

УДК 550.343

## МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ЯПОНИИ 11 МАРТА 2011 г.: ВЕЛИЧИНА СОБЫТИЯ И ХАРАКТЕР АФТЕРШОКОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

© 2011 г. М.В. Родкин<sup>1,2</sup>, И.Н. Тихонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. относится к мегасобытиям. Обсуждаются условия реализации таких сейсмических катастроф. Режим афтершоков мегасобытия сопоставляется с данными по афтершоковым последовательностям Симуширских (2006, 2007 гг.) и Андаманского (2004 г.) землетрясений и с поведением сейсмичности в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Показано, что афтершоковые последовательности указанных сильных землетрясений представляют собой совокупность трендовых изменений постшоковой активности и набора специфических всплесков сейсмической активности. Всплески активности характеризуются не только ростом числа и энергии событий, но и уменьшением значений наклона графика повторяемости (*b*-value) и средней глубины землетрясений. Некоторые из таких всплесков соответствуют реализации сильных повторных толчков. Предлагается возможный механизм возникновения всплесков сейсмической активности. Обсуждается возможность возникновения более сильного повторного толчка в окрестности мегаземлетрясения 11 марта 2011 г.

*Ключевые слова:* землетрясение, мегаземлетрясение, главный толчок, афтершоковые последовательности, сильнейший афтершок, график повторяемости, максимально возможная магнитуда.

### Введение

9 марта 2011 г. в 02 ч 45 мин по Гринвичу восточнее о-ва Хонсю (Япония) на глубине  $H=32.0$  км произошло сильное землетрясение магнитудой  $M=7.2$ . Координаты его эпицентра составили  $38.42^\circ$  с.ш. и  $142.84^\circ$  в.д. (здесь и далее используются данные Оперативного каталога Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США – NEIC/USGS). Затем, как обычно, пошел афтершоковый процесс, и в течение двух суток «высыпали» более 30 афтершоков с  $M\sim 5\text{--}6$ . Такое случалось редко и раньше, поэтому вряд ли кто из сейсмологов предположил, что это только

увертюра к грандиозной катастрофе, последовавшей примерно в том же месте спустя двое суток.

Мегаземлетрясение с моментной магнитудой  $M_w=9.0$  произошло 11 марта 2011 г. в 05 ч 46 мин по Гринвичу (местное время – 14 ч 46 мин) восточнее о-ва Хонсю. Японское метеорологическое агентство (JMA) присвоило этому землетрясению название – The Northeastern Taiheiyou Earthquake. Оно относится к классу мегасобытий, т.е. землетрясений планетарного масштаба. По сообщениям в прессе, в результате этой катастрофы произошел сдвиг земной оси, по разным оценкам, от 10 до 25 см. А по данным GPS-наблюдений участок о-ва Хонсю напротив эпицентра события сдвинулся примерно на 2.5 м в сторону Тихого океана. Осложненное разрушительными волнами цунами и техногенными катастрофами на АЭС, происшедшее землетрясение стало трагедией общенационального масштаба.

Число погибших и пропавших без вести, по официальным сообщениям, составило более 26 тыс. человек. Суммарный экономический ущерб оценен правительством Японии более чем в 300 млрд долл. США, при этом такого рода оценки имеют тенденцию существенно возрастать со временем. Уже сейчас ясно, что основной ущерб (человеческие жертвы и материальные потери) от двух стихийных бедствий (землетрясения и цунами) обусловлен воздействием цунами. При этом ущерб от вызванной цунами техногенной катастрофы на АЭС «Фукусима-1» в настоящий момент определить затруднительно, ситуация на АЭС продолжает оставаться напряженной, и способы компенсации причиненного ущерба не ясны.

После возникновения таких разрушительных катастроф у ученых-сейсмологов в первую очередь возникают вопросы, в какой мере катастрофа такого масштаба могла быть ожидаема, были ли предпосылки для ее прогноза и что можно сказать о характере афтершокового процесса. При этом наиболее важно ответить на вопрос, следует ли ожидать возникновения повторного сильного толчка. Вопрос о прогнозе происшедшей сейсмической катастрофы рассматривается в других статьях этого номера [Любушин, 2011; Сидорин, 2011; Шебалин, 2011]. Ниже кратко обсуждается вопрос об ожидаемости возникновения такой силы землетрясений в Японии. Затем, более подробно, рассматривается характер афтершоковой последовательности происшедшего мегаземлетрясения в сопоставлении с данными по Симуширским и Андаманскому землетрясениям – наиболее изученным из последних по времени сейсмических катастроф.

### **Некоторые закономерности возникновения мегаземлетрясений**

Япония, как известно, характеризуется очень высоким уровнем сейсмичности, однако подобного по силе землетрясения здесь не наблюдалось за всю историю XX в., а возможно и за все историческое время. Согласно Т. Усами [Usami, 1979], историческими землетрясениями в Японии считаются сейсмические события, происшедшие до 1892 г. В следующем, 1893 г., в Японии был введен григорианский календарь, а для регистрации землетрясений стали применяться сейсмографы.

Основным первоисточником о более чем 6000 исторических землетрясениях Японии [Методы..., 1984] являются труды К. Мусы, изданные на японском языке [Musya, 1942–1943, 1949]. Для европейцев более доступна работа [Usami, 1979] на английском языке, содержащая каталог исторических ( $M \geq 5.9$ ) и инструментально зарегистрированных землетрясений за период с 599 г. по 1975 г.

В табл. 1 приведен список крупнейших ( $M > 8.6$ ) землетрясений Японии по данным каталога Т. Усами [Usami, 1979] за историческое время, а в табл. 2 – данные каталога Т. Уцу [Utsu, 1979] по сильнейшим землетрясениям региона, начиная с 1893 г., при этом указаны все события, которые хотя бы по одному типу магнитуд имеют величину более 8.5 [Kanamori, 1983].

**Таблица 1.** Список крупнейших ( $M \geq 8.6$ ) землетрясений Японии за историческое время, по данным [Usami, 1979]

№ п/п	Дата	Время в очаге*, ч-мин	Координаты эпицентра		Глубина, км	M
			$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	13.07.0869 г.	Ночью	38.5	143.8	–	8.6
2	26.08.0887 г.	06-08	33.0	135.3	–	8.6
3	19.09.1498 г.	22-09	34.1	138.2	–	8.6

\* По Гринвичу.

**Таблица 2.** Данные из каталога [Utsu, 1979] для землетрясений Японии с  $M > 8.5$  после 1893 г.

№ п/п	Дата	Время в очаге, JST, ч-мин	Координаты эпицентра		Глубина, км	Оценка M согласно		
			$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		Т. Уцу	Б. Гутенбергу или Б. Гутенбергу и Ч. Рихтеру	Кавасуми (Kawasumi)
1	15.06.1896 г.	19-32	39.5	144.0	–	6.8	8.7	7.6
2	05.08.1897 г.	09-10	38.3	143.3	–	7.6	8.7	7.7
3	12.04.1910 г.	09-22	25.0	123.0	200	7.6	7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	8.8
4	15.06.1911 г.	23-26	28.0	130.0	100	8.0	8.2	8.9

Как видно из данных таблиц, столь сильных землетрясений, как Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. (далее ВЯЗ) с  $M=9.0$ , в Японии ранее не регистрировалось. Более того, учитывая значительную раздробленность литосферы региона и отсутствие протяженных, более тысячи километров, единых сегментов зоны Беньюфа, сама возможность возникновения подобных землетрясений в регионе многими сейсмологами отрицалась.

Иная позиция излагается в [McCaffrey, 2008], где аргументируется, что ни относительно пониженные скорости субдукции, ни большой возраст плиты (облегчающий ее погружение и уменьшающий силу взаимодействия с вышележащим мантийным клином), ни сильная нарушенность зоны субдукции не являются ограничением для реализации мегаземлетрясений с  $M \geq 9$ . В [McCaffrey, 2008] это утверждение подкреплялось реализацией Андаманского мегаземлетрясения, происшедшего в зоне Беньюфа с невысокой скоростью субдукции и довольно большим возрастом погружающейся плиты. Возникновение мегаземлетрясения в Японии стало новым подтверждением выводов [McCaffrey, 2008].

Вывод о возможности возникновения в Японии мегаземлетрясений подкрепляется и результатами статистического анализа сейсмической опасности Японского региона, проведенного на основе использования предельных теорем и предельных распределений (Обобщенного распределения Парето – *GPD* и Обобщенного распределения экстремальных значений – *GEV*) теории вероятности [Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko et al., 2010; Pisarenko, Rodkin, 2010]. При анализе использовался каталог JMA для области в пределах  $25.0^\circ \leq \varphi \leq 49.5^\circ$  с.ш. и  $121.0^\circ \leq \lambda \leq 156.4^\circ$  в.д. за интервал времени с

01.01.1923 г. по 30.04.2007 г.; этот каталог содержит 39316 событий с  $M \geq 4.1$  и максимальной магнитудой  $M=8.2$ .

Согласно проведенному анализу, магнитуда максимально возможного землетрясения в Японии оценивается величиной  $M_{\max}=9.57 \pm 0.86$  с периодом повторяемости события  $M \geq 9$  около тысячи лет. Большой разброс оценки  $M_{\max}$ , делающей ее малоприменимой для применения в практических целях, связан с обсуждаемой в работах [Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010] потенциальной неустойчивостью такого рода оценок. В рамках используемого математического аппарата  $GPD$  и  $GEV$  предельных теорем теории вероятностей величина  $M_{\max}$  определяется соотношением

$$M_{\max} = a + b/\xi, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $\xi$  – определяемые по эмпирическим данным положительные параметры. При этом параметр  $\xi$  может быть близок к нулю, что обычно и выполняется для сейсмических данных. Из (1) видно, что при малых  $\xi$  параметр  $M_{\max}$  может быть определен только с большой погрешностью, что соответствует известной неустойчивости получаемых на основе использования этого параметра карт сейсмического районирования. Общим правилом является необходимость замены карт Общего сейсмического районирования каждые 15–20 лет (личное сообщение В.И. Уломова). В работах [Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010] вместо потенциально неустойчивого параметра  $M_{\max}$  предлагается использовать робастные аналоги этого параметра для заданных интервалов времени  $M_{\max}(T)$ . Для представляющих практический интерес интервалов времени  $T$  оценки  $M_{\max}(T)$  обычно значительно точнее (в разы) оценок величин  $M_{\max}$ .

Возникновение ВЯЗ 11 марта 2011 г. подтвердило возможность реализации в Японии мегаземлетрясений. При этом из вышесказанного следует, что ВЯЗ следует отнести к числу крайне редких событий, близких по величине к максимально возможному для данного региона землетрясению.

Отметим важную тенденцию сильнейших землетрясений к группированию. Как видно в табл. 1 и 2, тесно соседствуют по времени сильные землетрясения 1896 и 1897 и 1910 и 1911 гг. При этом события 1896 и 1897 гг. (и обсуждаемые ниже Симуширские землетрясения) произошли на расстояниях, меньших характерного размера очага землетрясения такого ранга. Такие же случаи группирования характерны и для сильных землетрясений, не связанных с зонами субдукции. В качестве примеров можно указать группы Газлийских и Нью-Мадридских платформенных землетрясений. Отметим, что существование тесных пространственно-временных кластеров сильных землетрясений накладывает определенные ограничения на популярную модель сейсмических брешей.

Возникновение сильных землетрясений в области, где недавно такое событие уже произошло, и, тем самым, значительная часть тектонических напряжений была уже снята, указывает, что длительное и в больших объемах накопление тектонических напряжений не является обязательным условием реализации сильного землетрясения.

Наблюдается тенденция, по-видимому, не случайного группирования по времени и для удаленных друг от друга мегаземлетрясений. По мировым данным, предыдущая такая группа наблюдалась в 60-е и 70-е годы прошлого века. В нее вошли землетрясения: Камчатское 4 ноября 1952 г. ( $M_w = 9.0$ ), Чилийское 22 мая 1960 г. ( $M_w = 9.6$ ) и Аляскинское 28 марта 1964 г. ( $M_w = 9.2$ ). Начало последней группы положило печально известное Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г. ( $M_w = 9.3$ ). Тогда от цунами погибли около 227 тыс. человек. Это мегаземлетрясение продолжалось около 10 мин, разрыв в очаге составил около 1300 км, в результате чего произошел надвиг со смещениями

от 7 до 20 м [Кособоков, 2005]. За ним произошло землетрясение в Чили 27 февраля 2010 г. ( $M_w = 8.8$ ). Японское мегаземлетрясение 11 марта 2011 г. продолжило эту серию.

По времени наиболее определенно просматривается концентрация сильных землетрясений «на рубеже веков». Так, 7 из 8 (приведенных в табл. 1 и 2 и ВЯЗ) сильнейших землетрясений Японии произошли в первом и последнем 20-летии столетия. Такая тенденция подкрепляется известной активизацией сейсмического режима в начале XX в., а также активизацией сейсмичности в настоящее время. Природа активизации сейсмичности на рубеже веков не вполне понятна. Сугубо предварительно, следом за авторами работ [Шестопалов, Харин, 2006; Белов и др., 2009], ее можно трактовать в рамках выявленной этими авторами отрицательной корреляционной связи величин выделенной сейсмической энергии и солнечной активности и известного столетнего цикла солнечной активности (состоящего из трех циклов по три 11-летних периода солнечной активности).

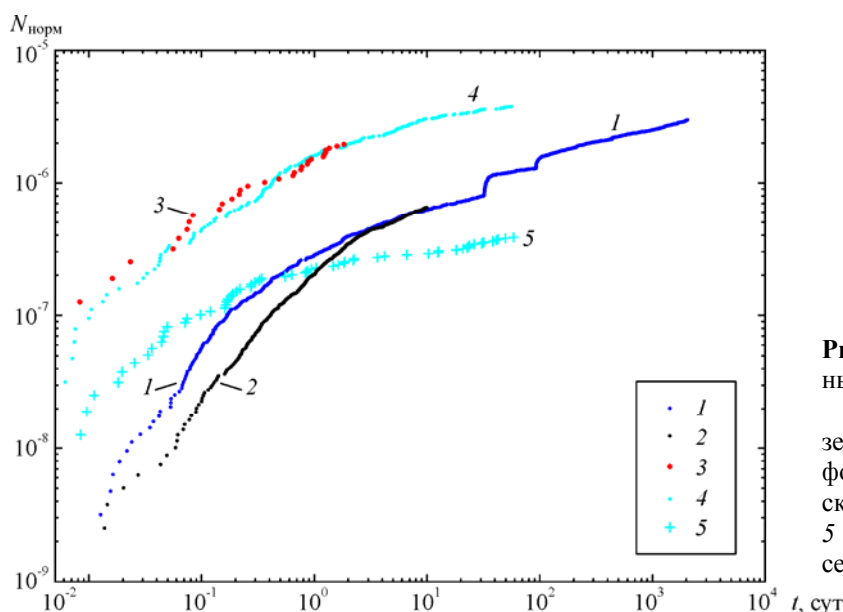
### Сопоставление афтершоковых последовательностей сильных землетрясений

Для сопоставления с поведением афтершоковой последовательности ВЯЗ 11 марта 2011 г. используются данные по афтершоковым последовательностям Андаманского (2004 г.) и Симуширских (2006, 2007 гг.) землетрясений и сильного форшока ВЯЗ ( $M=7.2$ , 9.03.2011 г.). Следом за авторами работ [Reasenberg, Jones, 1989; Gasperini, Lolli, 2006], примем, что интенсивность афтершоковой последовательности описывается выражением

$$n(t) = 10^{a+b(M_i-M_c)} / (t+c)^p, \quad (2)$$

где  $n(t)$  – поток числа афтершоков в момент  $t$  после основного толчка магнитудой  $M_i$ ;  $M_c$  – минимальная магнитуда достоверно определяемых событий;  $b$  – наклон графика повторяемости Гутенберга – Рихтера ( $b \cong 1$ );  $a$  – параметр, описывающий специфику интенсивности данной афтершоковой последовательности;  $c$  – параметр, учитывающий дефицит числа наиболее ранних афтершоков.

Из выражения (2) видно, что зависимость интенсивности афтершоковой последовательности от магнитуды основного толчка описывается множителем  $10^{bM_i}$ . На рис. 1 представлены нормированные на множитель  $10^{M_i}$  значения числа афтершоков ( $M \geq 4.8$ )



**Рис. 1.** Кумулятивные нормированные значения числа афтершоков

Данные: 1 – по Андаманскому землетрясению, 2 – по ВЯЗ; 3 – форшок ВЯЗ; 4 – первое Симуширское землетрясение 15.11.2006 г.; 5 – второе Симуширское землетрясение 13.01.2007 г.

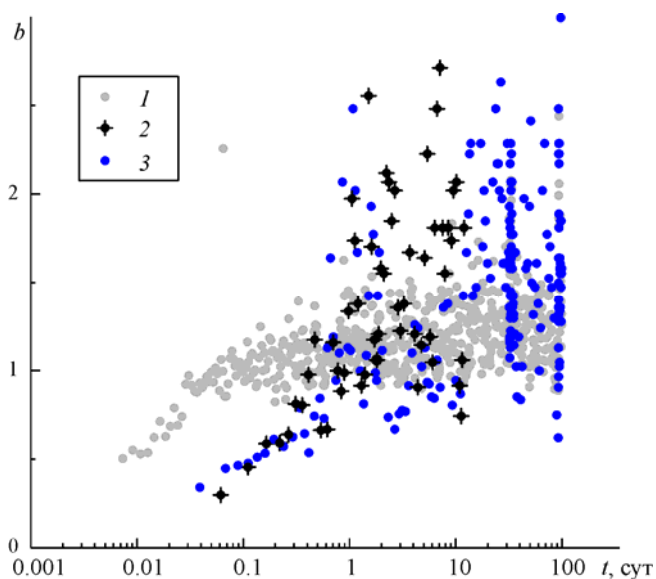
для всего набора рассматриваемых афтершоковых последовательностей. Достаточно высокий уровень магнитуд ( $M=4.8$ ) выбран потому, что только такие события определяются без пропусков по оперативным данным для ВЯЗ и его сильного форшока.

На рисунке обращает на себя внимание близость интенсивностей нормированных афтершоковых последовательностей для Андаманского землетрясения и ВЯЗ, для первого Симуширского землетрясения и сильного форшока ВЯЗ. При этом нормированные значения числа афтершоков второй пары землетрясений имеют существенно большие значения, чем для первой (Андаманского землетрясения и ВЯЗ). Нормированные числа афтершоков второго Симуширского землетрясения занимают промежуточные положения. Такое различие может указывать на «возбужденное» состояние недр во время реализации сильного форшока ВЯЗ и первого Симуширского землетрясения ( $M_w=8.3$ ), за которым через 59 сут последовало второе Симуширское землетрясение ( $M_w=8.1$ ). Отметим, что повышенное число афтершоков рассматривается в качестве прогнозного признака возможного сильного повторного толчка [Шебалин, Воробьева, 2006].

Применительно к случаю ВЯЗ обращает на себя внимание не только относительно небольшое (типичное) число афтершоков на первой стадии развития афтершокового процесса, но и относительно медленное затухание афтершоковой активности (см. рис. 1). Если первое из этих наблюдений свидетельствует в пользу относительно меньшей вероятности возникновения повторного сильного землетрясения в окрестности ВЯЗ, то замедленный спад числа афтершоков скорее указывает на возможность такого повторного события. Ниже будут приведены другие указания на повышенную вероятность повторного сильного события.

Специальный интерес представляет поведение наклона графика повторяемости  $b$ -value в афтершоковых последовательностях. В работе [Смирнов, Пономарев, 2004] на основе анализа экспериментальных данных по геоакустике и ряда представительных афтершоковых последовательностей сильных землетрясений делается вывод о тенденции увеличения величины  $b$ -value по мере развития афтершоковых последовательностей. Исследование афтершоковых последовательностей сильных землетрясений дает возможность уточнить характер изменения  $b$ -value в ходе их развития.

На рис. 2 представлены данные об осредненных по времени (в скользящем временном интервале, включающем 20 событий) значениях  $b$ -value для афтершоковых последовательностей Андаманского землетрясения и ВЯЗ. Там же приведены данные о поведении



**Рис. 2.** Изменения осредненных значений  $b$ -value в обобщенной окрестности сильного землетрясения (1,  $M_{cp}=7.4$ ), в окрестности ВЯЗ (2,  $M_w=9.0$ ) и Андаманского (3,  $M_w=9.3$ ) землетрясения

$b$ -value в обобщенной окрестности сильного землетрясения [Родкин, 2008]. Расчет проводился по формуле максимального правдоподобия [Utsu, 1965; Marzocchi, Sandri, 2003]:

$$b = 0.4343 / (M_{cp} - M_c), \quad (3)$$

где  $M_c$  – минимальное значение магнитуды регистрируемых без пропусков землетрясений;  $M_{cp}$  – среднее значение магнитуды в данной выборке. В выражении (3) пренебрегается незначительным и единообразным смещением оценки  $b$  вследствие округления значений магнитуд с точностью до одной десятой.

При анализе использовались минимально возможные (для получения приемлемой точности  $b$ -value) группы землетрясений – по 20 событий при расчетах для ВЯЗ и сильного Андаманского землетрясения и по 100 событий, когда значения  $b$ -value рассчитывались для обобщенной окрестности сильного землетрясений. Методика построения и использования обобщенной окрестности сильных землетрясений описана в работе [Родкин, 2008], в нашем случае эта окрестность была построена по данным о 450 сильнейших землетрясениях каталога USGS/NEIC за 1964–2007 гг. Среднее значение магнитуды для этой совокупности 450 сильных землетрясений равно  $M_{cp}=7.4$ , максимальное значение  $M_{max}=9$ , минимальное  $M_{min}=7$ . Чтобы более четко представить изменение значений  $b$ -value в непосредственной окрестности основного толчка, время, истекшее после главного толчка, дано на рис. 2 в логарифмическом масштабе.

Как видно на рис. 2, значения  $b$ -value для близких по магнитуде ( $M_w \approx 9$ ) ВЯЗ и Андаманского землетрясения в течение первых суток после главного толчка практически совпадают и вырисовывают единую зависимость ожидаемого увеличения значения  $b$ -value во времени. На больших временах разброс значений  $b$ -value резко возрастает, что отчасти может быть связано с распространением афтершокового процесса на большую территорию. Аналогичный характер изменения  $b$ -value наблюдается и для обобщенной окрестности сильного землетрясения, что характеризует типичность такого характера поведения.

Относительно пониженный разброс результатов расчетов  $b$ -value в малой (до полу-суток) временной окрестности главного толчка может объясняться известной тенденцией роста коррелированности поведения системы в окрестности критической точки (в данном случае – в окрестности сильного землетрясения). Отметим и ту интересную особенность, что эмпирическая зависимость  $b$ -value от логарифма истекшего после момента главного события времени в обоих случаях (для обобщенной окрестности сильного землетрясения, ВЯЗ и Андаманского землетрясения) может быть описана линейной функцией.

Экстраполяция этой зависимости к моменту сильного землетрясения дает близкое к нулю значение  $b$ -value в момент главного события. Такой тип поведения отвечает степенной зависимости характеристик системы от параметра порядка (величины отклонения управляющего параметра от критической точки), что типично для критических явлений различной физической природы [Ma, 1980].

Большая характерная длительность субкритического процесса для ВЯЗ и Андаманского мегаземлетрясений, чем для данных по обобщенной окрестности сильного события (см. рис. 2), может быть связана с большими значениями магнитуды  $M=9$  этих двух мегаземлетрясений по сравнению с данными, использованными при построении обобщенной окрестности сильного землетрясения. Такое предположение подкрепляется результатами расчетов, проведенных для афтершоковых последовательностей Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. ( $M_w=8.3$  и 8.1). Значения  $b$ -value для этих землетрясений (на рис. 2 не показаны) характеризуются большим разбросом данных, но опреде-

ленно тяготеют к области между значениями  $b$ -value, полученными для обобщенной окрестности сильного землетрясения, и для ВЯЗ и Андаманского землетрясения.

Средняя тенденция изменения интенсивности форшокового процесса в соответствии с формулой (1) нарушается значительными всплесками сейсмической активности. С целью их исследования ниже приведены характеристики групп землетрясений (также по 20 событий) в текущем временном окне. Для таких групп землетрясений определялись средняя интенсивность потока числа регистрируемых без пропуска землетрясений (представленная как число событий в сутки), текущее значение  $b$ -value и средняя глубина событий. На рис. 3,а представлены изменения этих параметров для наиболее длинной последовательности афтершоков Андаманского землетрясения.

На рис. 3,а видно, что общая тенденция спада интенсивности афтершокового процесса прерывается короткими эпизодами значительного роста числа событий. Причем только часть таких всплесков активности отвечает сильным афтершокам со своими последовательностями афтершоков. Можно заметить также, что эпизодам роста числа афтершоков в подавляющем большинстве случаев отвечает уменьшение средней глубины землетрясений. Изменчивость соответствующих значений  $b$ -value менее регулярная, но в целом для таких периодов характерны пониженные значения  $b$ -value.

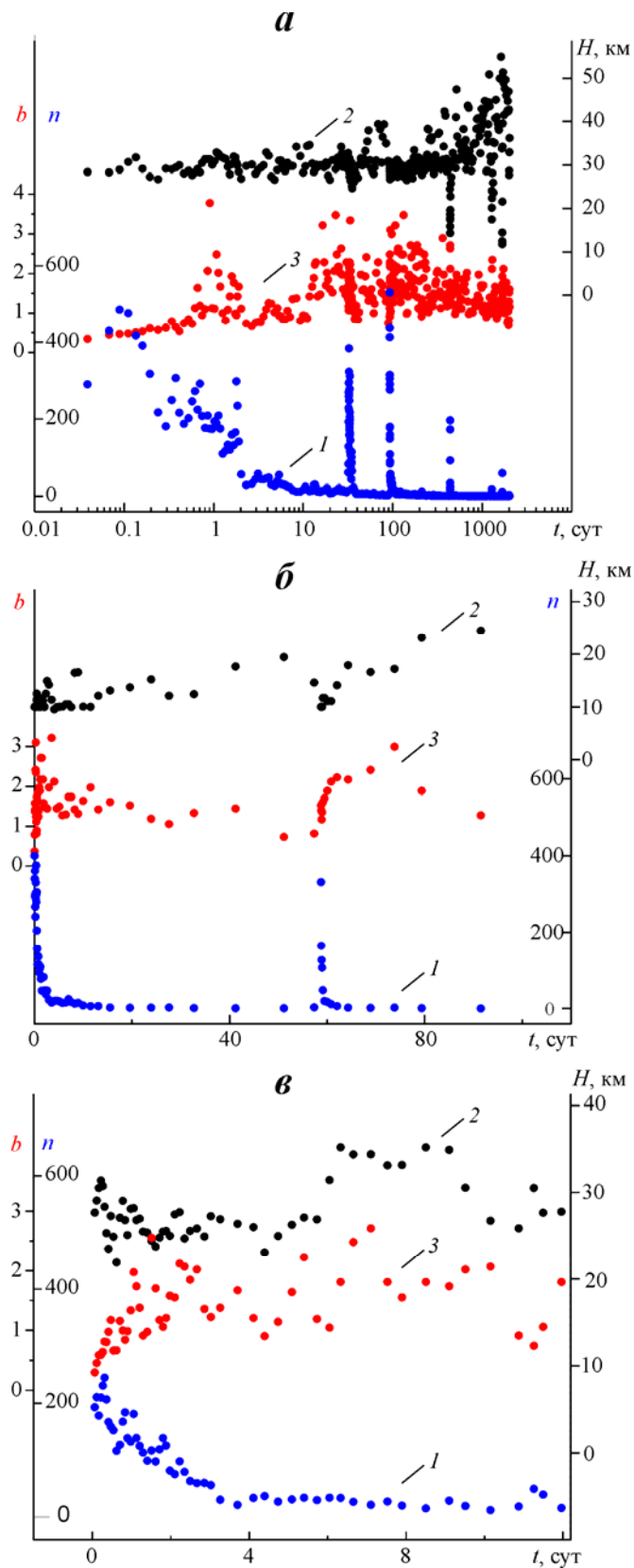
Выявляемые на рис. 3 закономерности, по-видимому, достаточно типичны. На рис. 3,б,в приведены аналогичные графики для Симуширских землетрясений 2006, 2007 гг. и ВЯЗ. На этих рисунках вполне очевидные для данных рис. 3,а закономерности представлены менее четко, но, тем не менее, достаточно определено. На рис. 3,б всплеск активности, сопровождаемый уменьшением средней глубины землетрясений и значений  $b$ -value, отвечает сильному повторному толчку ( $M_w=8.1$ ). На рис. 3,в, по данным для афтершоковой последовательности ВЯЗ, наблюдается слабая активизация на 11-е сутки, также сопровождаемая уменьшениями значения  $b$ -value и средней глубины землетрясений. Для всплесков афтершоковой активности ВЯЗ и Андаманского землетрясения просматривается также тенденция уменьшения корреляционной размерности множества гипоцентров.

Выявленные всплески активности афтершокового процесса, почти всегда сопровождающиеся уменьшением средней глубины событий и в большинстве случаев уменьшением значений  $b$ -value, наиболее естественно связать с эпизодами прорыва к поверхности масс глубинных флюидов. Действительно, такой прорыв будет сопровождаться уменьшением средней глубины землетрясений, а вызванное активизацией флюидного режима падение эффективной прочности геоматериала, по-видимому, должно стимулировать объединение соседних ослабленных зон и рост доли более сильных событий.

Отметим, что аналогичные закономерности были обнаружены по данным детально исследованной аномально продолжительной афтершоковой последовательности сильного ( $M_w=7.7$ ) землетрясения в Бхудж (2001 г., Гуджарат, Индия). Выявленные по этим данным всплески постшоковой активности характеризуются отмеченными выше аномалиями, а также увеличением значений сброшенных напряжений и уменьшением значений корреляционной размерности гипоцентров афтершоков (*Rodkin, Mandal, in press*). Увеличение значений сброшенных напряжений естественно объяснить уменьшением эффективного трения в очагах землетрясений при активизации флюидного режима и прорывах масс флюида в направлении к поверхности. Уменьшение корреляционной размерности естественно связать с концентрацией очагов в пространственно малых областях прорыва флюида к земной поверхности.

Отметим, что отслеживание текущих характеристик афтершоковой последовательности может дать указание на отсутствие или реализацию эпизодов прорыва флюидов и



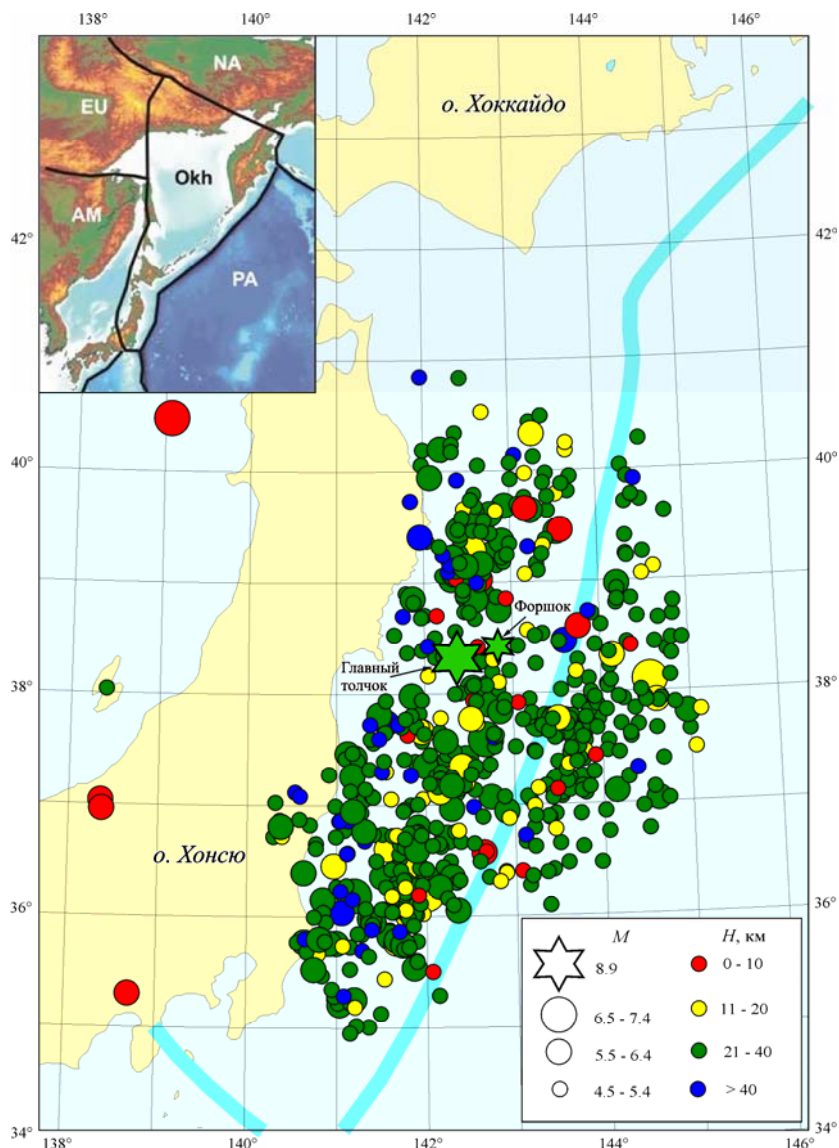


**Рис. 3.** Изменения интенсивности потока афтершоков ( $n$ , 1), средней глубины очагов землетрясений ( $H$ , 2) и значений  $b$ -value ( $b$ , 3) для афтершоковых последовательностей Андаманского (*a*) и Симуширских 2006, 2007 гг. землетрясений (*б*), а также ВЯЗ (*в*)

тем самым дополнить список параметров, которые могут указывать на возможность повторного сильного события или роевой активизации афтершоковой последовательности.

### Пространственно-временные характеристики поля афтершоков ВЯЗ – указания на возможный сильнейший афтершок в будущем

В первые 15 сут после главного толчка было зарегистрировано около 730 афтершоков с  $M=4.6-7.1$ . Преобладающее число гипоцентров находились 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 желобом (рис. 4).



**Рис. 4.** Положение эпицентра главного толчка ВЯЗ 11 марта 2011 г. (большая звездочка), его форшока (маленькая звездочка) и афтершоков (кружки), зарегистрированных в течение 10 сут по данным оперативного каталога NEIC/USGS. Узкая полоса – ось глубоководного желоба. На врезке – региональная схема границ плит в модели [Wei, Seno, 1998]. Плиты: NA – Североамериканская, EU – Евразийская, AM – Амурская, PA – Тихоокеанская, Okh – Охотская

Магнитуда сильнейшего афтершока, возникшего спустя 39 мин после главного толчка, составила 7.1. В первые 15 сут после главного события (момент завершения подготовки публикации) это значение так и не было превышено. Различие по силе между главным событием и сильнейшим афтершоком составляет около двух единиц магнитуды (1000-кратное по энергии). Естественно возникает вопрос о том, каким будет дальнейший сценарий развития афтершоковой последовательности. На наш взгляд, имеющиеся на настоящий момент данные NEIC/USGS позволяют предложить сценарий возникновения повторного сильного толчка в районе глубоководного желоба.

Сформулируем первое положение данного сценария: афтершок ВЯЗ с максимальной магнитудой еще не реализовался, несмотря на большое число зарегистрированных афтершоков. Его вероятная магнитуда может составить  $8.0 \pm 0.5$ . Далее под термином «второй сильный толчок» ВЯЗ следует понимать землетрясение с  $M=8.0 \pm 0.5$ .

Это утверждение основано на двух предпосылках. Во-первых, на закономерности, установленной М. Ботом [Bath, 1965] для разности магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока, которая в среднем была определена в 1.2 единицы магнитуды. Как показано в работе [Ромашкова, Кособоков, 2001], данная закономерность, по сути, является лишь тенденцией, тем не менее различие между главным толчком и сильнейшим афтершоком почти в две единицы магнитуды представляется аномально большим. Во-вторых, на значительной аналогии хода афтершокового процесса ВЯЗ с афтершоковой серией Андаманского землетрясения ( $M_w = 9.3$ ) и первого Симуширского землетрясения ( $M_w=8.3$ ).

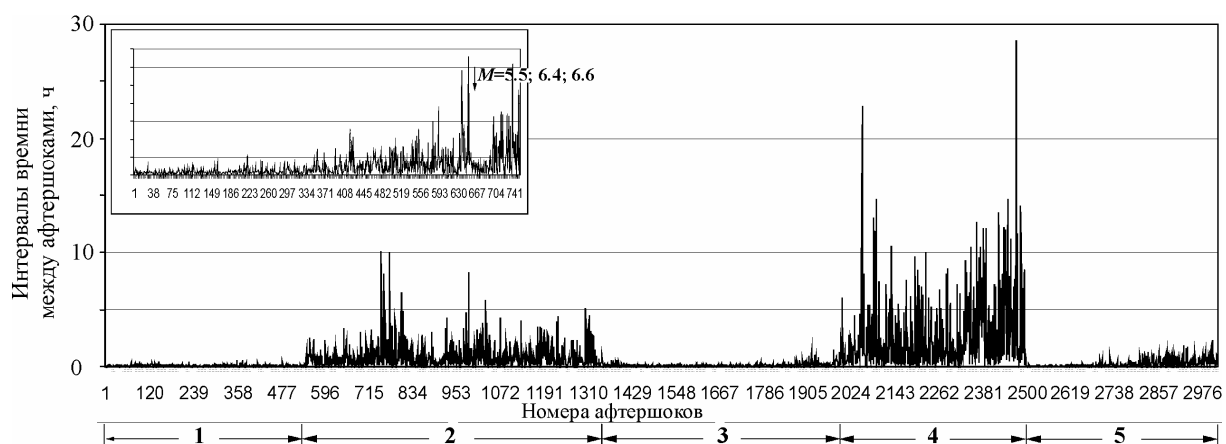
Для описания афтершоков Андаманского землетрясения воспользуемся сведениями службы NEIC/USGS. В течение 15 сут после главного толчка было зарегистрировано около 600 повторных землетрясений с  $M \geq 4.6$ , т.е. число, вполне сопоставимое с числом афтершоков ВЯЗ. Сильнейший афтершок Андаманского землетрясения за первые 15 сут имел  $M=7.5$ . Он возник спустя 3 ч 22 мин после главного удара. Таким образом, и число событий, и магнитуда, и время возникновения сильнейшего афтершока на начальной стадии развития афтершоковых последовательностей ВЯЗ и Андаманского землетрясения достаточно близки. Такое согласие дает основание использовать данные по афтершоковой последовательности Андаманского землетрясения как некую модель возможного развития афтершоковой последовательности ВЯЗ.

На рис. 5 показана зависимость интервалов времени между афтершоками Андаманского землетрясения от номеров повторных толчков и аналогичный график для ВЯЗ (врезка). Первый 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. В этой области появляется возможность прогноза эпизодов усиления сейсмической активности, связанных с возникновением повторных землетрясений с  $M=6-7$ .

Толчки с  $M=6-7$  возбуждают вторичные последовательности афтершоков, что приводит к резкому снижению интервалов времени между афтершоками (третий интервал). Такая ситуация имела место для Андаманского землетрясения с 28 по 30 января 2005 г.



**Рис. 5.** Зависимость интервалов времени между афтершоками Андаманского землетрясения 2004 г. от номеров повторных толчков. На врезке: аналогичный график для ВЯЗ за первые 15 сут

Область графика по горизонтальной оси разбита на 5 частей, соответствующих отдельным стадиям афтершокового процесса

Четвертый интервал отвечает длительности интервалов между существенными афтершоками основного события в широком диапазоне от долей часов до суток и более. Начало этой стадии для Андаманского землетрясения приходится примерно на 35-е сутки афтершоковой последовательности, а окончание на 92-е сутки этой последовательности, когда реализовался сильнейший афтершок с  $M=8.6$ .

Отметим ряд особенностей, присущих четвертому интервалу, которые могут иметь значение в плане прогноза сильнейшего афтершока, когда построения и анализ зависимости, подобной обсуждаемой, ведутся в реальном времени. Первая особенность – резкое торможение скорости потока событий при переходе от третьего интервала к четвертому. Вторая – резкое возрастание изменчивости характера афтершокового процесса, выражающееся в большом разбросе отсчетов на рис. 5, в том числе – в наличии аномальных выбросов. Столь разнообразное поведение афтершокового процесса может указывать на его неустойчивость. Такую неустойчивость предположительно можно связать с расползанием афтершокового процесса на соседние области. В пользу такого предположения свидетельствует тот факт, что времена, соответствующие этому интервалу афтершокового процесса, примерно соответствуют временам распространения порождаемых очагом деформационных волн на соседние территории. Новые свидетельства о существовании таких волн и оценка их параметров, согласующаяся с нашим предположением, приводятся в работе [Шерман, Горбунова, 2010].

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

Отметим, что моменты возникновения повторных сильных толчков в других упоминавшихся выше афтершоковых последовательностях отличаются от времени возникновения повторного толчка Андаманского землетрясения не столь сильно. Второе Симуширское землетрясение произошло с запаздыванием на 59 сут. Сильные Газлийские землетрясения 1978 г. разделяют 39 сут, а Нью-Мадридские землетрясения – 38 сут. Отсюда, по аналогии, можно было бы полагать, что наиболее вероятное время реализации повторного сильного толчка ВЯЗ – интервал со второй декады апреля до середины июня 2011 г.

Статистический анализ всей совокупности сильных ( $M \geq 7$ ) землетрясений по каталогу ISC за 1905–2007 гг. не выявил аналогичной закономерности для значений времени запаздывания между парами близких по пространству и времени сильных землетрясений. По результатам статистического анализа примерно 200 пар близких землетрясений можно только сказать, что вероятность реализации повторного сильного толчка падает со временем и по истечении примерно двух-трех месяцев выходит на квазипостоянный уровень. Таким образом, вопрос о вероятном времени реализации повторного сильного толчка можно считать открытым. При этом доля землетрясений с  $M \geq 7$ , за которыми в пределах типичной длительности афтершокового процесса и не далее типичного размера очага последовало второе землетрясение с  $M \geq 7$ , довольно велика и составляет около 10 %.

Обратимся теперь к вопросу – каково наиболее вероятное расположение предполагаемого повторного сильного толчка? Как видно на рис. 4, область афтершоков заполняется не равномерно. В ее пределах можно выделить основную область концентрации афтершоков, которая примыкает к о-ву Хонсю, и дополнительную область, расположенную севернее  $37.0^\circ$  с.ш. за глубоководным желобом, который служит в качестве границы, разделяющей эти две области. Вторая область, в меньшей степени затронутая разрядкой напряжений при ВЯЗ, и может считаться наиболее вероятной областью возникновения повторного сильного толчка. Во всяком случае, при Симуширском землетрясении 2006 г. ( $M_w=8.3$ ) наблюдалась аналогичная ситуация. Тогда в начале афтершоковой последовательности тоже образовались два кластера афтершоков: один вблизи о-ва Симушир, а второй – в районе желоба. И второе землетрясение 2007 г. магнитудой 8.1 произошло именно в этой области [Тихонов и др., 2008].

Уточненный прогноз можно будет получить по мере дальнейшего развития афтершоковой последовательности ВЯЗ. В частности, представляет интерес рост кумулятивного нормированного числа афтершоков в плане близости тенденции их роста к происшедшим ранее сильным землетрясениям, сопровождавшимся и не сопровождавшимся сильным повторным толчком. Определенные указания, видимо, можно получить и по данным об изменчивости средней глубины очагов и текущих значений  $b$ -value (в особенности при анализе ситуации в вероятной пространственной области возможного повторного сильного события).

### Заключение

Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. с  $M_w=9.0$  (ВЯЗ) относится к мега-событиям. Ранее землетрясений такого масштаба в Японии не отмечалось, и широкое распространение имело мнение, что ввиду раздробленности зоны субдукции на отдельные, относящиеся к разным плитам относительно непротяженные сегменты, такие мегаземлетрясения в Японии невозможны. Такое предположение подкреплялось данными об исторической сейсмичности, согласно которым за длительный исторический период (с 869 г. по начало XX в.) землетрясений сильнее  $M=8.6$ – $8.7$  (по разным шкалам) в Японии не происходило.

Иное заключение следовало из рассмотрения, проведенного с использованием предельных распределений теории вероятностей [Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010; Pisarenko et al., 2010]. В этих работах, в результате анализа каталога JMA за 1923–2007 гг. была получена оценка максимально возможного в Японии землетрясения как  $M_{\max}=9.6 \pm 0.8$  с большим ( $\sim 1000$  лет) характерным периодом повторяемости. Таким

образом, полученная на основе такого статистического подхода оценка величины максимально возможного события оказалась (по крайней мере, в данном частном случае) формально даже точнее оценки, полученной ранее на основе сеймотектонических построений и по данным об исторической сейсмичности. Отсюда следует, что предлагаемая в монографиях [Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010] методика может быть рекомендована для оценки величин экстремально сильных сейсмических (и иных) воздействий. Наряду с привлечением данных об исторической и палеосейсмичности, этот подход призван компенсировать недостаточную длительность современных инструментальных наблюдений. Другое преимущество такого статистического подхода состоит в возможности оценивания величины максимального воздействия не вообще (такая оценка, как показано в работах [Писаренко, Родкин, 2007; Pisarenko, Rodkin, 2010], может быть неустойчивой по формально-математическим основаниям), а для интервала времени заданной продолжительности. Оценки величин максимально возможных воздействий для конечных интервалов времени являются устойчивыми.

Возникновение ВЯЗ (а ранее сильнейшего Андаманского землетрясения) свидетельствует о том, что ни большая (в несколько тысяч километров) протяженность единой зоны субдукции, ни высокая скорость субдукции не являются обязательными условиями возникновения сильнейших мегаземлетрясений.

Режим афтершоков ВЯЗ сопоставлялся с данными по афтершоковым последовательностям Симуширских (2006, 2007 гг.) и Андаманского (2004 г.) землетрясений, а также с характером сейсмичности в обобщенной окрестности сильного землетрясения [Родкин, 2008]. Рассматривалась изменчивость потока событий, величин наклона графика повторяемости ( $b$ -value), средней глубины землетрясений и величин корреляционной размерности гипоцентров афтершоков. Наиболее систематична изменчивость величин наклона графика повторяемости в непосредственной временной окрестности сильного землетрясения, где эта зависимость может быть описана степенной зависимостью, характерной для поведения систем различной физической природы в окрестности критических точек.

Афтершоковые последовательности рассмотренных землетрясений представляют собой совокупность трендовых изменений постшоковой активности и кратковременных эпизодов резкого роста уровня сейсмичности. Некоторые из таких всплесков соответствуют реализации сильных повторных толчков и их афтершоковых последовательностей. Всплески активности афтершокового процесса почти всегда сопровождаются уменьшением средней глубины событий, значений  $b$ -value и величин фрактальной размерности. Происхождение таких всплесков наиболее естественно связать с эпизодами прорыва к поверхности масс глубинных флюидов.

На момент написания статьи наблюдается аномально большой промежуток между магнитудой основного толчка ВЯЗ ( $M=9.0$ ) и его сильнейшего афтершока ( $M=7.1$ ). Такая ситуация может указывать на повышенную вероятность повторного сильного толчка с  $M=7.5$  и более. О том же свидетельствует и значительная аналогичность пространственно-временного поведения афтершоковых последовательностей ВЯЗ и первого Симуширского землетрясения ( $M_w=8.3$ ), за которым через два месяца последовало второе событие с  $M_w=8.1$ . Применительно к проблеме возможности повторного сильного толчка обращает на себя внимание также как типичное (не повышенное) число афтершоков на начальной стадии афтершокового процесса ВЯЗ, так и несколько замедленное затухание афтершоковой активности за последующие полмесяца. Первое из этих наблюдений свидетельствует в пользу относительно меньшей вероятности возникновения

повторного сильного землетрясения в окрестности ВЯЗ, в то время как замедленный спад числа афтершоков, скорее, свидетельствует в пользу возможности такого повторного события. Более полная и менее противоречивая оценка вероятности повторного сильного толчка ВЯЗ землетрясения может быть дана в дальнейшем, по мере накопления данных о характере развития афтершоковой последовательности.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 09-05-01039 и 11-05-00663-а) и Европейского гранта FP7 № 262005 SEMEP.

### Литература

- Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П.* О взаимосвязях эндогенной активности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Докл. РАН. 2009. Т. 428, № 1. С. 104–108.
- Кособоков В.Г.* Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы // Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. М.: ГЕОС, 2005. Ч. I. 179 с. (Вычислительная сейсмология; Вып. 36).
- Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // Геофизические процессы и биосфера. 2011а. Т. 10, № 1. С. 9–35.
- Ма Ш.* Современная теория критических явлений. М.: Мир, 1980. 299 с.
- Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984. 312 с.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В.* Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: ГЕОС, 2007. 240 с. (Вычислительная сейсмология; Вып. 38).
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканонология и сейсмология. 2008. № 6. С. 1–12.
- Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г.* Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 162–189.
- Сидорин А.А.* Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 5–8.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. 2004. № 10. С. 26–36.
- Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н., Поплавский А.А., Прытков А.С., Спиринов А.И.* Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 3–17.
- Шебалин П.Н.* Широкомасштабная краткосрочная активизация сейсмичности перед сильнейшими землетрясениями Японии и Курил // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 36–46.
- Шебалин П.Н., Воробьева И.А.* Алгоритмы прогноза землетрясений // Вычислительная сейсмология. 2006. Вып. 37. 292 с.
- Шерман С.И., Горбунова Е.А.* Новые данные о закономерностях проявления землетрясений в Байкальской сейсмической зоне и их прогноз // Докл. РАН. 2010. Т. 435, № 5. С. 686–691.

- Шестопалов И.П., Харин Е.П.* Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности // Геофиз. журн. 2006. Т. 28, № 4. С. 59–70.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2, N 6. P. 483–514.
- Gasperini P., Lolli B.* Correlation between the parameters of the aftershock rate equation: Implications for the forecasting of future sequences // Phys. Earth and Planet. Inter. 2006. V. 156. P. 41–58.
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // Tectonophysics. 1983. V. 93. P. 185–199.
- McCaffrey R.* Global frequency of magnitude 9 earthquakes // Geology. 2008. V. 36, N 3. P. 263–266.
- Marzocchi W., Sandri L.* A review and new insights in the estimation of *b*-value and its uncertainty // Ann. Geophys. 2003. V. 46. P. 1271–1282.
- 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. Mainichi Press, 1949 (in Japanese).
- Pisarenko V., Rodkin M.* Heavy-tailed distributions in disaster analysis // Advances in natural and technological hazards research. Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, 2010. V. 30. DOI: 10.1007/978-90-481-9171-0.
- Pisarenko V.F., Sornette D., Rodkin M.V.* Distribution of maximum earthquake magnitudes in future time intervals: application to the seismicity of Japan (1923–2007) // Earth Planets Space. 2010. V. 62. P. 567–578.
- Reasenbergh P.A., Jones L.M.* Earthquake hazard after a mainshock in California // Science. 1989. V. 243. P. 1173–1176.
- Utsu T.* A method for determining the value of *b* in a formula  $\log n = a - bM$  showing the Magnitude-frequency relation for earthquakes (in Japanese) // Geophys. Bull. Hokkaido Univ, 1965. V. 13. P. 99–103.
- Utsu T.* Seismicity of Japan from 1885 through 1925 – A new catalog of earthquakes of  $M \geq 6$  felt in Japan and smaller earthquakes which caused damage in Japan // Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo. 1979. V. 54, pt. 2. P. 253–308 (in Japanese).
- Usami T.* Study of historical earthquakes in Japan // Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo. 1979. V. 54, p. 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. P. 419.

### Сведения об авторах

**РОДКИН Михаил Владимирович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник. Российская академия наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, Российская академия наук. 117997, г. Москва, Профсоюзная ул. д. 84/32. Тел.: +7 (495)-333-3401, Факс: +7 (495) 333-1255. E-mail: rodkin@mitp.ru

**ТИХОНОВ Иван Николаевич** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией сейсмологии. Институт морской геологии и геофизики, Двальной-восточное отделение Российской академии наук. 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 16. Тел.: (4242)-791-692, Факс: (4242)791-517. E-mail: tikhonov@imgg.ru



# MEGAEARTHQUAKE OF MARCH 11, 2011 IN JAPAN: EARTHQUAKE'S SIZE AND AFTERSHOCK SEQUENCE BEHAVIOR

M.V. Rodkin<sup>1,2</sup>, I.N. Tikhonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB of Russian Academy of Sciences, Yuzno-Sahalinsk Russia

**Abstract.** The Great Japanese Earthquake of March. 11 2011 is a mega-earthquake. The conditions of origin of such mega-earthquakes are discussed. The aftershock sequence of the Great Japanese Earthquake is examined in comparison with the aftershock sequences of the Simushir earthquakes (2006, 2007), the Great Nicobar Islands earthquake (2004), and with behavior of seismicity in the generalized vicinity of large earthquake. The aftershock sequences of the mentioned strong earthquakes are shown to consist of the trend change in postshock activity and of irregular bursts in seismic activity. The bursts of seismic activity are characterized typically not only by the growth of a number and energy of earthquakes, but also by decrease in a b-value and in a mean depth of aftershocks. Some of such bursts correspond to the occurrence of strong aftershocks and of their aftershock sequences. Possible physical mechanism of occurrence of bursts in aftershock activity is suggested. The possibility of occurrence of the second strong shock in the vicinity of the Great Japanese Earthquake is suggested and discussed.

*Keywords:* earthquake, mega-earthquake, the main shock, aftershock sequences, strongest aftershock, magnitude-frequency relation, maximum possible magnitude.