



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

I. N. Tikhonov, V. L. Lomtev

Institute of Marine Geology & Geophysics FEB RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauka street, 1B, Russia

Abstract: The publication presents a review of the structure and seismotectonic features of the Pacific margin of the North-Eastern Honshu Island on the basis of data from seismic reflection and CDP, drilling and detailed seismic studies in view of the mega-earthquake ($M_w=9.0$) which occurred in Japan on March 11, 2011. The mega-earthquake is discussed in terms of its position in the succession of the strongest events ($M \geq 7.6$) in the area under study within the historical period and in the recent timeline. It is suggested that the period of recurrence is about 40 years for great events and about 1000+ years for mega-earthquakes. A number of facts suggesting a probability of a planetary-scale earthquake in the Honshu Island region are revealed. Specifically, a seismic gap with a total length of about 800 km is determined in the study area. It is located southward of 39° north latitude has already manifested aftershocks of the mega-earthquake of March 11, 2011. It is probable that the mega-earthquake was related to the deep thrust along the Benioff zone and the Oyashio nappe being its structural cap rock in the middle Pacific slope. The sequence of its aftershocks is compared with those of the Sumatra-Andaman ($M_w=9.3$, 2004) and Simushir ($M_w=8.3$, 2006) earthquakes. It is established that development of the aftershock sequences of the first and second events was very similar in time, and development of the areas of aftershock epicentres of the first and third earthquakes is similar in space. The above similarities give grounds to suggest that an aftershock ($M=8.0$) is possible with a relative shifting from the main shock towards the deep trench.

Key words: active margin, trench, focal zone, deep thrust, nappe, earthquake, mega-earthquake, aftershock sequence, scenario of aftershock development.

Recommended by S.I. Sherman 11 May 2011

Citation: *Tikhonov I.N., Lomtev V.L.* Tectonic and seismological aspects of the Great Japan earthquake of March 11, 2011 // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. V. 2. № 2. P. 145–160.

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 11 МАРТА 2011 ГОДА

И. Н. Тихонов, В. Л. Ломтев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

Аннотация: По данным сейсморазведки (метод отраженных волн – общая глубинная точка, МОВ-ОГТ), бурения и детальной сейсмичности рассмотрены особенности строения и сейсмотектоники тихоокеанской окраины северо-восточной части о-ва Хонсю в связи с возникшим здесь 11 марта 2011 г. мегаземлетрясением с магнитудой $M_w=9.0$. Обсуждается позиция данного события в ряду сильнейших ($M \geq 7.6$) землетрясений этого района за исторический и современный период. Показано, что период повторяемости сильнейших событий составляет около 40 лет, а мегаземлетрясений – 1000 лет и более. Выявлены некоторые факты, свидетельствовавшие о готовящемся землетрясении планетарного масштаба в районе о-ва Хонсю. В частности, установлено существование сейсмической бреши протяженностью ~800 км, расположенной южнее 39° 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 Ойасию в средней части тихоокеанского склона. Его афтершоковая последовательность сопоставлена с рядами повторных толчков Суматра-Андаманского (2004 г., $M_w=9.3$) и Симуширского (2006 г., $M_w=8.3$) землетрясений. Установлены значительные аналогии во временном развитии афтершоковых последовательностей первого и второго событий, а в пространственном (поля эпицентров афтершоков) – для первого и третьего землетрясений. Эти аналогии позволяют высказать предположение о возможности реализации афтершока с $M=8.0$, смещенного относительно основного толчка в сторону глубоководного желоба.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

11 марта 2011 г. в 05 час 46 мин по Гринвичу (местное время – 14 час 46 мин) восточнее о-ва Хонсю (Япония) произошло землетрясение, относящееся к классу мегасобытий, т.е. землетрясений планетарного масштаба (рис. 1). Первоначальная оперативная оценка его магнитуды по поверхностным волнам (M_S), полученная Национальным центром информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC/USGS), составила 7.9. Затем она была существенно уточнена на основе моментной магнитуды M_w – до значения 8.8, а еще позднее принята равной $M_w=9.0$.

По сообщениям в Интернете этому событию присваивались разные собственные имена: «Великое японское землетрясение» (Great Japan Earthquake), «Северо-восточное Тайхейю землетрясение» (North-eastern Taiheiyou Earthquake), «Тохоку-Чино Тайхейю-оки» (Tohoku-Chino Taiheiyou-oki Earthquake). Далее мы остановимся на первом названии.

По роковому стечению обстоятельств эта сейсмическая катастрофа спровоцировала еще более разрушительные волны цунами высотой до 10–20 м, которые, в свою очередь, способствовали возникновению техногенной катастрофы на АЭС «Фукусима-1». Эти катастрофы произошли в одном из густонаселенных районов Японии, что 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 долларов США по состоянию на начало апреля 2011 г.). Случившееся стало трагедией общенационального масштаба.

Отметим интересную закономерность. Подобные сейсмические катастрофы имеют свойство группироваться во времени. Последняя такая группа наблюдалась в 60 и 70-е годы прошлого века. В нее вошли Камчатское землетрясение 4.11.1952 г. ($M_w=9.0$), Чилийское 22.05.1960 г. ($M_w=9.6$) и Аляскинское 28.03.1964 г. ($M_w=9.2$).

Спустя 40 лет начала формироваться новая группа: Суматра-Андаманское землетрясение 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. ($M_w=9.0$).

Японские о-ва 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 века, а может быть и за историческое время.

Необходимо также заметить, что Великое японское землетрясение и цунами 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 [*Методы...*, 1984; *Могги*, 1988; *Уэда*, 1978].

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, произошедших ранее; описание сейсмичности, предвзявшей событие; выявление постфактум различных предвестниковых эффектов; оценку параметров главного удара и развития афтершокового процесса; картирование макросейсмических проявлений и т.д.

К моменту издания данной статьи Великому землетрясению в Японии 2011 г. уже посвящено большое количество публикаций. Данное сообщение преследует три цели – дать сведения по строению и сейсмотектонике тихоокеанской окраины северо-восточной части о-ва Хонсю, то есть 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

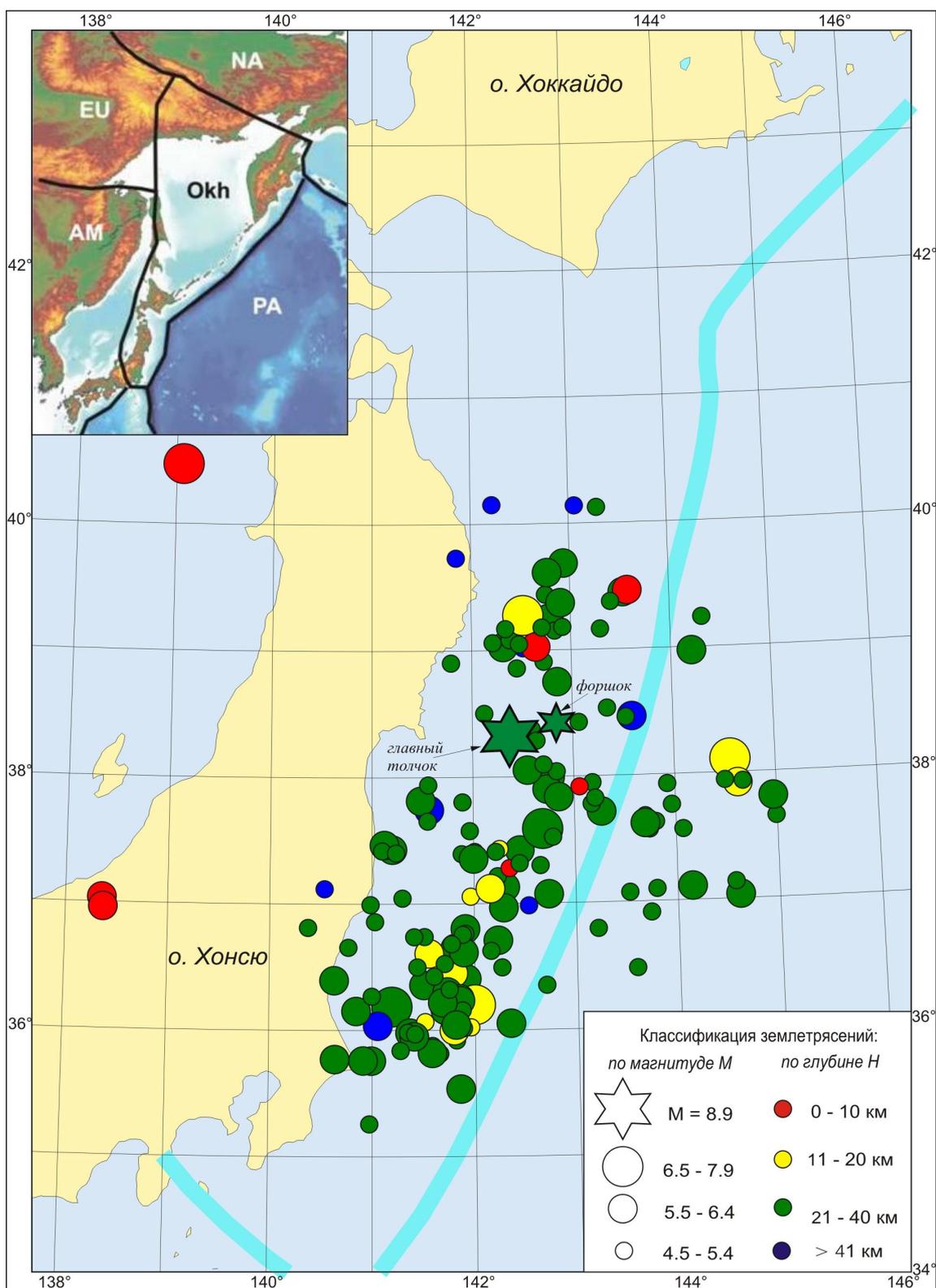


Рис. 1. Положение эпицентра главного толчка землетрясения 11.03.2011 г. (большая звездочка), его форшока (маленькая звездочка) и афтершоков (кружки), зарегистрированных в течение одних суток по данным оперативного каталога NEIC/USGS. Узкая полоса – ось глубоководного желоба. На врезке – региональная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

Fig. 1. Locations of the main shock of the earthquake of 11 March 2011 (large star), its foreshock (small star), and aftershocks (circles) which were registered within 24 hours, according to the NEIC/USGS Catalog. The narrow band shows the axis of the deep trench. The insert presents the regional scheme showing plate tectonic boundaries according to the model published in [Wei, Seno, 1998]. NA – North American, EU – Eurasian, AM – Amur, PA – Pacific, ОКН – Okhotsk plates.

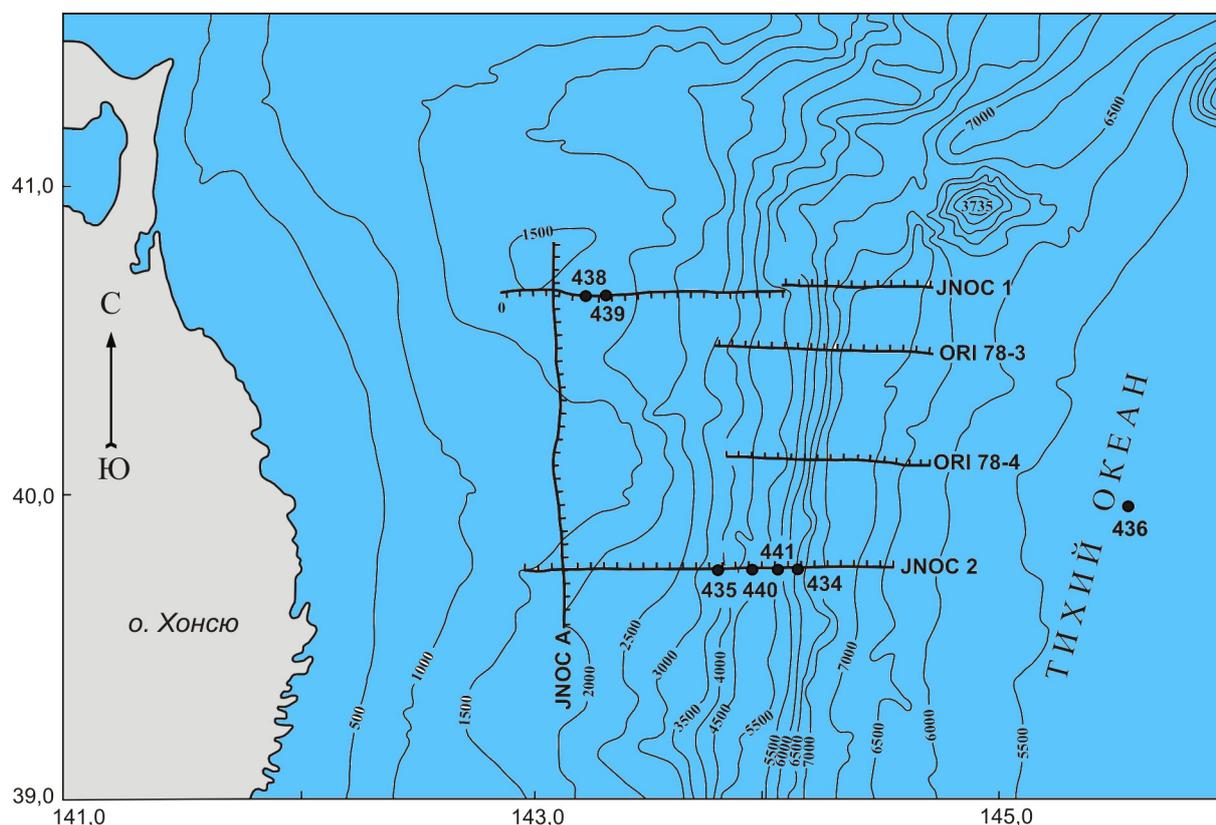


Рис. 2. Батиметрическая карта исследуемого района с положением профилей МОВ-ОГТ Японской национальной нефтяной компании (JNOC) и скважин 56-го рейса «Гломара Челленджера» [Initial Reports..., 1980].

Fig. 2. The bathymetric map of the area under study. It shows positions of CDP profiles published by the Japan National Oil Company (JNOC) and wells in Glomar Challenger Leg 56 [Initial Reports..., 1980].

событий в данном районе и, наконец, на основе оперативных сейсмологических данных за 32 суток после возникновения мегасобытия оценить масштаб явления, характер и возможные сценарии развития афтершокового процесса.

2. ТЕКТОНИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗУЧАЕМОГО РАЙОНА

Батиметрия и тектоническое строение тихоокеанской окраины дуги Хонсю (Тохоку) и Японского желоба протяженностью 900 км и шириной 100 км изучаются более 100 лет [Уэда, 1978]. Современные представления о тектоническом строении этого региона начали складываться в 70–80-е годы прошлого столетия после отработки бурового геотраверса «Гломара Челленджера» (рис. 2, 3), многоканального сеймопрофилирования МОВ-ОГТ [Шики, Мисава, 1980; Initial Reports..., 1980; Matsuzawa et al., 1980]. Важным дополнением стала геолого-геофизическая съемка подводных окраин Японского архипелага, выполненная Геологической службой Японии под руководством проф. Е. Хонза [Geological investigations..., 1978; и

др.]. Представленные ниже материалы и взгляды на строение и сеймотектонику региона основаны на результатах геологической интерпретации данных МОВ и бурения в этом регионе [Ломтев, 1989, 2010; Ломтев, Патрикеев, 1983а, 1983б, 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 глубоководными 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 (рис. 2, 3).

На глубинном разрезе JNOC2 в структуре среднего склона отчетливо выделяется клиновидный выступ акустического фундамента Ойасио видимой мощностью до 8 км, драпированный кайнозойским чехлом. Под акустическим фундаментом здесь понимают основание видимого разреза дна на профилях, полученных методом непрерывного сеймопрофилирования (НСП) или МОГТ со сложным волновым полем, в ко-

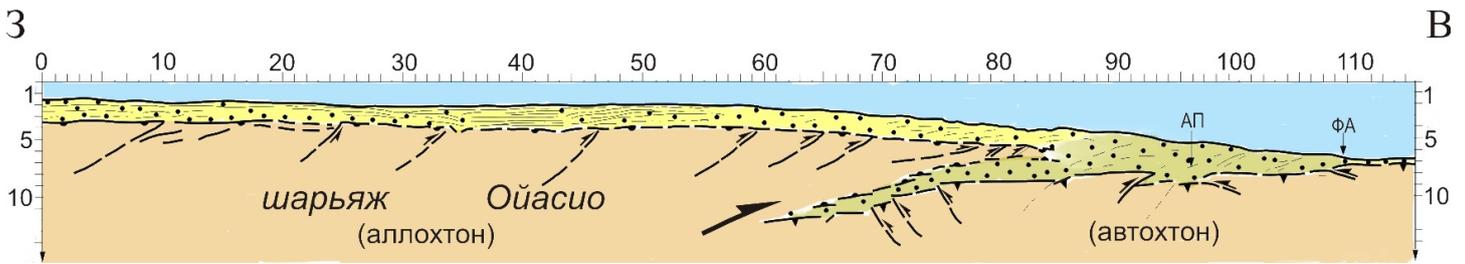


Рис. 3. Интерпретированный глубинный разрез JNOC2 [Ломтев, Патрикеев, 1983а]. АП – аккреционная призма, ФА – фронт аккреции. Цветом выделены водная толща Тихого океана, кайнозойский осадочный чехол, аккреционная призма и акустический фундамент аллохтона и автохтона. Пунктиры со стрелками – отражающие 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.

Fig. 3. Interpreted depth profile JNOC2 [Ломтев, Патрикеев, 1983а]. АП – accretion prism, ФА – accretion front. Colours show the Pacific water, the Cenozoic sedimentary cover, the accretion prism and the acoustic basement of the allochthon and the autochthon. Dotted lines with arrows show reflection sites, reference compression faults and probable displacements along the faults. The thick arrow shows the direction of movement of the Middle Quaternary Oyashio nappe (allochthon) and the Honshu Arc towards the adjacent NW Pacific abyssal floor.

тором почти нет полезных отражений. 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 Reports..., 1980; Патрикеев, 2009]), приходим к выводу, что акустический фундамент среднего склона между верхней и нижней террасами сдвоен (рис. 3). Его четкое выделение на временном разрезе JNOC2 [Initial Reports..., 1980; Ломтев, Патрикеев, 1985] обусловлено резким скачком скорости распространения продольных волн в кровле акустического фундамента от 2–3 км/с в кайнозойском чехле и аккреционной призме до 5.0–5.5 км/с в фундаменте [Антипов и др., 1981]. Выклинивание низкоскоростных пород аккреционной призмы к западу приводит к смещению пород акустического фундамента и, следовательно, прекращению прослеживания отражений от подошвы клина на временном и глубинном разрезах. Наклон последней к дуге Хонсю на разрезе JNOC2 достигает 11.5°.

В тектонике такие пологонаклонные аллохтонные клинья называют шарьяжами, или тектоническими покровами [Белостоцкий, 1978; Ломтев, Патрикеев, 1985]. Прерывистые наклонные отражающие площадки внутри акустического фундамента маркируют чешуйчатые надвижки, 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 надвижкам западного падения (см. скв. 434 и 441 [Initial Reports..., 1980; Ломтев, Патрикеев, 1983а, 1985]).

Молодые надвижки и взбросы автохтона имеют вос-

точное падение и связаны со сползанием слоев 1–4, фиксируя его тектоническую подвижность. Поскольку на западном борту разломы сжатия падают в противоположном направлении, желоб следует считать структурой сжатия типа рампового грабена, точнее полу-грабена – с учетом его широтной асимметрии.

Утонение аккреционной призмы к западу от 4 км до 100–150 м и менее под шарьяжем с учетом данных бурения вызвано сдиранием и скучиванием кайнозойского чехла при его движении, 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 (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 неоген-раннечетвертичных фанов (конусы выноса) каньонов и их долин на ложе северо-западной части Тихого океана (СЗ Тихого океана [Ломтев, 2010]), формирующихся придонными турбидитными потоками [Ломтев и др., 1997, 2004; Патрикеев, 2009; Mammerickx, 1980], надежно фиксирует среднечетвертичное (~0.5–1.0 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-

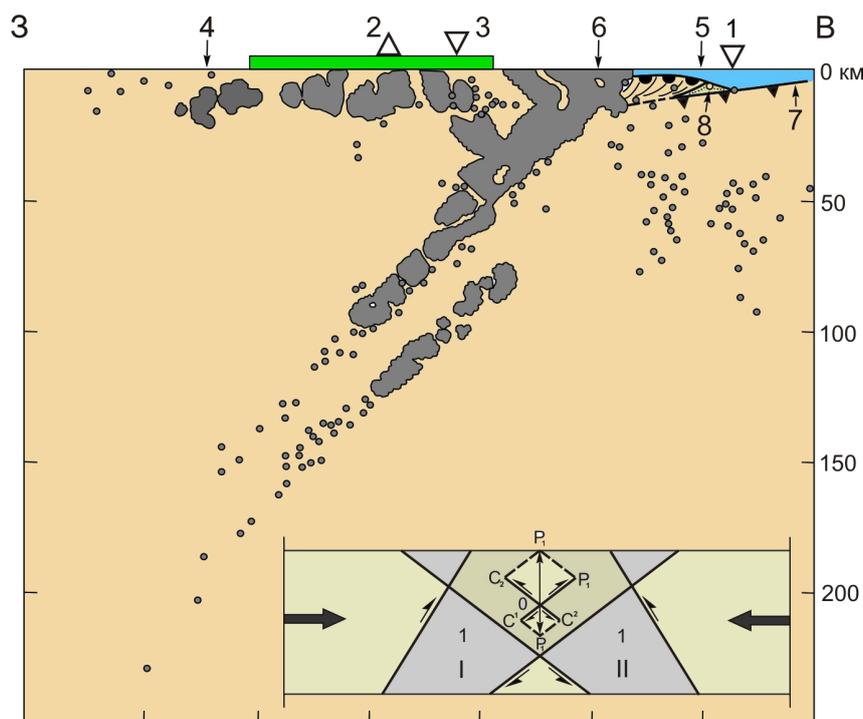


Рис. 4. Совмещенный широтный разрез встречных фокальных зон и профиля МОВ-ОГТ JNOC2 [Ломтев, Патрикеев, 1985]. 1 – фронт аккреции в основании тихоокеанского склона дуги Хонсю; 2 – вулканический фронт; 3 – асейсмичный фронт; 4 – основание япономорского склона дуги Хонсю; 5 – фронт шарьяжа Ойасио; 6 – корень шарьяжа и положение теплового минимума; 7 – кровля подвижного автохтона (слой 2); 8 – аккреционная призма. Черные точки и их рои – землетрясения 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 коромантийный субстрат. На врезке – комбинированная надвиговая модель очага землетрясения фокального ромба: О – очаг, C_1C^1 , C_2C^2 – надвиговые составляющие комбинированной подвижки, ориентированные вдоль зон Беньофа (I) и Тараканова (II); OP_1, OP_2 – результирующие подвижки. Тонкими стрелками показаны смещения в очагах землетрясений верхних плоскостей (1) встречных фокальных зон по данным [Hasegawa et al., 1979], жирными – региональное боковое сжатие в коре и подстилающей верхней мантии.

Fig. 4. The combined latitudinal profile of the opposing focal zones and CDP profile JNOC2 [Ломтев, Патрикеев, 1985]. 1 – accretion front at the base of the Pacific slope of the Honshu Arc; 2 – volcanic front; 3 – aseismic front; 4 – the base of the Japan sea slope of the Honshu Arc; 5 – front of the Oyashio nappe; 6 – position of the nappe root and heat minimum; 7 – top of the mobile autochthon (Layer 2); 8 – accretion prism. Black dots and their clusters show earthquakes in the Benioff and Tarakanov zones and the area of shallow (crustal) seismicity under the Honshu Arc and the adjacent basin of the Sea of Japan. Colours show the accretion prism, the Japan Trench, the Honshu Arc with the Oyashio nappe at front and the underlying crust-mantle substratum. The insert shows the proposed combined thrust model of the earthquake focus in the focal rhombus [Ломтев, Патрикеев, 1983б, 1985]: O – earthquake focus; C_1C^1 , C_2C^2 – thrust components; OP_1, OP_2 – resulting displacement. Thin arrows show displacement along the upper planes (1) of the opposing Benioff (I) and Tarakanov focal zones (II), according to [Hasegawa et al., 1979]. Thick arrows show regional compression of the crust and the underlying mantle.

вами Хонсю и Хоккайдо, имеет за желобом долину Накве протяженностью более 1100 км и крупный фанк югу от уступа разлома Тускарора [Ломтев и др., 1997, 2004]. Снос терригенных осадков с островных дуг и восточной окраины Азии по данным бурения датируют средним миоценом, в грабенах – возможно, и ранним миоценом [Ломтев и др., 1997, 2004]. Таким образом, с учетом данных [Геологическое развитие..., 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 investigations..., 1978; Ломтев, 2000], который бы компенсировал тектоническое сдвигание коры по шарьяжу Ойасио, указывает на ее аллохтонное залегание, а следовательно, тектоническую подвижность.

3. СИЛЬНЕЙШИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПРОШЛОГО В ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ МЕГАСОБЫТИЯ

Согласно [Usami, 1979] историческими землетрясениями в Японии считаются сейсмические события, произошедшие до 1872 г. В 1873 г. в Японии был введен григорианский календарь, сменивший японский

Таблица 1. Перечень землетрясений с $M \geq 7.6$ в пределах участка Японской сейсмоактивной зоны с координатами $\varphi=35.0-40.0^\circ$ с.ш. и $\lambda=141.0-145.0^\circ$ в.д за 869–2010 гг. по данным [Usami, 1979]Table 1. Earthquakes with $M \geq 7.6$ within the area of the Japan seismically active zone from 869 through 2010, according to [Usami, 1979]. Coordinates of the area: $\varphi=35.0-40.0^\circ$ north latitude, $\lambda=141.0-145.0^\circ$ east longitude.

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

Примечание. * – время по Гринвичу; ** – данные службы NEIC/USGS.

Note. * – Greenwich time; ** – NEIC/USGS data.

лунный календарь, а для регистрации землетрясений впервые стали применяться сейсмографы. Основным первоисточником сведений о более чем 6000 исторических землетрясений Японии являются труды К. Муся, изданные на японском языке [Musya, 1942, 1949]. Для европейцев доступнее работа [Usami, 1979] на английском языке с каталогом исторических ($M \geq 5.9$) и инструментально зарегистрированных землетрясений за период с 599 по 1975 гг.

Большое число сильных землетрясений, известных на территории и вокруг Японских о-вов, вынуждает нас ограничиться небольшой площадью размером $5 \times 4^\circ$, содержащей эпицентральную область изучаемого землетрясения (см. рис. 1). Координаты этой области таковы: $\varphi=35.0-40.0^\circ$ с.ш. и $\lambda=141.0-145.0^\circ$ в.д. Согласно каталогу [Usami, 1979] только на этом участке сейсмоактивной зоны с 869 г. было зафиксировано 10 событий с $M \geq 7.6$ (табл. 1).

Судя по табл. 1, самым сильным землетрясением прошлого в районе нынешнего мегаземлетрясения было событие 869 г. с $M=8.6$. После этого землетрясения возникла пауза, и в течение 742 лет событий с $M \geq 7.6$ не наблюдалось. Достоверная причина паузы неизвестна. 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.

4. СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ИЗУЧАЕМОГО РАЙОНА

Тихоокеанская окраина СВ Хонсю относится к активным областям благодаря своей сейсмичности. Повышение точности (до 1–2 км) определения гипоцен-

тров 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° (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]. В 1978 г. П.Н. Кропоткин предложил назвать ее зоной Тараканова [Кропоткин, 1978]. Выход этой зоны на тихоокеанском побережье Хонсю с 1975 г. называют асейсмичным фронтом [Yoshii, 1975]. В очагах на выходе этой зоны, т.е. под шельфом, между верхним склоном и террасой, доминируют надвиги, ориентированные по ее падению [Hasegawa et al., 1979].

Судя по географии и глубине главного толчка упомянутого катастрофического землетрясения 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]), а также встречной зоны Тараканова и нижней плоскости зоны Беньофа в области их пересечения (восточная часть фокального ромба [Ломтев, Патрикеев, 1985]. Заметим, что сейсмичность внешнего склона Японского желоба и краевого вала, в частно-

Таблица 2. Каталог землетрясений района Японии (восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю) с $M \geq 7.6$ за 1900–2010 гг. по данным [Usami, 1979; JMA Earthquake Catalog..., 2011].Table 2. Data on earthquakes with $M \geq 7.6$ which occurred eastward of Hokkaido and Honshu Islands from 1900 through 2010, according to [Usami, 1979; JMA Earthquake Catalog..., 2011].

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

сти 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 (верхняя плоскость) и Тараканова (верхняя плоскость?) пересекаются под средней частью тихоокеанского склона дуги Хонсю [Ломтев, Патрикеев, 1983б, 1985], поэтому в соответствии с правилом параллелограмма в его очагах возможны комбинированные подвижки верхней террасы типа клиновидных взбросов, способных возбуждать волны цунами по схеме поршневого механизма, включая и последние катастрофические события в марте 2011 г. (врезка к рис. 4).

На рис. 4 также 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 асейсмичной литосферной мантии (пластовый срыв) с зоной обратного сползания вдоль япономорской континентальной окраины Хонсю.

С учетом малых глубины 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.

Итак, в строении и сейсмотектонике тихоокеанской активной окраины СВ Хонсю ключевыми элементами являются фокальный ромб, образованный встречными глубинными надвигами зон Беньофа и Тараканова, мо-

лодой 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 ($M \geq 7.6$), которые наблюдались за 1900–2010 гг. восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю (табл. 2). Очаговые области этих землетрясений изображены на рис. 5, а.

Как видно из рис. 5, а, фактически все сильнейшие землетрясения происходили севернее 39-й параллели, 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-й параллели находилась обширная область относительного покоя (сейсмическая брешь) 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. Как видно из 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.

5. ГЛАВНЫЙ ТОЛЧОК И ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА

По оперативным данным NEIC/USGS (Национальный центр информации о землетрясениях Геологиче-

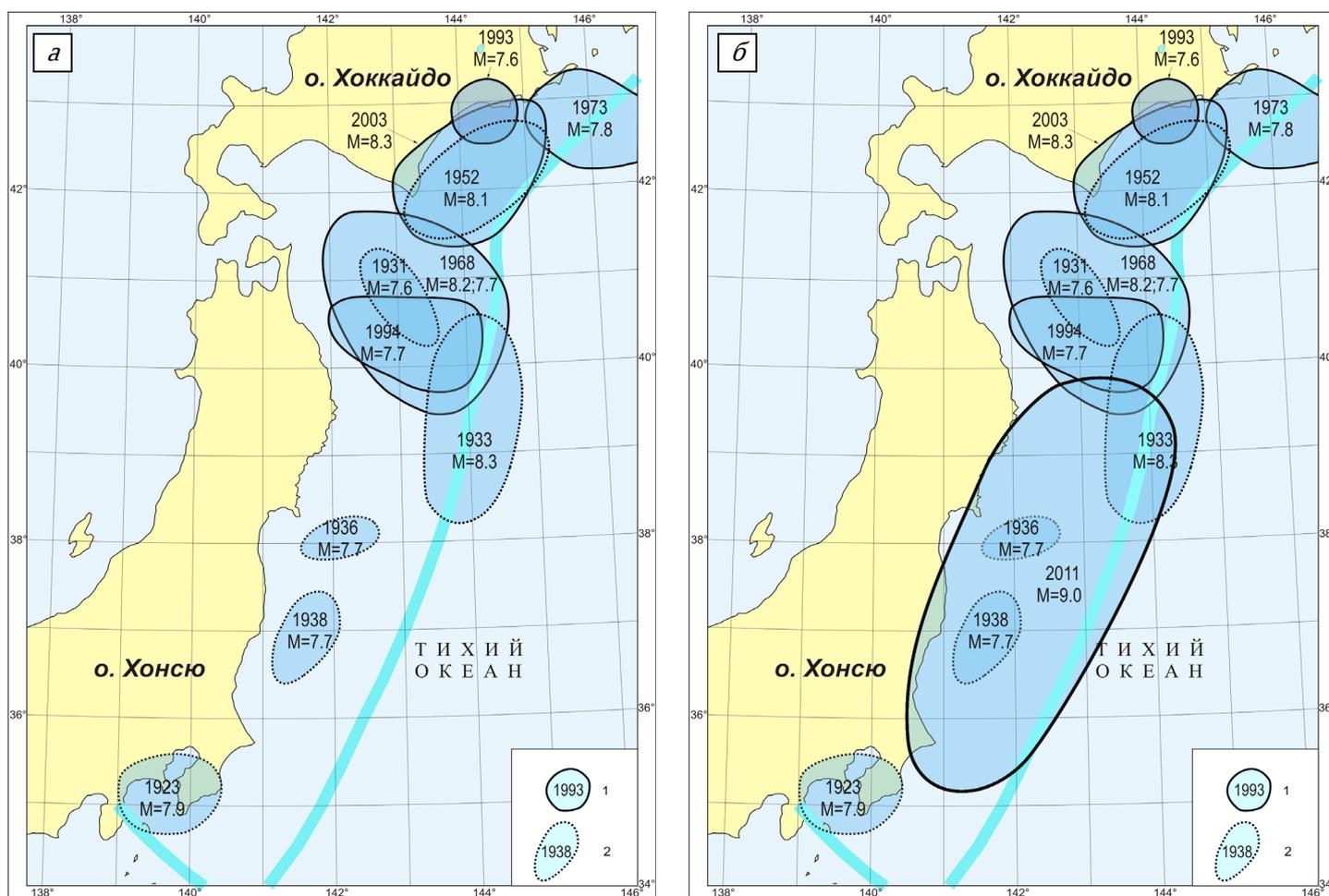


Рис. 5. Очаговые области сильнейших ($M \geq 7.6$) землетрясений в районе востоке о-вов Хоккайдо и Хонсю за периоды 1900–2010 гг. (а) и 1900 – март 2011 гг. (б). 1 – очаговые области, оконтуренные по данным об афтершоках первых суток; 2 – границы очаговых областей, проведенные с меньшей точностью. Данный рисунок иллюстрирует заполнение сейсмической бреши, расположенной южнее 39° с.ш. и существовавшей до 2011 г., афтершоками японского мегаземлетрясения 11 марта 2011 г.

Fig. 5. Focal areas of the strongest ($M \geq 7.6$) earthquakes which occurred eastward of the Hokkaido and Honshu Islands in the periods from 1900 through 2010 (a) and from 1900 through March 2011 (b). 1 – focal areas determined from aftershock data within the first 24 hours; 2 – less precise boundaries of focal areas. This figure illustrates «infill» of the seismic gap located southward of 39° north latitude that was occupied by aftershocks of the Great Japan earthquake of March 11, 2011.

ской службы США) его гипоцентр находился восточнее о-ва Хонсю в точке с координатами: $\varphi=38.32^\circ$ с.ш., $\lambda=142.35^\circ$ в.д. на глубине $h=32$ 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 [The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project]. Согласно этим определениям, азимут простирания первой нодальной плоскости составил 162° , угол падения – 17° , угол скольжения – 45° . Для второй нодальной плоскости эти параметры оказались следующими: 28° , 78° , 102° . 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, максимальное горизонтальное смещение в направлении Тихого океана составило более 4 м (рис. 6).

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 Японского метеорологического агентства (JMA) зашкалили либо вышли из строя. По данным

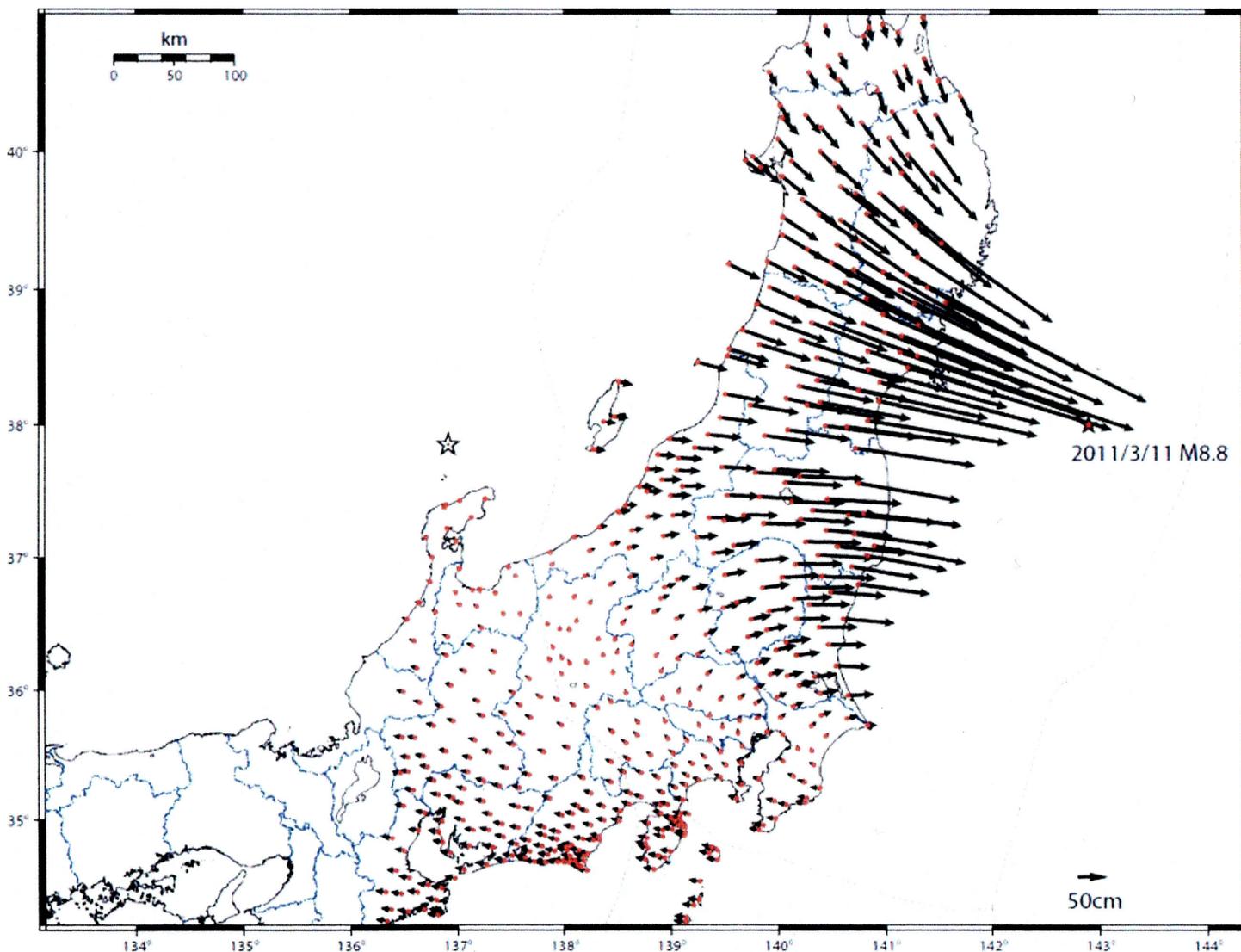


Рис. 6. Карта-схема coseismicных смещений пунктов GPS-наблюдений, расположенных на острове Хонсю, в результате Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г. Данная карта-схема любезно предоставлена сахалинским сейсмологом сотрудником Института сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета (г. Саппоро, Япония) Х. Такахашии (H. Takahashi).

Fig. 6. The schematic map of coseismic displacements of GPS observation points on the Honshu Island as a result of the Great Japan earthquake of March 11, 2011. This schematic map was kindly provided by Hiroaki Takahashi, Researcher of the Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Sapporo, Japan.

NEIC/USGS, за первые сутки после мегаземлетрясения было зарегистрировано около 160 толчков с магнитудами от 4.6 до 7.1 (из них 22 толчка с $M \geq 6.0$; см. рис. 1). Афтершоковый процесс развивался с севера на юг в направлении г. Токио. Магнитуда сильнейшего афтершока, возникшего спустя ~30 минут после главного толчка, составила 7.9, после чего произошел еще один сильный толчок с $M=7.7$. Еще одно событие с $M=7.1$ было зарегистрировано на 28-е сутки после главного толчка. Отметим, что значение $M=7.7$ не было превышено в течение 32 суток наблюдений, имевшихся в нашем распоряжении на момент подготовки статьи.

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 $N=86$ (при одном толчке с $M=6.0$). В течение месяца интенсивность афтершокового процесса постепенно снижалась и достигла ~6–8 событий ($M \geq 4.6$) в сутки. На момент подготовки статьи, т.е. к 12 апреля, было зарегистрировано 940 афтершоков с $M \geq 4.6$ (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

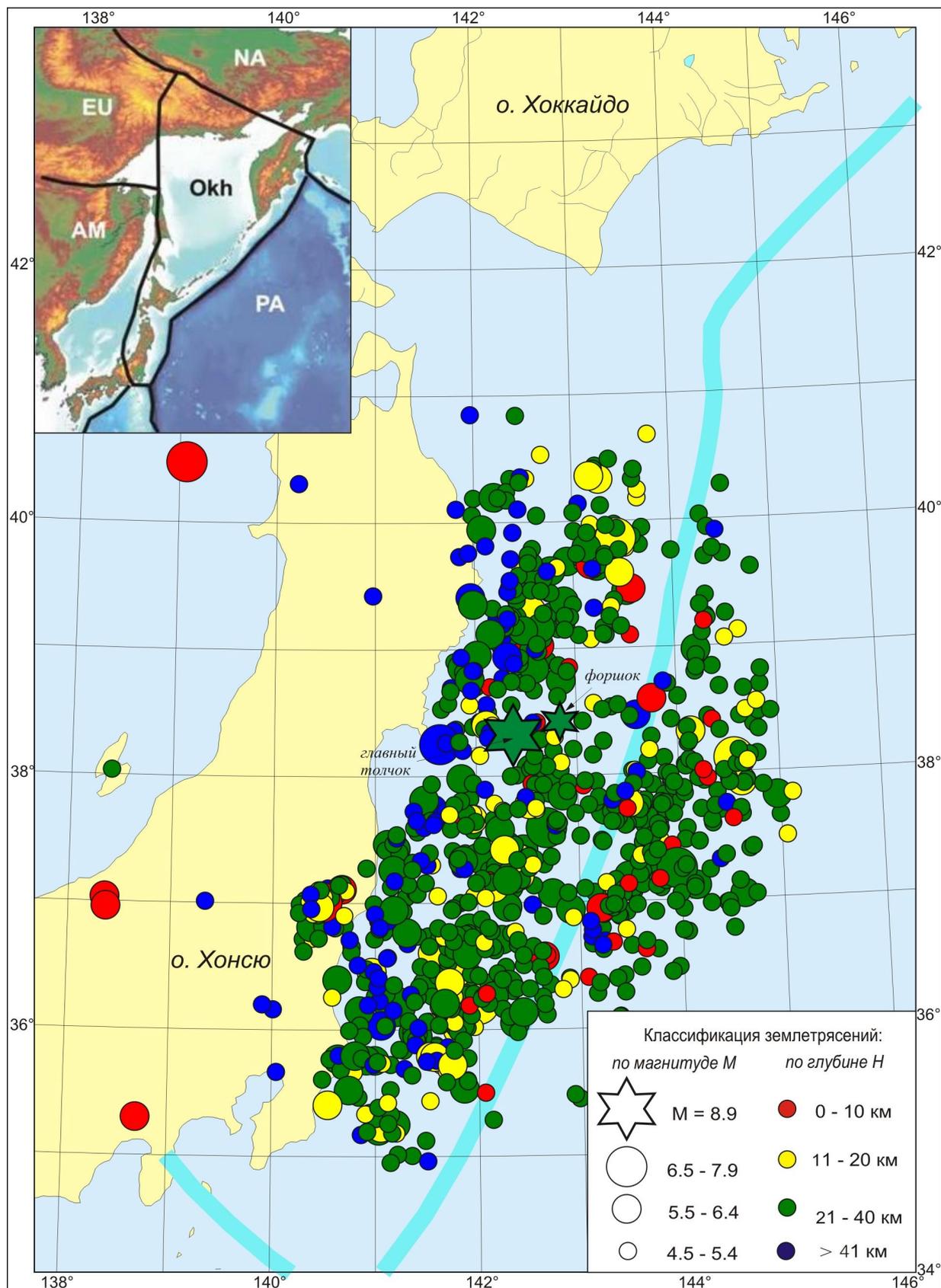


Рис. 7. Положение эпицентра главного толчка землетрясения 11.03.2011 г., его форшока и афтершоков, зарегистрированных в течение 32 суток по данным оперативного каталога NEIC/USGS. Обозначения см. на рис. 1.

Fig. 7. March 11, 2011 main shock epicentre, its foreshock and aftershocks according to seismic monitoring during 32 days, as per NEIS/USGS Catalog. See the legend in Figure 1.

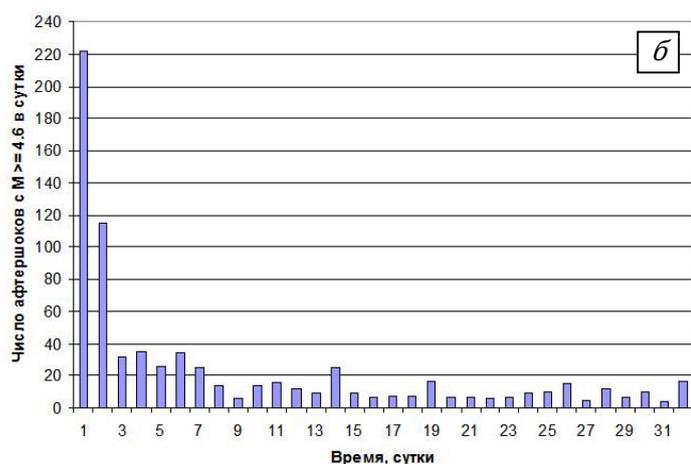
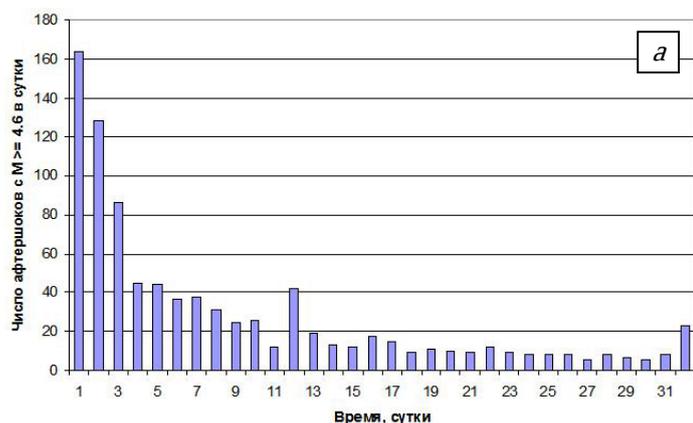


Рис. 8. Гистограммы, характеризующие затухание афтершоковых последовательностей ($M \geq 4.6$) двух мегасобытий: Великого японского 11.03.2011 г. (а) и Суматра-Андаманского 26.12.2004 г. (б).

Fig. 8. Histograms showing attenuation of aftershock sequences of two mega-events, the Great Japan earthquake of March 11, 2011 (a) and the Sumatra-Andaman earthquake of 26 December, 2004 (b).

желоба и даже за ним.

Общий характер затухания афтершоковой последовательности показан в виде гистограммы на рис. 8. Для сравнения приведен также аналогичный график для Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. с $M_w=9.3$. Из рис. 8 видно, что ход сейсмического процесса по параметру N для этих мегасобытий примерно подобен за исключением первых суток. И даже некоторые всплески сейсмической активности, характеризующиеся ростом числа событий, происходили близко по времени (на 12 и 14-е сутки, 32 и 32-е сутки, соответственно).

Различие по силе между главным событием и сильнейшим за 32 суток афтершоком составляет примерно единицу магнитуды (или 30-кратное по энергии). Возникает принципиально важный вопрос: возможен ли при японском землетрясении более сильный афтер-

шок, чем те два с $M=7.9$ и 7.7 , которые уже наблюдались спустя ~ 30 и ~ 40 минут после главного толчка? В случае Суматра-Андаманского землетрясения ответ известен – спустя три месяца после главного удара возник афтершок с $M=8.6$ [Кособоков, 2005].

Из двух альтернативных точек зрения (вероятно, маловероятно) мы отдаем предпочтение первой, согласно которой в районе СВ Хонсю вероятно еще одно разрушительное землетрясение с $M=8.0 \pm 0.5$. Впервые это мнение было высказано в работе [Тихонов, 2011] по истечении 13 суток с момента главного события. На чем основано такое мнение? На аналогии протекания афтершокового процесса после японского мегасобытия с процессом после Суматра-Андаманского землетрясения. Однако, если исходить из закономерности, установленной М. Ботом [Bath, 1965] для разности магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока, которая оценивается в 1.2 единицы магнитуды, то сильнейший толчок уже, возможно, состоялся.

Различие в магнитудах главного события и сильнейшего за 32 суток афтершока в 1.1 единицы магнитуды – почти типичный случай для сильнейших японских землетрясений изучаемого района (табл. 3). В этой таблице представлены 14 пар событий (сильнейший главный толчок – сильный афтершок) в изучаемом районе за 1900–2010 гг. по данным агентства JMA. Наибольшее значение $M_{гл}-M_{афт}=1.8$, приведенное в табл. 3, соответствует паре событий, произошедших 21 декабря 1946 г. Однако этой оценке присуща некоторая неопределенность. Дело в том, что моменту времени 04 час 19 мин 21.12.1946 г. отвечают два сильнейших ($M=8.0, 8.1$) землетрясения в каталоге JMA. Спустя 3 час 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 ± 0.44 . Следовательно, закономерность М. Бота для японских землетрясений выполняется даже с некоторым запасом (0.3 единицы магнитуды).

Несмотря на это, предположить еще один сильнейший афтершок нас вынуждает аналогия хода афтершокового процесса, протекающего в настоящее время восточнее о-ва Хонсю, с афтершоковой серией Суматра-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 г. ($M_w=9.3$). Для описания афтершоков этого мегасобытия воспользуемся также сведениями службы NEIC/USGS. В течение первых суток после главного толчка было зарегистрировано около 220 повторных землетрясений с $M \geq 4.6$, а спустя 32 суток – 750, то есть количество, вполне сопоставимое с японской серией. Сильнейший афтершок имел магнитуду $M=7.5$. Он возник спустя 3 час 22 мин после главного удара. Таким образом, ход сейсмического процесса по параметру N для этих мегасобытий подобен. Также сопоста-

Т а б л и ц а 3. Пары землетрясений (сильнейший главный толчок – сильный афтершок) в регионе Японии за 1900–2010 гг. по данным агентства JMA

Table 3. Earthquake doublets (strong main shock with strong aftershock) in Japan from 1900 through 2010, according to data from Japan Meteorological Agency

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

П р и м е ч а н и е. Для землетрясений 1968–2003 гг. приведена моментная магнитуда M_w согласно [Kanamori, 1983].

N o t e. Moment magnitude M_w data for earthquakes from 1968 through 2003 are according to [Kanamori, 1983].

вимы магнитуды сильнейших толчков и время их появления.

Прежде чем использовать упомянутую аналогию, рассмотрим временной ход афтершоковой последовательности Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. Количественные оценки, полученные на разных стадиях развития этой последовательности, можно использовать далее как опорные значения при анализе афтершоковой серии Великого японского землетрясения 2011 г. [Родкин, Тихонов, 2011].

На рис. 9 показана зависимость интервалов времени между афтершоками Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. от номеров повторных толчков с $M \geq 4.6$. График разбит на пять интервалов, соответствующих разным стадиям афтершокового процесса. Первый интервал длительностью двое суток – область наиболее интенсивной афтершоковой деятельности. Толчки следуют друг за другом с частотой более двух событий в час. Второй интервал – область, в которой запаздывание одного события относительно другого

может составлять несколько часов. На этой стадии появляется возможность прогноза эпизодов усиления сейсмической активности, связанных с возникновением повторных землетрясений с магнитудами около 6–7. Большая частота следования афтершоков в пределах третьего интервала связана с роевой активностью, сосредоточенной вблизи точки с координатами 7.90 N, 94.0 E. Такая ситуация имела место для Андаманского землетрясения с 28 по 30 января 2005 г. Четвертый интервал наиболее важен для прогноза сильнейшего афтершока. Он отвечает стадии, на которой временные промежутки между последовательными афтершоками варьируются в широком диапазоне – от долей часов до суток и более. Начало этой стадии для Андаманского землетрясения приходится примерно на 35-й день афтершоковой последовательности, а окончание – на 92-й день последовательности, когда реализовался сильнейший афтершок с $M=8.6$.

Отметим особенности, присущие 4-му интервалу, которые могут иметь значение в плане прогноза силь-

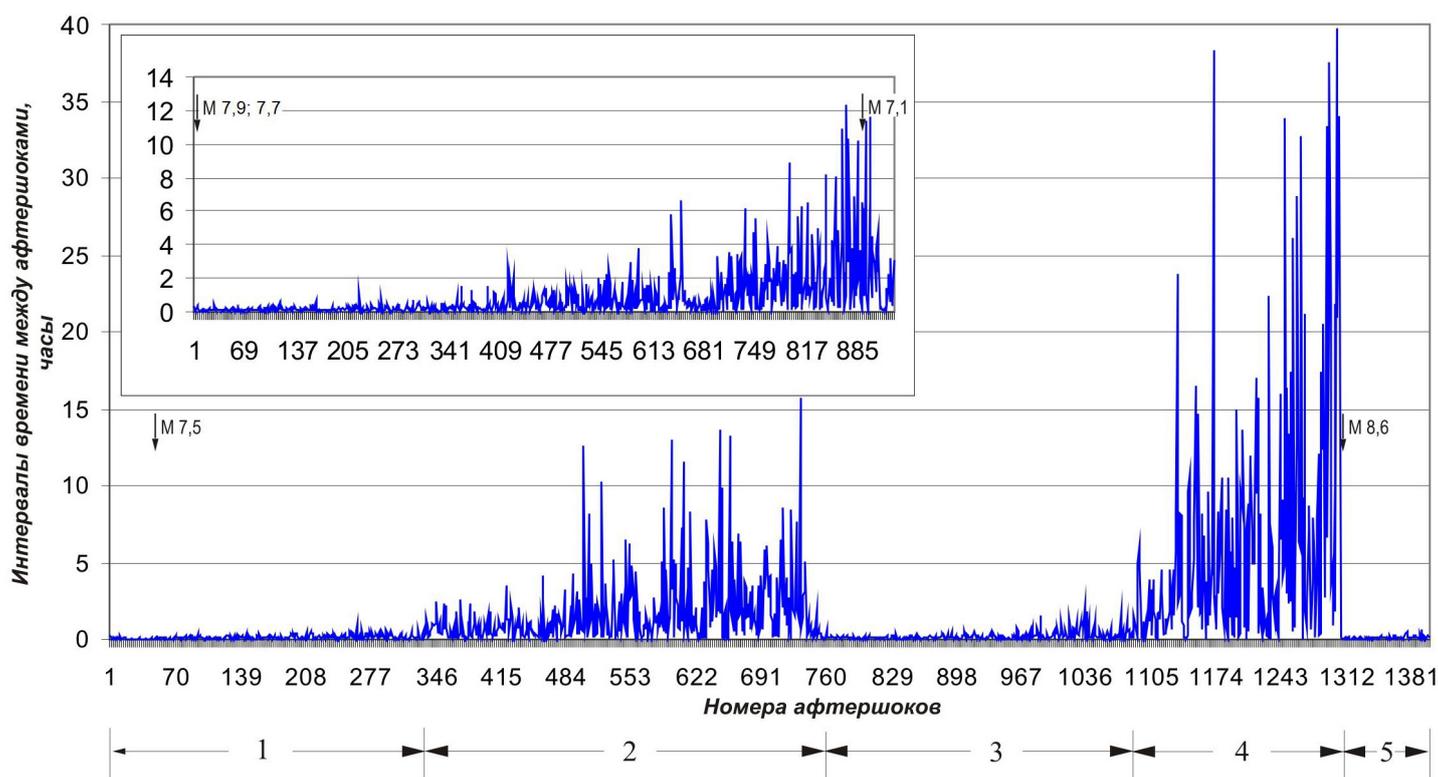


Рис. 9. Зависимость интервалов времени между афтершоками ($M \geq 4.6$) Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. от номеров повторных толчков и аналогичная зависимость для Великого японского землетрясения 2011 г. по наблюдениям за 32 суток (врезка). Область основного графика по горизонтальной оси разбита на 5 частей, соответствующих отдельным стадиям афтершокового процесса. Вертикальными стрелками отмечены афтершоки с $M \geq 7.0$.

Fig. 9. A temporal relation between aftershocks ($M \geq 4.6$) of the Sumatra-Andaman earthquake (2004) and the numbers of aftershocks. The insert shows a similar relation for the Great Japan earthquake, according to seismic monitoring during 32 days. The section of the main diagram along the horizontal axis is divided into 5 sub-sections which correspond to stages of the aftershock process. Vertical arrows show aftershocks with $M \geq 7.0$.

нейшего афтершока, когда построения и анализ зависимости, подобной обсуждаемой, ведутся в реальном времени. Первая особенность – резкое торможение скорости потока событий при переходе от 3-го интервала к 4-му. Вторая – резкое возрастание изменчивости характера афтершокового процесса, выражающееся в большом разбросе отсчетов на рис. 9, в том числе в наличии аномальных выбросов. Столь разнообразное поведение афтершокового процесса может указывать на его неустойчивость.

Пятый интервал афтершоковой последовательности Андаманского землетрясения отвечает наложению афтершоков главного события и сильнейшего афтершока, что снова привело к резкому возрастанию интенсивности афтершокового процесса.

Прежде чем перейти к анализу аналогичного графика для Великого японского землетрясения 11.03.2011 г., заметим, что его афтершоковая серия может иметь другое число стадий развития и другую длительность каждой из них. После одного месяца наблюдений афтершоковый процесс проходит, вероятно, вторую стадию (врезка на рис. 9), на которой появля-

ется возможность прогноза (после резких выбросов на графике) усиления активности за счет землетрясений с магнитудой около 6–7. Чтобы уточнить вероятный сценарий, необходимо постоянно отслеживать процесс во времени, близком к реальному. Для этих целей в случае мегаземлетрясений, по-видимому, вполне годится постоянно пополняемый Оперативный каталог службы NEIC/USGS на сайте <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>.

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. ($M_w=8.1$) [Tikhonov et al., 2008].

На рис. 1 и 7 можно увидеть, что область афтершоков заполнялась в течение 32 суток неравномерно. В ее пределах можно выделить основную область концентрации афтершоков, которая примыкает к острову, и вторичную область, расположенную севернее

37.0° с.ш. за глубоководным желобом, который служит в качестве разделяющей границы. Эта пространственная особенность поля афтершоков отмечалась ранее в работе [Тихонов, 2011] для интервала регистрации 13 суток.

При Симуширском землетрясении 2006 г. также наблюдалось две зоны афтершоков: одна вблизи о-ва Симушир, а вторая – в районе Курильского желоба. И второе землетрясение с магнитудой 8.1 произошло именно в этой области. При этом афтершоки первого землетрясения четко наметили линейно вытянутую область в районе желоба (выход нижней плоскости зоны Беньофа и ее пересечение с зоной Тараканова в восточной части фокального ромба), где спустя два месяца случилось второе событие. Таким образом, не исключается возможность повторения такого же сценария, как на Средних Курильских о-вах. Дальнейшее пополнение данных об афтершоковой последовательности Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г. позволит либо утвердиться в этом предположении, либо отказаться от него.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. ($M_w=9.0$) является уникальным событием для региона. Оно, вероятно, связано с глубинным надвигом по зоне Беньофа и его структурным козырьком – шарьяжем Ойасио в средней части тихоокеанского склона. Данные каталогов исторических землетрясений свидетельствуют, что землетрясений такого масштаба здесь не отмечалось на протяжении более 1000 лет. Опровергнута точка зрения о невозможности возникновения мегаземлетрясений в данном регионе из-за раздробленности литосферы на отдельные структурные блоки с характерным линейным размером ~150 км.

Дана оценка периода повторяемости сильнейших землетрясений ($M \geq 7.6$) в эпицентральной области мегасобытия размером $5^\circ \times 4^\circ$ (~40 лет). В районе восточнее острова Хонсю ретроспективно установлено существование сейсмической бреши протяженностью ~800 км, расположенной южнее 39° с.ш. и заполненной афтершоками мегаземлетрясения 11.03.2011 г.

На 12 апреля 2011 г. со времени Великого землетрясения наблюдались два сильнейших афтершока ($M=7.9$ и 7.7). Среднее значение разности между главным толчком и сильнейшим афтершоком для Японии составляет 0.90 ± 0.44 единицы магнитуды. Это, по-видимому, указывает на то, что афтершок с максимальной магнитудой уже реализовался.

Однако значительная аналогия в динамике затухания во времени афтершоковых серий Великого японского (2011 г., $M_w=9.0$) и Суматра-Андаманского (2004 г., $M_w=9.3$) землетрясений позволяет высказать предположение о возможности реализации афтершока с $M \sim 8.0$. Существует и другая аналогия в простран-

венном распределении эпицентров афтершоков для японского мегасобытия и Симуширского (2006 г., $M_w=8.3$) землетрясения. Эта аналогия дает основание ожидать, что если афтершок с $M \sim 8.0$ состоится, то он, вероятно, будет смещен относительно основного толчка в сторону глубоководного желоба.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Европейского гранта FP7 № 262005 SEMEP.

8. ЛИТЕРАТУРА

- Антипов М.П., Кара В.И., Шлезингер А.Е. Тектоническая природа комплексов пород Японского желоба // Доклады АН СССР. 1981. Т. 260. №1. С. 406–409.
- Белостоцкий И.И. Строение и формирование тектонических покровов. М.: Недра, 1978. 238 с.
- 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.
- Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы // Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. М.: ГЕОС, 2005. Ч. I. 179 с. (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. Новые данные о строении котловины и трога Уллындо (Японское море) // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах Северо-Западной окраины Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. Т. 2. С. 54–74.
- Ломтев В.Л. К строению ложа Северо-Западной Пацифики // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1(16). С. 21–32.
- Ломтев В.Л., Никифоров С.П., Ким Ч.У. Тектонические аспекты коровой сейсмичности Сахалина // Вестник ДВО РАН. 2007. № 4. С. 64–71.
- 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. Сейсмостратиграфия 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.А., 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.

- Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии.* М.: Недра, 1984. 312 с.
- Могн К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Патрикеев В.Н.* Атлас сейсмических разрезов Северо-Западной плиты Тихого океана. М.: ГЕОС, 2009. 208 с.
- Родкин М.В., Тихонов И.Н.* Мега-землетрясение 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.* О вероятном сценарии развития афтершокового процесса после землетрясения 11 марта 2011 года в Японии // Вестник ОНЗ РАН. 2011. Т. 3. NZ3001. doi:10.2205/2011NZ000102.
- Уэда С.* Окраины глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана // Геология континентальных окраин. М.: Мир, 1978. Т. 2. С. 170–191.
- Шики Ц., Мисава Ю.* Геологическое строение и тектоника внутренних склонов Нанкайского трога и Японского желоба // Геотектоника. 1980. № 6. С. 98–109.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2. № 6. P. 483–514. doi:10.1016/0040-1951(65)90003-X.
- Choi D.R.* Continental crust under the NW Pacific ocean // Journal of Petroleum Geology. 1987. V. 10. № 4. P. 425–440. doi:10.1111/j.1747-5457.1987.tb00583.x.
- Geological investigations in the northern margin of Okinawa Trough and western margin of Japan sea.* Tokyo: Geological Survey of Japan, 1978. № 10. 80 p.
- Hasegawa A., Umino T., Takagi A., Suzuki Z.* Double-planned deep seismic zone and anomalous structure in the upper mantle beneath Northeastern Honshu (Japan) // Tectonophysics. 1979. V. 57. № 1. P. 1–6. doi:10.1016/0040-1951(79)90098-2.
- Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project.* Vol. 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).
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // Tectonophysics. 1983. V. 93. № 3–4. P. 185–199. doi:10.1016/0040-1951(83)90273-1.
- Mammerickx J.* A deep-sea channel in the Northwest Pacific basin // Marine Geology. 1980. V. 34. № 3–4. P. 207–218. doi:10.1016/0025-3227(80)90072-9.
- Matsuzawa A., Tamano T., Aoki Y., Ikawa T.* Structure of the Japan trench subduction zone from multi-channel seismic-reflection records // Marine Geology. 1980. V. 35. № 1–3. P. 171–182. doi:10.1016/0025-3227(80)90029-8.
- Musya K.* Materials for the history of Japanese Earthquakes. Revised ed. V. 1–3. Shinsai Yobo Hyogikai. 1942–43 (in Japanese).
- Musya K.* Materials for the history of Japanese Earthquakes. Mainichi Press. 1949 (in Japanese).
- The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project* <http://www.globalcmt.org>.
- Tikhonov I.N., Vasilenko N.F., Zolotukhin D.E., Ivelskaya T.N., Poplavsky A.A., Prytkov A.S., Spirin A.I.* Simushir earthquakes and tsunami of November 15, 2006, and January 13, 2007 // Russian Journal of Pacific Geology. 2008. V. 2. № 1. P. 1–14. doi:10.1134/S1819714008010016.
- Usami T.* Study of historical Earthquakes in Japan // Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo. 1979. V. 54. № 3. P. 399–439.
- 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» // Journal of Seismological Society of Japan. 1975. V. 28. № 3. P. 365–367.



Тихонов Иван Николаевич, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией сейсмологии Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия
Тел.: (4242)791692 (служебный), (4242)796558 (домашний); факс: (4242)791517; ✉ e-mail: tikhonov@imgg.ru

Tikhonov, Ivan N., Doctor of Physics and Mathematics, Head of Seismology Laboratory Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauka street, 1B, Russia
Tel.: (4242)791692 (office), (4242)796558 (home); fax: (4242)791517; ✉ e-mail: tikhonov@imgg.ru



Ломтев Владимир Леонидович, канд. геол.-мин. наук., в.н.с. лаб. сейсмики и морской акустики Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия
Тел.: (4242)791690 (вахта ИМГиГ) доб. 323; e-mail: lomtev@imgg.ru

Lomtev, Vladimir L., Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher, Lab. of Seismics and Marine Acoustics Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauka street, 1B, Russia
Tel.: (4242)791690 (IMGiG), ext. 323; e-mail: lomtev@imgg.ru