеев, 1983а, 1985]).

Молодые надвиги и взбросы автохтона имеют восточное падение и связаны со сползанием слоев 1–4, фиксируя его тектоническую подвижность. Поскольку на западном борту разломы сжатия падают в противоположном направлении, то желоб следует считать структурой сжатия типа рампового грабена (точнее, полуграбена) с учетом его широтной асимметрии.

Утонение аккреционной призмы к западу от 4 км до 100–150 м и менее с учетом данных бурения вызвано сдиранием и скучиванием кайнозойского чехла при движении шарьяжа, поэтому в работе [Ломтев, Патрикеев, 1985] они объединены в покровную тектонопару «региональный шарьяж – аккреционная призма». С учетом положения теплового минимума, покровного баланса осадков, места пересечения встречных фокальных зон положение корня шарьяжа Ойасио определено на удалении 90 км к западу от его фронта, т.е. под верхней террасой (см. рис. 4). Если наклон автохтона к западу выдержан, то глубина корня составит 10–20 км. Столь значительное погружение автохтона вызвано растущей литостатической нагрузкой аллохтона (тектонопара).

Одна из сложных проблем – датирование структур тихоокеанской окраины СВ Хонсю и Японского желоба. Так, его возраст, или время заложения, определяют от голоцена до мела–юры (см. обзор [Ломтев, 1989]). Вместе с тем открытие реликтовых неогенраннечетвертичных фанов (конусы выноса) каньонов и их долин на ложе северо-западной части Тихого океана (СЗ Пацифика [Ломтев, 2010]), формирующихся придонными турбидитными потоками [Ломтев и др., 1997, 2004; Патрикеев, 2009; Matherickx, 1980], надежно фиксирует среднечетвертичное (~0.5–1 млн лет) время заложения Японского и других тихоокеанских желобов, определенное по комплексу независимых признаков [Ломтев, 1989]. Заметим, что Сангарский каньон, берущий начало в

одноименном проливе между о-вами Хонсю и Хоккайдо, имеет за желобом долину Накве и крупный конус выноса к югу от уступа разлома Тускарора [Ломтев и др., 1997, 2004]. Снос терригенных осадков с островных дуг и восточной окраины Азии датируют, по данным бурения, средним миоценом, в грабенах, возможно, и ранним миоценом [Ломтев и др., 1997, 2004]. Таким образом, с учетом данных [Геологическое..., 1968] приходим к выводу, что история дуги Хонсю восходит к началу миоцена. В среднем плейстоцене в эпоху пасаденской орогении она была надвинута на ложе СЗ Пацифики примерно на 90 км с образованием среднего (выступ Ойасио) и нижнего (аккреционная призма) склонов и Японского желоба. Отсутствие рифтограбена (или раздвига) сопоставимой ширины на дуге Хонсю высотой более 8–9 км и в смежной впадине Японского моря [Geological..., 1978], который бы компенсировал тектоническое сдвигание коры по шарьяжу Ойасио, указывает на ее аллохтонное залегание, а следовательно, тектоническую подвижность.

### Сильнейшие землетрясения прошлого в эпицентральной области мегасобытия

Согласно [Usami, 1979], историческими землетрясениями в Японии считаются сейсмические события, произошедшие до 1892 г. В следующем, 1893 г., в Японии был введен григорианский календарь, сменивший японский лунный календарь, а для регистрации землетрясений впервые стали применяться сейсмографы. Основным первоисточником сведений о более чем 6000 исторических землетрясениях Японии являются труды К. Муся [Musya, 1942–1943, 1949]. Для европейцев доступнее работа [Usami, 1979] на английском языке с каталогом исторических ( $M \geq 5.9$ ) и инструментально зарегистрированных землетрясений за период 599–1975 гг.

Большое число сильных землетрясений, известных на территории и вокруг Японских островов, вынуждает нас ограничиться небольшой областью размером  $5 \times 4^\circ$ , содержащей эпицентральною область изучаемого землетрясения (см. рис. 1) с координатами:  $\varphi = 35.0^\circ - 40.0^\circ$  с.ш. и  $\lambda = 141.0^\circ - 145.0^\circ$  в.д. Согласно каталогу [Usami, 1979] и данным Метеорологического агентства Японии [JMA..., 2011], только на этом участке сейсмоактивной зоны с 869 г. по март 2011 г. было зафиксировано 11 событий с  $M \geq 7.6$  (табл. 1).

**Таблица 1.** Перечень землетрясений с  $M \geq 7.6$  в пределах участка Японской сейсмоактивной зоны за 869–2010 гг. по данным [Usami, 1979]

№ п/п	Дата	Время в очаге*, ч–мин	Координаты эпицентра		Глубина, км	M
			$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.		
1	13.07.0869 г.	Ночью	38.5	143.8	–	8.6
2	02.12.1611 г.	После 0 ч	39.0	144.5	–	8.1
3	09.06.1646 г.	–	37.7	141.7	–	7.6
4	13.04.1677 г.	10–21	40.0	144.0	–	8.1
5	13.05.1717 г.	–	39.4	142.4	–	7.6
6	20.07.1835 г.	04–15	37.9	141.9	–	7.6
7	05.08.1897 г.	00–10	38.3	143.3	–	7.6
8	02.03.1933 г.	17–31	39.1	144.7	~20	8.3
9	02.11.1936 г.	20–46	38.2	142.2	50~60	7.7
10	05.11.1938 г.	08–43	37.1	141.7	20	7.7
11**	11.03.2011 г.	05–46	38.3	142.4	24	8.9

\* Время по Гринвичу. \*\* Данные Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC/USGS).

Судя по табл. 1, самым сильным землетрясением прошлого в районе мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. было событие 869 г. с  $M=8.6$ . Т. Усами оценивал его магнитуду по шкале Рихтера, которая имеет предел (насыщение) при  $M \sim 8.6$  и более. Если бы он воспользовался шкалой Х. Канамори [Kanamori, 1983], магнитуда события 869 г. могла быть и больше. После этого землетрясения таких событий не наблюдалось в течение 742 лет. Однако в последующие 400 лет произошло 10 таких землетрясений. Нынешнее мегаземлетрясение продолжило цикл активизации сейсмичности. Таким образом, в фазе активизации наблюдается ~40-летний период повторяемости сильнейших землетрясений изучаемого района.

### Современная сейсмичность изучаемого района

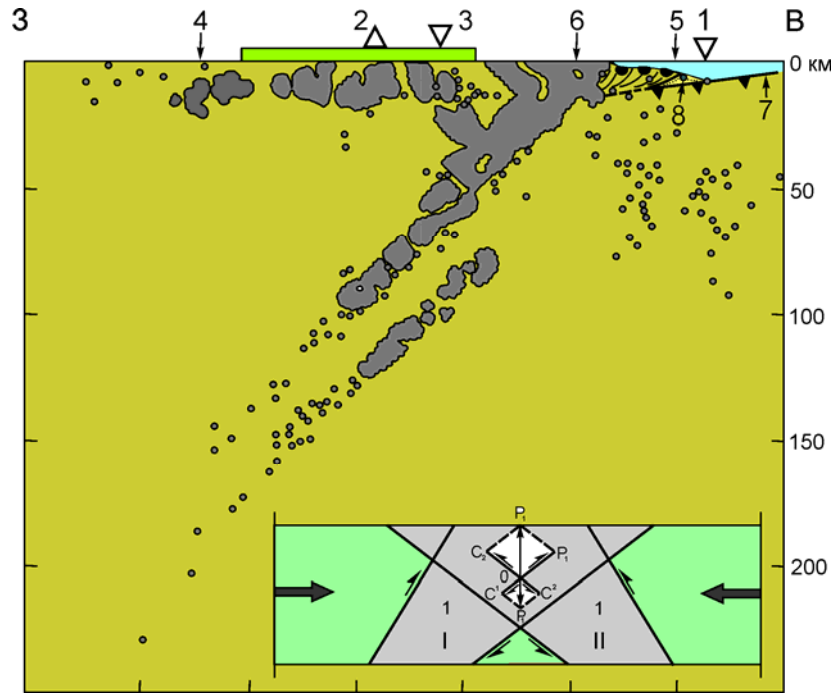
Тихоокеанская окраина СВ Хонсю относится к активным областям из-за своей сейсмичности. Уменьшение погрешности (до 1–2 км) определения гипоцентров землетрясений в 70-е годы прошлого века позволило японским сейсмологам [Hasegawa et al., 1979] выявить здесь двухслойную структуру фокальной зоны Беньофа, падающей к западу до глубин 150–200 км под углом  $30^\circ$  (рис. 4), и разные типы сейсмодислокаций в ее верхней (надвиги) и нижней (сбросы) плоскостях. На рис. 4 зона Беньофа, точнее ее верхняя плоскость, выходит на среднем склоне в полосе шарьяжа Ойасио. Следовательно, эту зону можно считать глубинным надвигом, а шарьяж – его структурным козырьком [Ломтев, Патрикеев, 1985].

Исследованиями сахалинских сейсмологов под руководством Р.З. Тараканова в эти же годы была обнаружена дуговая структура курильского сегмента зоны Беньофа и открыта неглубокая (50–100 км) встречная фокальная зона, падающая к востоку под краевой вал [Гнибиденко и др., 1980; Тараканов и др., 1977]. П.Н. Кропоткин [1978] предложил назвать ее зоной Тараканова. Выход этой зоны на тихоокеанском побережье Хонсю называют асейсмичным фронтом [Yoshii, 1975]. В очагах на выходе этой зоны, т.е. под шельфом, верхними склоном и террасой, доминируют надвиги, ориентированные по ее падению [Hasegawa et al., 1979].

Судя по географии и глубине главного толчка катастрофического землетрясения 11 марта 2011 г. и его афтершоков, а также строению тихоокеанского склона данное событие вызвано глубинным надвигом по зоне Беньофа, включая и его структурный козырек – шарьяж Ойасио. Масштаб и энергетика его оказались столь велики, что активизировались разломы автохтона [Ломтев, 2010] и встречной фокальной зоны Тараканова. Заметим, что сейсмичность внешнего склона Японского желоба и краевого вала, особенно по данным донных сейсмографов, местами довольно высокая, однако изучена еще недостаточно, особенно в части мелкофокусных землетрясений [Гнибиденко и др., 1980; Ломтев, 2010].

Судя по рис. 4, зоны Беньофа и Тараканова пересекаются под средним склоном, образуя сейсмоактивную структуру, напоминающую ромб [Ломтев, Патрикеев, 1983б, 1985]. В соответствии с правилом параллелограмма, в его очагах возможны комбинированные подвижки верхней террасы типа крутых и субвертикальных взбросов, способных возбуждать волны цунами по схеме поршневого механизма, включая и последние катастрофические события в марте 2011 г. (см. врезку к рис. 4).

На рис. 4 важно обратить внимание на область мелкофокусной (до глубин ~30 км), или коровой, сейсмичности под дугой Хонсю, которая непосредственно не связана со встречными фокальными зонами. По аналогии с Сахалином [Ломтев и др., 2007], она может быть вызвана гравитационным срывом земной коры к востоку по кровле



**Рис. 4.** Совмещенный широтный разрез встречных фокальных зон и профиля МОБ–ОГТ JNOC 2 [Ломтев, Патрикеев, 1985]: 1– фронт аккреции в основании тихоокеанского склона дуги Хонсю, 2 – вулканический фронт, 3 – асейсмичный фронт, 4 – основание япономорского склона дуги Хонсю, 5 – фронт шарьяжа Ойасио, 6 – корень шарьяжа и положение теплового минимума, 7 – кровля подвижного автохтона (слой 2), 8 – аккреционная призма. Черные точки и их рои – очаги землетрясений в зонах Беньофа и Тараканова, а также область мелкофокусной (коровой) сейсмичности под дугой Хонсю и прилегающей частью впадины Японского моря. Цветом выделены аккреционная призма, Японский желоб, дуга Хонсю с шарьяжем Ойасио во фронте и подстилающий коро-мантийный субстрат

асейсмичной литосферной мантии (пластовый срыв) с зоной обратного сползания вдоль япономорской континентальной окраины о-ва Хонсю.

С учетом малых глубин зоны Беньофа и протяженности системы дуга Хонсю – Японский желоб, а также ее положения во входящем структурном угле, образованном крупными Марианской и Идзу-Бонинской на юге и Курило-Камчатской на севере системами дуга – желоб и их глубинными надвигами, приходим к выводу, что в сейсмотектонике дуги Хонсю и Японского желоба заметную роль могут играть компоненты продольного бокового сжатия с юга и севера.

Важно обратить внимание на растущее водопотребление из подземных источников и прогрессирующую нагрузку со стороны многочисленных объектов и инфраструктуры на аллохтонную кору, способствующие росту ее тектонической подвижности, локальным просадкам (о-ва Хонсю) и, как представляется, увеличению продолжительности подготовки и магнитуды мелкофокусных землетрясений.

Итак, в строении и сейсмотектонике тихоокеанской активной окраины северо-восточной части о-ва Хонсю ключевыми элементами являются фокальный ромб, образованный встречными глубинными надвигами зон Беньофа и Тараканова, молодой шарьяж Ойасио и широкая верхняя терраса (зона генерации поршневых цунами) в средней части склона. В Японском желобе их дополняют аккреционная призма на внутреннем склоне и срыв слоев 1–4 на внешнем (подвижный автохтон [Ломтев, 2010]). Важно также исследовать особенности продольного сжатия со стороны Курило-Камчатской и Марианской дуг (глубинные надвиги).



Рассмотрим сильнейшие землетрясения, которые наблюдались за 1900–2010 гг. восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю (табл. 2). Очаговые области этих землетрясений показаны на рис. 5,а.

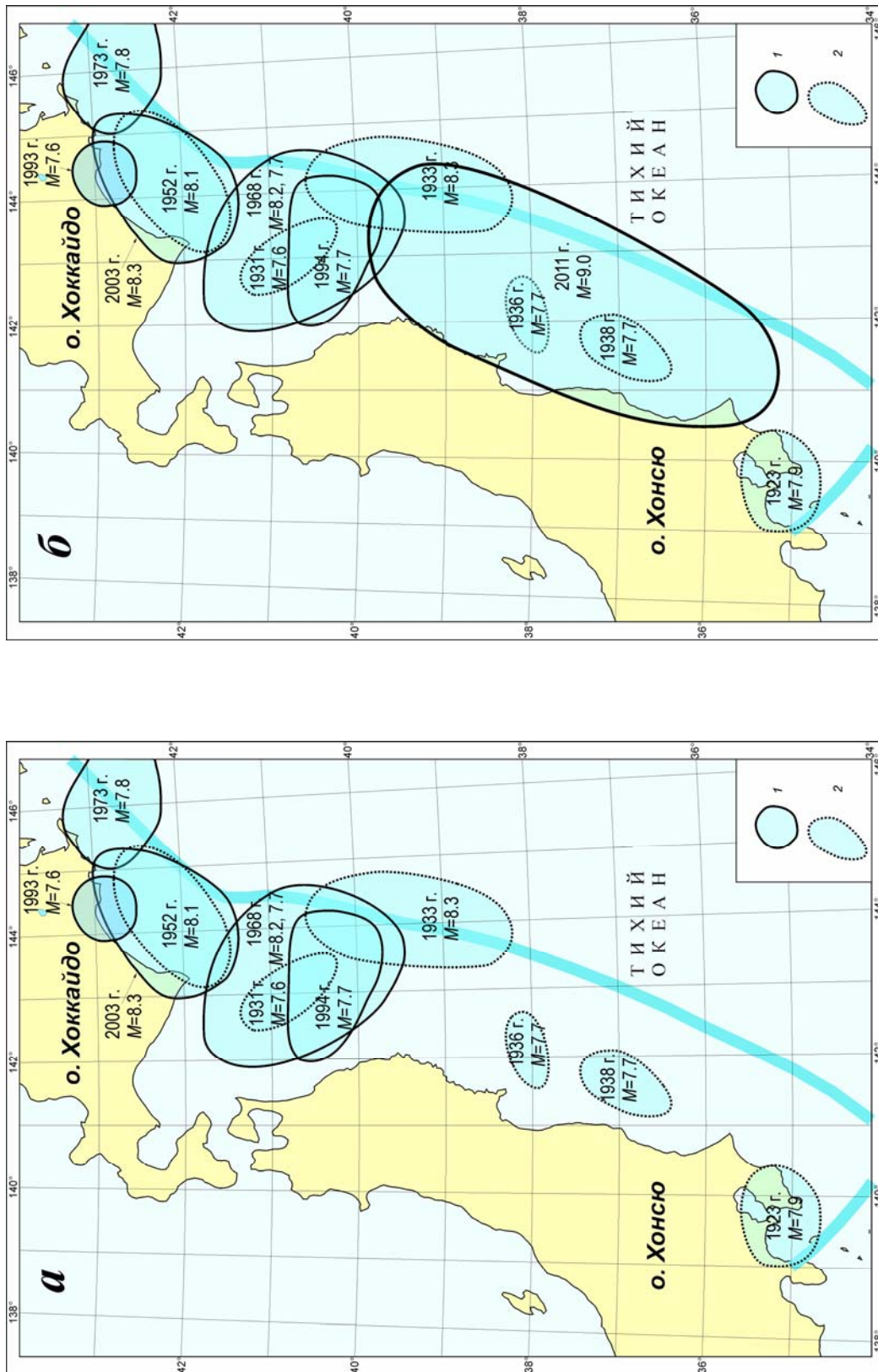
**Таблица 2.** Каталог землетрясений района Японии (восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю) с  $M \geq 7.6$  за 1900–2010 гг.

Дата	Время в очаге, JST ч–мин	Координаты эпицентра		Глубина, км	M	Источник
		$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.			
01.09.1923 г.	11–58	35.1	139.5	60	7.9	[Usami, 1979]
09.03.1931 г.	12–49	41.2	142.5	0	7.6	
03.03.1933 г.	02–31	39.1	144.7	0–20	8.3	
03.11.1936 г.	05–46	38.2	142.2	50–60	7.7	
05.11.1938 г.	17–43	37.1	141.7	20	7.7	
04.03.1952 г.	10–23	42.15	143.85	45	8.1	
16.05.1968 г.	09–49	40.7	143.6	0	8.2	[JMA ..., 2011]
16.05.1968 г.	19–39	41.4	142.9	40	7.7	
17.06.1973 г.	12–55	43.0	146.0	40	7.8	
15.01.1993 г.	20–06	42.9	144.4	103	7.6	
28.12.1994 г.	21–19	40.4	143.7	0	7.7	
26.09.2003 г.	04–50	41.7	144.2	71	8.3	

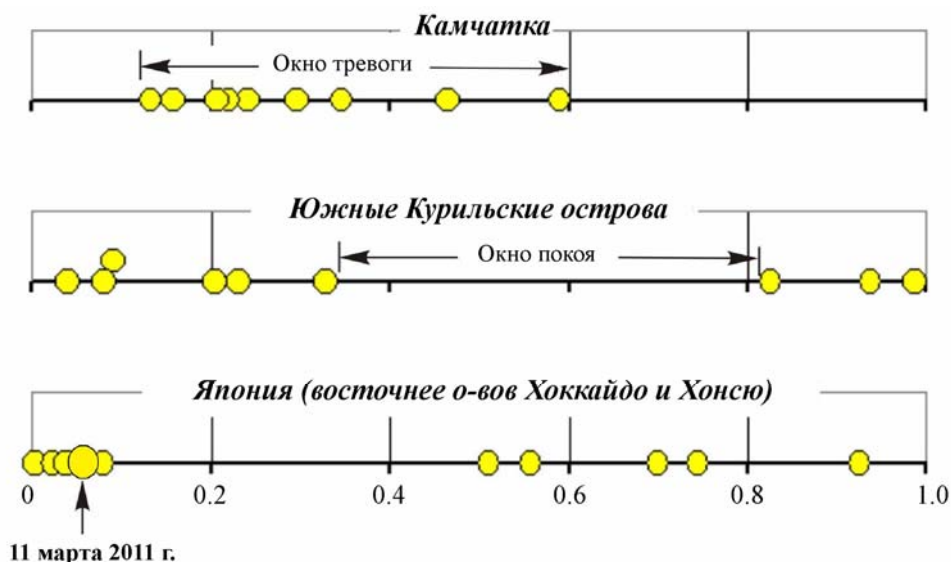
*Примечание.* Для землетрясений 1968–2003 гг. приведена моментная магнитуда  $M_w$  согласно [Kanamori, 1983].

Как видно на рис. 5,а, фактически все сильнейшие землетрясения происходили севернее  $39^\circ$  с.ш., где наблюдается скученность очаговых областей. В этой же области возникло событие 1897 г. ( $M = 7.6$ ). Его очаг не нанесен на рис. 5,а, поскольку по времени возникновения оно выходит за рассматриваемые временные рамки. В то же время южнее  $39^\circ$  с.ш. находилась обширная область относительного покоя протяженностью около 800 км. В этой части изучаемого района последние сильнейшие землетрясения произошли в 1923, 1936 и 1938 гг. С учетом этого состояние относительного покоя продолжалось, по меньшей мере, 75 лет. Судя по рис. 5,б именно там и произошла сейсмическая катастрофа 11 марта этого года. Таким образом, некоторые указания на подготовку землетрясения планетарного масштаба в районе о-ва Хонсю все же были, но сейсмологи не обратили на это внимание.

В работе [Тихонов, 2010] изучались периодичности, синхронизирующие возникновения сильных землетрясений в различных сейсмоактивных регионах. Для трех регионов (восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю, Камчатки и Южных Курильских островов) при землетрясениях с  $M \geq 7.6$  была обнаружена периодичность  $T = 780$  сут. По данным за почти 100 лет наблюдений были рассчитаны интервалы времени (окна покоя и окна тревоги), которые характеризуют периоды пониженной и повышенной вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$ . Для первого региона соответствующий график приведен на рис. 6. Кроме того, на этот график нанесен кружок, соответствующий времени возникновения Великого Японского землетрясения 11.03.2011 г. Оно произошло в конце окна тревоги (24.12.2009 г. – 20.03.2011 г.), т.е. не выбивается из общей закономерности, наблюдавшейся за последние 100 лет.



**Рис. 5.** Очаговые области сильнейших ( $M \geq 7.6$ ) землетрясений в районе восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю за периоды 1900–2010 гг. (а) и 1900 г. – март 2011 г. (б). Рисунок иллюстрирует заполнение сейсмической бреши, расположенной южнее  $39^\circ$  с.ш. и существовавшей до 2011 г., афтершоками метаземлетрясения 11.03.2011 г. 1 – очаговые области, околупенные по данным об афтершоках первых суток; 2 – границы очаговых областей, проведенные с меньшей точностью

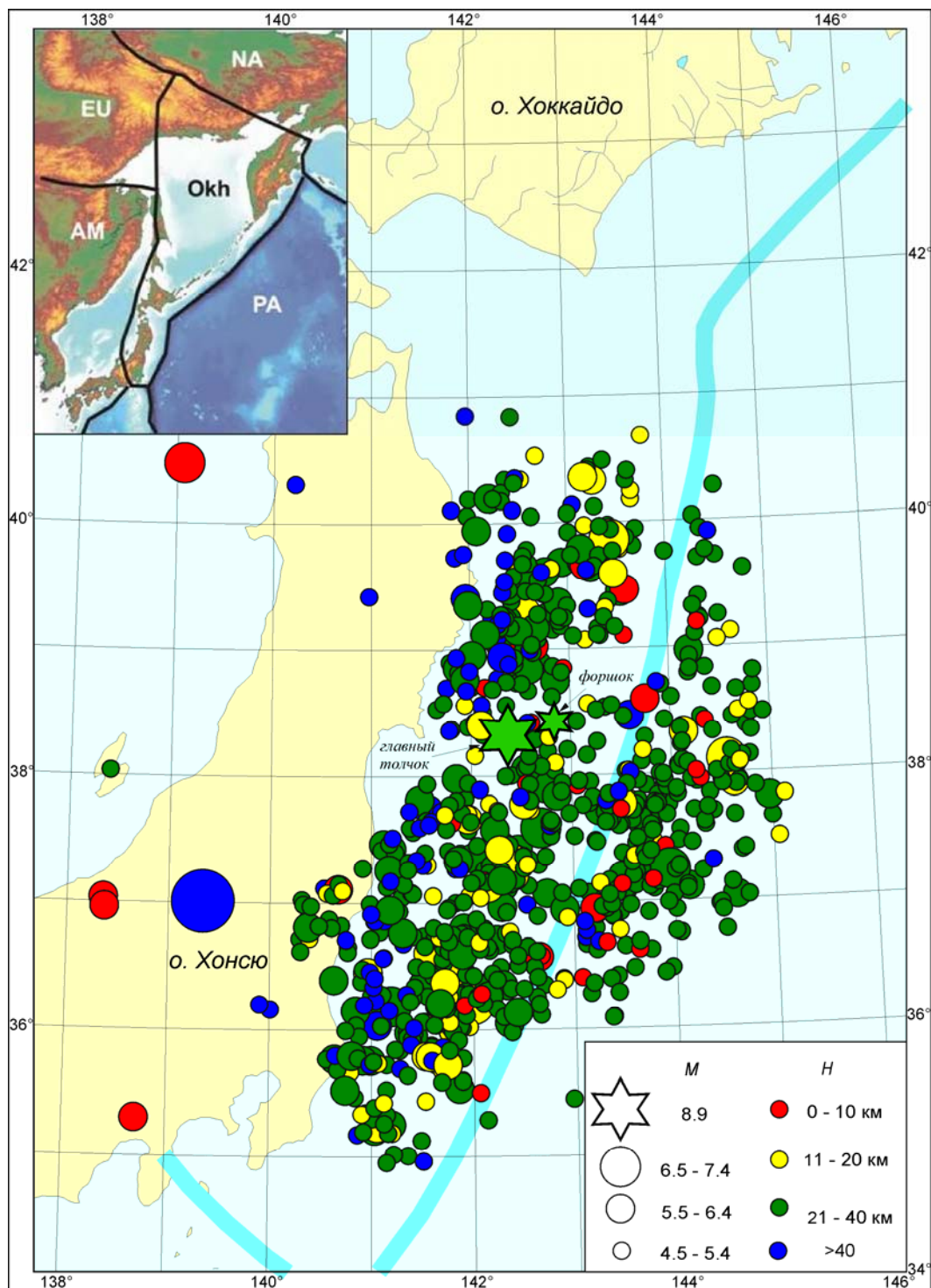


**Рис. 6.** Отображение кластеров сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) мелкофокусных землетрясений регионов Камчатки, Южных Курильских островов и Японии (район восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю) на суммарную развертку кольца (0 и 1 – одна и та же точка), соответствующую периоду  $T = 780$  сут. Использованы данные каталогов [Новый..., 1977; JMA..., 2011; Землетрясения..., 2003–2009] землетрясений за периоды 1900–2003 гг. (первый и третий регионы), 1918–2003 гг. (второй регион). Количество кластеров в выборках  $n = 9$

### Главный толчок и динамика развития афтершокового процесса

По оперативным данным NEIC/USGS (Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США) его гипоцентр находился восточнее о-ва Хонсю в точке с координатами:  $\varphi = 38.32^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 142.37^\circ$  в.д. на глубине  $h = 24.4$  км (см. рис. 1). Землетрясение стало следствием подвижки блоков земной коры в зоне контакта Тихоокеанской и Северо-Американской (Охотской) плит [Wei, Seno, 1998] (см. врезку на рис. 1). Механизм очага по данным Геологической службы США хорошо согласуется с механизмом по данным Гарвардского научного центра [<http://www.globalcmt.org>]. Согласно этим определениям, азимут простирания первой нодальной плоскости составил  $162^\circ$ , угол падения –  $17^\circ$ , угол скольжения –  $45^\circ$ ; для второй нодальной плоскости эти параметры оказались следующими:  $28^\circ$ ,  $78^\circ$ ,  $102^\circ$ . Такому механизму соответствует движение в очаге типа взброса, если в качестве рабочей принять вторую нодальную плоскость, с учетом того, что азимут ее простирания согласуется с простиранием облака афтершоков за первые сутки после главного толчка. По предварительным оценкам, полученным из GPS наблюдений, горизонтальное смещение составило примерно 4.5 м в направлении Тихого океана.

Начальная стадия афтершоковой последовательности землетрясений после мегаземлетрясения восточнее о-ва Хонсю была зарегистрирована, по-видимому, только с помощью удаленных сейсмических станций, в частности глобальной сети NEIC/USGS. Приборы на станциях JMA зашкалили либо вышли из строя. По данным NEIC/USGS, за первые сутки после мегаземлесения было зарегистрировано около 160 толчков с  $M = 4.6 - 7.1$  (из них 22 толчка с  $M \geq 6.0$ , рис. 1). Причем афтершоковый процесс развивался с севера на юг в направлении г. Токио. Магнитуда сильнейшего афтершока, возникшего спустя 39 мин после главного толчка, составила 7.1. Забегая вперед, отметим, что это значение так и не было превышено в течение всех 25 сут.

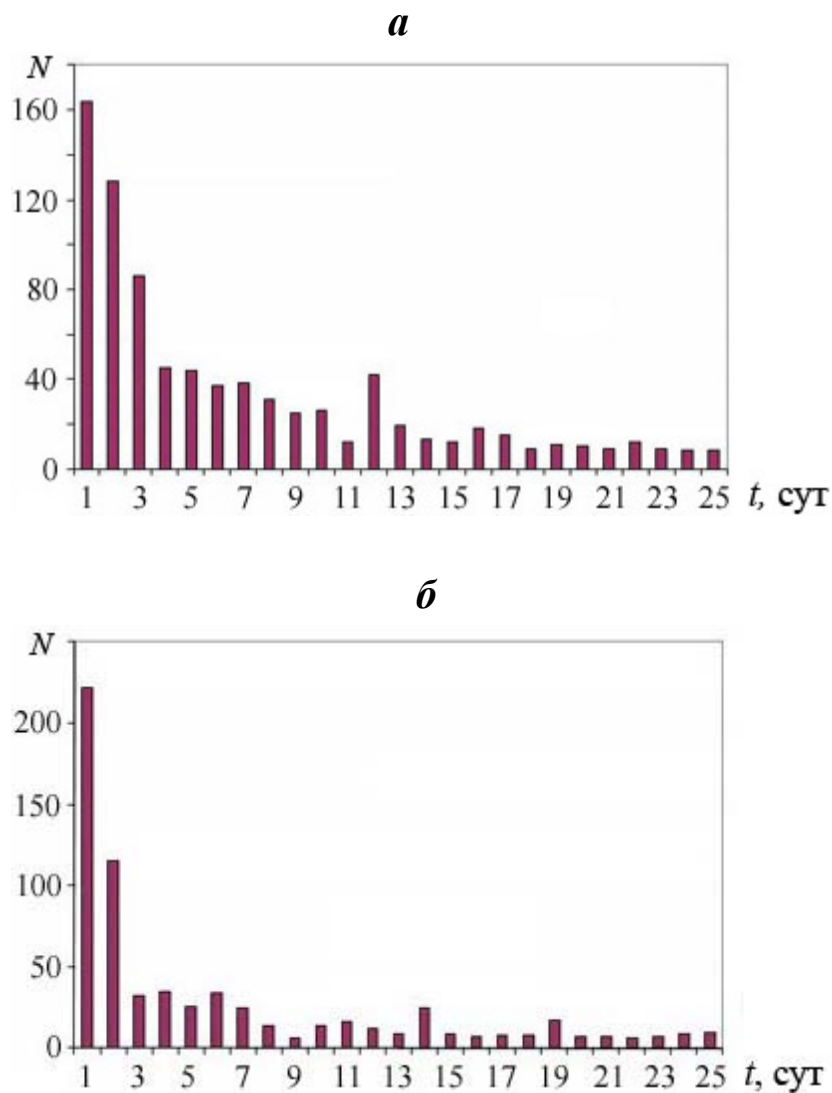


**Рис. 7.** Положение эпицентра главного толчка землетрясения 11.03.2011 г., его форшока и афтершоков, зарегистрированных в течение 25 сут по данным оперативного каталога NEIC/USGS. Обозначения см. на рис. 1

За вторые сутки количество зарегистрированных афтершоков с  $M \geq 4.6$  составило около 130 (из них 7 афтершоков с  $M \geq 6.0$ ). За третьи сутки эта цифра снизилась до 86 (при одном толчке с  $M = 6.0$ ). В течение 25 сут было зарегистрировано около 875 афтершоков (рис. 7).

Преобладающее число гипоцентров находилось в интервале глубин 20–40 км. Эпицентры повторных толчков покрыли огромную область протяженностью около 650 км с поперечным размером примерно 350 км от побережья о-ва Хонсю до глубоководного желоба и даже за ним.

Общий характер затухания афтершоковой последовательности показан на рис. 8. Для сравнения приведен аналогичный график для Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. с  $M_w = 9.3$ .



**Рис. 8.** Гистограммы, характеризующие затухание афтершоковых последовательностей двух мегасобытий: Великого Японского 11.03.2011 г. (а) и Суматра-Андаманского 26.12.2004 г. (б).  $N$  – число афтершоков с  $M \geq 4.6$  в сутки

На рис. 8 видно, что ход сейсмического процесса по параметру  $N$  для этих мегасобытий подобен за исключением первых суток. Однако по энергии – числу сильных ( $M \geq 6.0$ ) афтершоков – за первые сутки наблюдается весьма существенное различие: 22 толчка для первого события против 9 – для второго.

Для сравнения приведем количество толчков для Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г., полученное за 25 сут также Геологической службой США. Ею было зарегистрировано около 680 афтершоков с  $M \geq 4.6$ , т.е. вполне сопоставимое число.

Сильнейший афтершок с  $M=7.5$  возник спустя 3 ч 22 мин после главного удара, а протяженность разрыва в очаге составила около 1300 км [Кособоков, 2005]. Таким образом, за рассматриваемый интервал времени (25 сут) число повторных толчков, магнитуда сильнейшего толчка и время его появления в обоих случаях оказались сопоставимыми при существенном различии в энергетике афтершоковых процессов.

Различие по силе между главным событием и сильнейшим за 25 сут афтершоком в обоих случаях составляет около двух единиц магнитуды (или 1000-кратное по энергии). Возникает принципиально важный вопрос: возможен ли при японском землетрясении более сильный афтершок, чем наблюдавшийся ( $M = 7.1$ ) спустя 39 мин после главного толчка? В случае Суматра-Андаманского землетрясения ответ известен – спустя 3 мес после главного удара возник афтершок с  $M=8.6$ .

Из двух альтернативных точек зрения – вероятно, маловероятно – предпочтение отдадим первой, согласно которой на северо-востоке о-ва Хонсю возможно еще одно разрушительное землетрясение с  $M = 8.0 \pm 0.5$ . На чем основано такое мнение? Во-первых, на закономерности, установленной М. Ботом [Bath, 1965] для разности магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока, которая оценивается в 1.2 единицы магнитуды; во-вторых, на аналогии протекания афтершокового процесса после японского мегасобытия с процессом после Суматра-Андаманского землетрясения (см. рис. 5 в работе [Родкин, Тихонов, 2011]).

Различие в магнитудах главного события и сильнейшего за 25 сут афтершока в 1.9 единицы магнитуды – случай уникальный для сильнейших японских землетрясений изучаемого района. В табл. 3 представлены 14 пар событий (сильнейший главный толчок – сильный афтершок) в изучаемом районе за 1900–2010 гг. по данным агентства ЖМА. Наибольшее значение  $M_{гл} - M_{афт} = 1.8$ , приведенное в таблице соответствует паре событий, произошедших 21 декабря 1946 г. Однако этой оценке присуща некоторая неопределенность. Дело в том, что моменту времени 21.12.1946 г. в 04 ч 19 мин отвечают два сильнейших ( $M=8.0, 8.1$ ) землетрясения в каталоге ЖМА. Спустя 3 ч 26 мин после них было зарегистрировано событие с  $M = 6.3$ .

Из-за малого объема выборки анализировать распределение параметра ( $M_{гл} - M_{афт}$ ) не вполне корректно, поэтому ограничимся только расчетом среднего значения этого параметра для данного сейсмоактивного района. Оно оказалось равным  $0.90 \pm 0.44$ . Следовательно, закономерность М. Бота для японских землетрясений выполняется даже с некоторым запасом (0.3 единицы магнитуды).

Другой важный вопрос: если развитие афтершокового процесса пойдет по Суматра-Андаманскому сценарию, то где наиболее вероятно расположение очага с  $M = 8.0 \pm 0.5$ ? На наш взгляд, в отношении его местоположения вполне возможна реализация сценария, наблюдавшегося при сильнейших Симуширских землетрясениях 15.11.2006 г. ( $M_w=8.3$ ) и 13.01.2007 г. ( $M_w=8.1$ ) [Тихонов и др., 2008].

Как видно на рис. 1 и 3, область афтершоков заполняется в течение 25 сут неравномерно. В ее пределах можно выделить основную область концентрации афтершоков, которая примыкает к острову, и вторичную область, расположенную севернее  $37.0^\circ$  с.ш. за глубоководным желобом, который служит в качестве разделяющей границы. Эта пространственная особенность поля афтершоков отмечалась в работе [Родкин, Тихонов, 2011] и для интервала регистрации 15 сут.

При Симуширском землетрясении 2006 г. также наблюдалась две зоны афтершоков: одна вблизи о-ва Симушир, а вторая – в районе Курильского желоба. И второе землетрясение с  $M=8.1$  произошло именно в этой области. При этом афтершоки первого землетрясения четко наметили линейно вытянутую область в районе желоба, где спустя два месяца случилось второе событие.

**Таблица 3.** Пары землетрясений (сильнейший главный толчок – сильный афтершок) в районе Японских островов за 1900–2010 гг. по данным JMA

Дата	Время в очаге, JST ч–мин	Координаты эпицентра		Глубина, км	$M$	$M_{\text{гл}} - M_{\text{афт}}$
		$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.			
02.09.1922 г. 15.09.1922 г.	04–16 04–31	24.5 24.5	122.2 122.2	60 60	7.6 7.3	0.3
01.09.1923 г. 02.09.1923 г.	11–58 11–46	35.1 34.9	139.5 140.2	60 60	7.9 7.3	0.6
09.03.1931 г. 10.03.1931 г.	12–49 02–56	41.2 40.6	142.5 143.0	0 60	7.6 6.1	1.5
03.03.1933 г. 03.03.1933 г.	02–31 05–42	39.2 39.8	144.5 144.4	10 40	8.1 6.8	1.3
03.11.1936 г. 27.07.1937 г.	05–46 04–56	38.2 38.3	142.2 142.1	60 40	7.7 7.1	0.6
05.11.1938 г. 05.11.1938 г.	17–43 19–50	37.1 37.3	141.6 141.7	20 30	7.7 7.3	0.4
07.12.1944 г. 13.01.1945 г.	13–35 03–38	33.7 34.7	136.2 137.0	30 0	8.0 7.1	0.9
21.12.1946 г. 21.12.1946 г.	04–19 07–45	33.0 33.3	135.6 135.2	30 0	8.1 6.3	1.8
04.03.1952 г. 04.03.1952 г.	10–22 10–40	41.8 42.0	144.1 144.3	0 10	8.1 7.1	1.0
26.11.1953 г. 26.11.1953 г.	02–48 17–14	34.0 34.0	141.7 141.5	60 70	7.4 6.6	0.8
16.05.1968 г. 16.05.1968 г.	09–48 19–39	40.7 41.4	143.6 142.9	0 40	8.2 7.7	0.5
17.06.1973 г. 24.06.1973 г.	12–55 11–43	43.0 43.0	146.0 146.8	40 30	7.8 7.1	0.7
28.12.1994 г. 29.12.1994 г.	21–19 05–52	40.4 40.1	143.7 143.0	0 0	7.7 6.4	1.3
26.09.2003 г. 26.09.2003 г.	04–50 06–08	41.8 41.7	144.1 143.7	42 21	8.0 7.1	0.9
Среднее значение разности $M_{\text{гл}} - M_{\text{афт}}$						0.90
Среднеквадратичное отклонение						0.44

Таким образом, не исключается возможность повторения такого же сценария, как на Средних Курильских островах. Дальнейшее пополнение данных об афтершоковой последовательности Великого Японского землетрясения 11 марта 2011 г. позволит либо утвердиться в этом предположении, либо отказаться от него.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Европейского гранта FP7 № 262005 SEMEP.

## Литература

- Геологическое развитие Японских островов. М.: Мир, 1968. 719 с.
- Гнибиденко Г.С., Быкова Т.Г., Веселов О.В., Воробьев В.М., Ким Чун Ун, Тараканов Р.З. Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба. М.: Наука, 1980. 179 с.
- Землетрясения Северной Евразии в 1997–2003 гг. / Геофизическая служба РАН. Обнинск, 2003–2009.
- Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. М.: ГЕОС, 2005. Ч. I. 179 с. (Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Вычислительная сейсмология; Вып. 36).
- Кропоткин П.Н. Сейсмичность, связанная с изломом погружающейся литосферной плиты (субдукцией) // Геотектоника. 1978. № 5. С. 3–6.
- Ломтев В.Л. Методы датирования глубоководных желобов // Геология дна Тихого океана и зоны перехода к Азиатскому континенту. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 105–111.
- Ломтев В.Л. К строению ложа Северо-Западной Пацифики // Урал. геофиз. вестн. 2010. № 1(16). С. 21–32.
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Надвиговая структура северной части Японского желоба // Сейсмические исследования в западной части Тихого океана и его обрамлении. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983а. С. 26–34.
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Фокальный ромб как вероятная область генерации цунами (на примере тихоокеанского континентального склона северо-восточной части дуги Хонсю) // Оперативный и долгосрочный прогноз цунами. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983б. С. 136–142.
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Структуры сжатия в Курильском и Японском желобах. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. 141 с.
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н., Немченко Г.С. Сеймостратиграфия кайнозойского осадочного чехла Северо-Западной плиты Тихого океана // Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 21–41.
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н., Сергеев К.Ф., Ильев А.Я., Пискунов Б.Н., Кононов В.Э., Агеев В.Н. Пацифида, Тетис и Пацифика // Геодинамика, геология и нефтегазоносность осадочных бассейнов Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2004. Т. 1. С. 131–144.
- Ломтев В.Л., Никифоров С.П., Ким Ч.У. Тектонические аспекты коровой сейсмичности Сахалина // Вестн. ДВО РАН. 2007. № 4. С. 64–71.
- Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984. 312 с.
- Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 535 с.
- Патрикеев В.Н. Атлас сейсмических разрезов Северо-Западной плиты Тихого океана. М.: ГЕОС, 2009. 208 с.
- Родкин М.В., Тихонов И.Н. Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 года: величина события и характер афтершоковой последовательности // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 64–80.
- Тараканов Р.З., Ким Ч.У., Сухомлинова Р.И. Закономерности пространственного распределения гипоцентров Курило-Камчатского и Японского регионов и их связь с особенностями геофизических полей // Геофизические исследования зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М.: Наука, 1977. С. 67–77.



- Тихонов И.Н.* Синодические периоды планет Солнечной системы и синхронизация времен возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 71–80.
- Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н., Поплавский А.А., Прытков А.С., Спириин А.И.* Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 3–17.
- Уэда С.* Окраины глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана // Геология континентальных окраин. М.: Мир, 1978. Т. 2. С. 170–191.
- Шику Ц., Мисава Ю.* Геологическое строение и тектоника внутренних склонов Нанкайского трюга и Японского желоба // Геотектоника. 1980. № 6. С. 98–109.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2, N 6. P. 483–514.
- Choi D.R.* Continental crust under the NW Pacific Ocean // J. Petroleum Geology. 1987. V. 10, N 4. P. 425–440.
- Geological investigations in the northern margin of Okinawa Trough and western margin of Japan Sea. Tokyo: Geol. Survey of Japan, 1978. N 10. 80 p.
- Hasegawa A., Umino T., Takagi A., Suzuki Z.* Double-planed deep seismic zone and anomalous structure in the upper mantle beneath Northeastern Honshu (Japan) // Tectonophysics. 1979. V. 57. P. 1–6.
- Initial reports of the Deep-Sea Drilling Project. V. 56/57. Washington: U.S. Govern. Printing Office, 1980. Pt. 1. 629 p.
- JMA Earthquake Catalog (Japan Meteorological Agency, 1926.1.1 – 2011.1.1). 2011.
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // Tectonophysics. 1983. V. 93. P. 185–199.
- Mammerickx J.* A deep-sea channel in the Northwest Pacific Basin // Mar. Geology. 1980. V. 34. P. 207–218.
- Matsuzawa A., Tamano T., Aoki Y., Ikawa T.* Structure of the Japan trench subduction zone from multi-channel seismic-reflection records // Mar. Geology. 1980. V. 35. P. 171–182.
- Musya K.* Materials for the history of Japanese earthquakes // Shinsai Yobo Hyogikai. 1942–1943. Revised ed. V. 1–3. (in Japanese).
- Musya K.* Materials for the history of Japanese earthquakes. Mainchi Press, 1949 (in Japanese).
- Usami T.* Study of historical earthquakes in Japan // Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo. 1979. V. 54, Pt. 3/4. P. 399–439 (in English).
- Wei D., Seno T.* Determination of the Amurian plate motion, in Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia // Geodyn. Ser. AGU: Washington, 1998. V. 27. 419 p.
- Yoshii T.* Proposal of the «aseismic front» // J. Seismol. Soc. Japan. 1975. V. 28, N 3. P. 365–367.

#### Сведения об авторах

**ТИХОНОВ Иван Николаевич** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, ИМГиГ ДВО РАН. 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 16. Тел.: (4242)-791-692. Факс: (4242)791-517. E-mail: tikhonov@imgg.ru

**ЛОМТЕВ Владимир Леонидович** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, ИМГиГ ДВО РАН. 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 16. Тел.: (4242) 791-690. E-mail: lomtev@imgg.ru

## THE GREAT JAPAN EARTHQUAKE OF MARCH 11, 2011: TECTONIC AND SEISMOLOGICAL ASPECTS

I.N. Tikhonov, V.L. Lomtev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB of Russian Academy of Sciences, Yuzno-Sahalinsk, Russia

**Abstract.** Tectonic and seismological aspects of Great Japan earthquake 11.03.2011 ( $M_w = 9.0$ ) on the Pacific margin of North-Eastern Honshu island are discussed. Structure and seismotectonics data, seismicity and period of recurrence of great ( $M \geq 7.6$ ) earthquakes during modern and historical periods are presented. It is showed, that the period of recurrence of great events is about 40 years, and megaequakes – 1000 years and more. Seismic gap of extent  $\sim 800$  km is established in the study area to the south of  $39^\circ$  N and are filled aftershockes of megaeququake 11.03.2011. This event possibly is connected with the deep thrust along Benioff zone and its structural keprock – Oyashio nuppe at middle Pacific continental slope. Aftershock sequences of this and Sumatra-Andaman (2004) megaeququakes are compared. It was found, that during the time interval (25 days) a row of their major characteristics (number of aftershockes, magnitude of great shock and time of its occurrence) are compared in both cases by essential difference in a energetic of aftershoke processes. Possible scenario of origin of repeated shock with  $M \sim 8.0$  in the Japan trench is discussed.

*Keywords:* active margin, trench, focal zone, deep thrust, nuppe, earthquake, megaeququake, aftershock sequence, strongest aftershock, scenario of aftershock development.