О возможном сильном афтершоке в области Японского землетрясения 11 марта 2011 года

А. А. Любушин,¹ М. В. Родкин² и И. Н. Тихонов³

Получено 20 мая 2011 г.; принято 25 мая 2011 г.; опубликовано 17 июня 2011 г.

Исследуется сейсмический режим в окрестности Великого Японского землетрясения 11 марта 2011 года, M = 9. Ряд особенностей афтершоковой последовательности этого землетрясения свидетельствует о возможности реализации нового сильного афтершока. Мультифрактальный анализ поля микросейсм указывает на общий спад активности геофизической среды (наиболее значительный в очаговой области землетрясения), но также и на относительную активизацию областей к северу и к югу от афтершоковой зоны. Высказывается предположение о возможности локализации сильного афтершока в этих двух областях и в районе глубоководного желоба. Наибольшую потенциальную опасность представляет область, расположенная к югу от эпицентральной зоны в связи с ее близостью к мегаполису Токио. *КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Великое Японское землетрясение* 11.03.2011 г.; возможность сильного афтершока; мультифрактальный анализ микросейсм.

Ссылка: Любушин, А. А., М. В. Родкин и И. Н. Тихонов (2011), О возможном сильном афтершоке в области Японского землетрясения 11 марта 2011 года, Вестник ОНЗ РАН, 3, NZ6001, doi:10.2205/2011NZ000108.

Введение

11 марта 2011 г. в 5 час 46 мин по Гринвичу (местное время – 14 час 46 мин) восточнее о-ва Хонсю произошло уникальное для Японии землетрясение с магнитудой $M_w = 9,0$, относящееся к классу мега-событий. Основные параметры Великого Японского землетрясения (далее ВЯЗ) были спрогнозированы в работах [Любушин, 2009, 2010, 2011а, 2011b, 2011с; Lyubushin, 2008, 2010а, 2010b, 2010с]. После его возникновения нами было организовано постоянное слежение за динамикой развития афтершокового процесса. На основании оперативного анализа текущих параметров афтершоковой последовательности было высказано предположение о повышенной вероятности повторного сильного землетрясения в области ВЯЗ [Родкин, Тихонов, 2011; Тихонов, 2011; Тихонов, Ломтев, 2011]. Это предположение в значительной степени базировалось на дефиците энергии афтершоков ВЯЗ, следовавшем из оперативных данных, представленных в сеть Интернет агентством NEIC/USGS.

В первоначальной версии оперативного каталога NEIC/USGS сильнейшим афтершоком являлся толчок с

© 2011 Геофизический центр РАН.

http://onznews.wdcb.ru/doi/2011NZ000108.html

магнитудой M = 7, 1, зарегистрированный через 39 мин после основного землетрясения. Различие между магнитудами основного толчка ($M_w = 9, 0$) и сильнейшего афтершока (M = 7, 1) составляло около двух единиц магнитуды, и естественно такое различие было аномально велико и указывало на повышенную вероятность нового сильного события. Такой вывод подкреплялся сопоставлением с данными об афтершоковых последовательностях Андаманского землетрясения 2004 года, сильных Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. и некоторых других сильных сейсмических событий. При этом наиболее вероятным местоположением будущего сильного афтершока указывалась очаговая область ВЯЗ, расположенная за глубоководным Японским желобом.

Однако, согласно уточненным впоследствии данным NEIC/USGS, магнитуды двух афтершоков, зарегистрированных в течение первого часа, были резко изменены (с 6,8 на 7,9 и с 7,1 на 7,7). Таким образом, за первый час после ВЯЗ оказалось уже два сильных (M > 7) землетрясения с M = 7,9 и 7,7. При этом второй сильный афтершок попал в область за глубоководным желобом, где и прогнозировалось ранее подобное событие. Новое соотношение магнитуд основного толчка (M = 9,0) и сильнейших афтершоков (M = 7,9 и M = 7,7) оказывается уже вполне типичным и не указывает на высокую вероятность повторного сильного землетрясения. Отметим, что еще одно сильное событие с M = 7,1 было зафиксировано на 28 сутки после главного толчка.

Таким образом, ожидание повторного события, сопоставимого по силе с предыдущими сильнейшими афтершоками, казалось бы, потеряло свою актуальность. Це-

¹Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

²Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, Москва, Россия

³Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия



Рис. 1. Положение эпицентра главного толчка землетрясения 11.03.2011 г. (большая звездочка), сильнейших афтершоков (маленькие звездочки) и других афтершоков (кружки), зарегистрированных в течение 59 суток по данным оперативного каталога NEIC/USGS. Узкие голубые полосы – оси Курильского и Японского желобов, а также каньона Сагами.

лью данной работы является выяснение факта, насколько оправдана такая точка зрения, и есть ли весомые аргументы, заставляющие усомниться в ней даже спустя два месяца после начала афтершокового процесса.

Анализ афтершоковой активности спустя 2 месяца после мега-землетрясения

В настоящее время (два месяца спустя после главного толчка ВЯЗ) по оперативным данным агентства NEIC/USGS зарегистрировано более 1100 повторных толчков с $M \ge 4, 5$, в том числе 3 события с M = 7, 9, 7,7 и 7,1 (Рис. 1). Эпицентральное облако афтершоков, начиная с первых суток, сохраняет примечательную особенность – разделение на два кластера. Подобное наблюдалось также после первого Симуширского землетрясения 2006 г. [Тихонов и др., 2008]. Разделяющей границей между кластерами афтершоков ВЯЗ служит ось глубоководного желоба. Соседние участки сейсмоактивной зоны, расположенные к северу и к югу от очаговой зоны ВЯЗ, находятся в спокойном состоянии и никак не выделяются в особенностях афтершокового процесса. Такое поведение, по-видимому, довольно типично. Так, например, области реализации сильного повторного события в зоне Андаманского землетрясения и в зоне второго сильного Симуширского землетрясения 2007 г. также ничем особенным не выделялись.

Некоторая дополнительная информация может быть получена на основе сравнительного анализа общего уровня активности афтершокового процесса ВЯЗ в сопоставлении с данными по Андаманскому землетрясению, Симуширским землетрясениям и сильному форшоку землетрясения ВЯЗ (M = 7, 2, 9.03.2011 г.). На Рис. 2 представлены графики роста числа надежно определенных ($M \ge 4, 8$) событий в афтершоковых последовательностях этих землетрясений. Число событий нормировано на 10^M , где $M = M_w$ – магнитуда главных событий.

Из Рис. 2 видно, что нормированное на 10^{M_w} число афтершоков максимально для первого Симуширского землетрясения и для форшока ВЯЗ. Для этих же событий (а также для всей афтершоковой последовательности ВЯЗ) характерно наиболее медленное спадание числа событий со временем. Наиболее быстро спадает со временем число афтершоков для второго Симуширского землетрясения и для повторного сильного толчка Андаманского землетрясения (на рисунке не показано). Отсюда можно предположить, что быстрое спадание числа афтершоков указывает на полную разгрузку области и на отсутствие опасности повторного сильного события. Уменьшение числа событий в афтершоковой последовательности ВЯЗ происходит медленнее, чем для Андаманского землетрясения и примерно так же, как в области первого Симуширского землетрясения и сильного форшока ВЯЗ. Такие данные могут указывать на потенциальную возможность сильного повторного события в окрестности очага ВЯЗ.

Что касается нормированного числа событий, то если, как это иногда предлагается [Gasperini, Lolli, 2006], нормировать число афтершоков не на 10^{M_w} , а на 10^{bM_w} , где



Рис. 2. Нормированное число событий N_{norm} в афтершоковых последовательностях: ВЯЗ (1), Андаманского землетрясения (2), первого Симуширского (3), второго Симуширского (4) и сильного форшока ВЯЗ (5). По оси x – время после главного толчка.

b – наклон графика повторяемости Гутенберга–Рихтера для соответствующей афтершоковой последовательности, то максимальное нормированное число афтершоков по-прежнему соответствует сильному форшоку ВЯЗ, но второе место занимает уже афтершоковая последовательность ВЯЗ. Отсюда следует относительно повышенная активность афтершоковой последовательности ВЯЗ, что также может указывать на возможность повторного сильного события вблизи области ВЯЗ. Отметим, что аномальность характеристик потока текущих слабых афтершоков используется как прогнозный признак реализации сильного афтершока [Шебалин, Воробъева, 2006].

О прогнозе места возможного сильного афтершока по волновым формам микросейсмического шума

Данные широкополосной сейсмической сети F-net Японии свободно доступны в Интернете по адресу [http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en]. Общее число станций равно 83. Наблюдения ведутся с 1997 г. по настоящее время. Анализируемые данные – вертикальные компоненты с шагом по времени 1 с. Далее рассматривались лишь станции, расположенные выше 30°N, что исключает из анализа данные 6 уединенных станций, расположенных на удаленных небольших островах. Волновые формы микросейсм приводились к шагу по времени 1 минута путем вычисления средних значений в последовательных интервалах времени длиной 60 отсчетов.

Анализ мульти-фрактальных параметров низкочастотного микросейсмического шума позволил еще в 2008 г. выдвинуть гипотезу о вероятности скорого возникнове-



ния в регионе Японии крупной сейсмической катастрофы, признаком которой является статистически значимое уменьшение ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности. В дальнейшем, по мере поступления новых данных, были получены новые результаты, свидетельствующие о постоянном повышении сейсмической опасности. Анализ свойств кластеризации параметров фона позволил сделать вывод, что именно с середины 2010 г. Японские острова вступают в критически опасную фазу развития сейсмического процесса. Прогноз катастрофы, сначала с оценкой лишь нижней магнитуды (в середине 2008 г.), а затем с нижней оценкой времени (в середине 2010 г.) был заблаговременно опубликован в серии статей и тезисов на международных конференци-



Рис. 3. Карты распределения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности $\Delta \alpha$ для волновых форм низкочастотных микросейсм сети наблюдений Fnet для различных промежутков времени: (а) – от начала 1997 г. по 25.09.2003 г., звездочкой указано положение эпицентра события 25.09.2003 г., M = 8,3; (б) – от начала 2004 года по 10.03.2011 г., звездочкой указано положение эпицентра ВЯЗ 11.03.2011 г., M = 9,0; (в) – от 12.03.2011 г. по 26.05.2011 г. Для каждой карты указаны средние значения $\Delta \alpha$. Области, не покрытые сейсмическими станциями, закрыты серым фоном, поскольку там оценки $\Delta \alpha$ не состоятельны.

ях [Любушин, 2009, 2010, 2011а, 2011b, 2011с; Lyubushin, 2008, 2010a, 2010b, 2010с].

Однако, как было замечено уже после ВЯЗ, используемый метод мог дать и прогноз места будущей сейсической катастрофы как области относительно низких значений $\Delta \alpha$ – ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности [Любушин, 2011b]. Величина $\Delta \alpha$ отражает степень разнообразия случайного поведения сигнала и поэтому, косвенно, уменьшение $\Delta \alpha$ является признаком подавления определенных степеней свободы среды, уменьшения их числа. Подробное описание используемой техники вычисления параметра $\Delta \alpha$ приведено в [Любушин, 2009, 2010, 2011а; Lyubushin, 2010с]. а метод построения карт значений описан в [Любушин, 2011b].

Этот ретроспективный прогноз места ВЯЗ представлен на Рис. 36. Рис. За представляет карту распределения $\Delta \alpha$ от начала функционирования системы F-net до сильного события Токачи-оки у берегов Хоккайдо

25.09.2003 г. ($M_w = 8, 3$), которое, согласно интерпретации, предложенной в [Любушин, 2009; Lyubushin, 2008] явилось первым сильным проявлением выявленного масштабного роста дестабилизации литосферы всего Японского региона. В определенном смысле это событие можно считать форшоком последовавшего затем мега-землетрясения ВЯЗ. После землетрясения 2003 года произошло хотя и небольшое, но статистически значимое уменьшение среднего значения $\Delta \alpha$, которое сохранялось фактически постоянным вплоть до момента ВЯЗ - это видно при сравнении Рис. За и Рис. Зб. На Рис. Зв представлено распределение по пространству параметра $\Delta \alpha$, оцененное по текущим данным уже после ВЯЗ. Необходимо отметить следующее: (1) общий (средний) уровень значений резко увеличился (от 0,43 до 0,65); (2) область афтершоков ВЯЗ после сейсмической катастрофы характеризуется максимальными значениями (т.е. произошел как бы распад коррелированного состояния и рост числа степеней свободы); (3) на Рис. За область ВЯЗ отмечена существенно пониженными значениями $\Delta \alpha$, что свидетельствует о том, что подготовка ВЯЗ началась задолго до 1997 года – начала функционирования системы наблюдений F-net, что вполне естественно, поскольку время появления первых предвестников мега-землетрясений с магнитудой 9 оценивается как 30-35 лет до события [*Pukumake*, 1979].

На фоне общего роста величин $\Delta \alpha$ на Рис. Зв заметны области пониженных значений прогнозного параметра с севера и с юга от очаговой области ВЯЗ. Появление таких областей коррелирует с ожидаемым перераспределением напряжений в результате подвижки в очаге ВЯЗ. Ввиду обсуждаемой в работах [Родкин, Тихонов, 2011; Тихонов, 2011; Тихонов, Ломтев, 2011] гипотезы о возможном сильнейшем афтершоке ВЯЗ с магнитудой около 8 вблизи глубоководного желоба, логично предположить, что области этих аномалий могут указывать на два других местоположения возможного сильного события. При этом ожидаемые сильные толчки к югу и к северу от очаговой области ВЯЗ не являются афтершоками в строгом смысле (не отвечают закону Омори) и могут реализоваться в течение нескольких лет. Расположение северной аномалии существенно перекрывается с одной из площадок, выделенной В. Г. Кособоковым на основе алгоритмов M8 и MSc в качестве области вероятного сильного землетрясения с магнитудой $M \ge 8,0$ по состоянию на 1 июля 2010 г. [Кособоков, 2011]. Однако этот прогноз был снят его автором в начале 2011 г. Тем не менее, эти независимые оценки наиболее вероятного местоположения будущего сильного землетрясения служат дополнительным аргументом в пользу заключения, сделанного в результате обработки данных сети F-net.

А теперь попытаемся сделать предположения, уточняющие это заключение. Для этого рассмотрим сильнейшие ($M \ge 7, 6$) землетрясения, которые наблюдались с 1900 г. восточнее о-ва Хоккайдо и северной части о-ва Хонсю. Очаговые области этих землетрясений изображены на Рис. 4. Из него следует, что потенциально опасная северная зона вмещает, по крайней мере, два очага сильнейших сейсмических событий. Такими, наибольшими по размерам, афтершоковыми областями являются эпицен-

тральные зоны землетрясений 1968 г. $(M_w = 8, 2)$ и 2003 г. $(M_w = 8, 3)$. В зоне первого события отмечены еще три более слабых толчка: 1931 г. $(M_w = 7, 6)$ и 1968, 1994 гг. $(M_w = 7, 7)$.

С учетом сказанного, логично предположить, что новый сильный толчок произойдет скорее всего в области очага 1968 г., так как для него достаточно места между очагами ВЯЗ и Токачи-оки. Здесь состояние относительного покоя продолжается около 17 лет. Конечно, это меньше предыдущих интервалов (37 и 26 лет) между сильнейшими событиями для рассматриваемой очаговой области, но после ВЯЗ процесс может запуститься раньше. К примеру, Шикотанское землетрясение 1994 г. $(M_w = 8, 3)$ спровоцировало примерно через год в соседней области Итурупское землетрясение 1995 г. $(M_w = 7, 9)$.

Рассматривая эту гипотезу как наиболее предпочтительную, нельзя полностью отказываться и от прежней идеи – сильного афтершока в районе желоба [Родкин, Тихонов, 2011; Тихонов, 2011]. Конечно, его вероятность значительно снизилась после уточнения данных USGS/NEIC об афтершоках первого часа, но есть прецедент, когда в подобной ситуации наблюдалось два сильных афтершока. Речь идет о втором Симуширском землетрясении 13 января 2007 г. ($M_w = 8, 1$), возникшем в районе Курильского желоба, и событии 15 января 2009 г. (M = 7, 5), возникшем спустя два года также в районе желоба, севернее первого очага. Интервалы времени с момента первого Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. оказались, соответственно, примерно равными двум месяцам и двум годам. Таким образом, опасный режим в районе ВЯЗ также может сохраняться в течение нескольких месяцев и даже первых лет. Определенное указание на приближение времени появления еще одного сильного афтершока ВЯЗ может дать слежение за ходом графика зависимости интервалов времени между последовательными афтершоками от номеров повторных толчков. Аналогичные зависимости для Андаманского 2004 г. и Симуширского 2006 г. землетрясений показывают, что сильные повторные события реализовались тогда, когда интервалы времени между последовательными афтершоками начали регулярно превышать несколько суток. Однако наибольшую потенциальную опасность представляет аномалия к югу от очаговой зоны ВЯЗ (Рис. 3в). Эта аномалия существенно более явственно выявляется по данным анализа данных сети F-net на май, чем на апрель месяц. Отметим также, что аномалия в этой области наблюдалась и ранее, на отдельных интервалах времени конкурируя по величине с развивающейся аномалией в области реализовавшегося затем сильного землетрясения ВЯЗ. В случае возникновения в области этой южной аномалии сильного толчка возможны значительные повреждения в районе Токио.

Заключение

Анализ затухания афтершоковой последовательности ВЯЗ за двухмесячный интервал показывает, что умень-



Рис. 4. Очаговые области сильнейших $(M \ge 7, 6)$ землетрясений в районе восточнее о-вов Хоккайдо и Хонсю за период 1900–2011 (март) гг. 1 – очаговые области, оконтуренные по данным об афтершоках первых суток; 2 – границы очаговых областей, проведенные с меньшей точностью.

шение числа событий происходит медленнее, чем для Андаманского землетрясения 2004 г. и примерно так же, как в области Симуширского землетрясения 2006 г. и сильного форшока ВЯЗ. Такие данные могут указывать на потенциальную возможность сильного повторного события в окрестности очага ВЯЗ.

Мониторинг сильной сейсмичности Японии методом анализа поля микросейсмических колебаний за период с 12.03.2011 г. по конец мая 2011 года указывает на формирование двух потенциально опасных зон с юга и с севера от области релаксации тектонических напряжений в очаговой зоне ВЯЗ. Реализация сильного толчка в области южной аномалии в течение ряда лет представляется особенно опасной ввиду ее близости к Токио. Есть указания и на возможность реализации более близкого по времени сильного афтершока в эпицентральной области ВЯЗ в районе Японского желоба.

Литература

- Кособоков, В. Г. (2011), Япония прогноз и реальность, *Вестник ОНЗ РАН, 3*, Информация 110309, http://onznews.wdcb. ru/news11/info 110309.html.
- Любушин, А. А. (2009), Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм, Физика Земли, 5, 15–28.
- Любушин, А. А. (2010), Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация, Физика Земли, 6, 86–96.
- Любушин, А. А. (2011а), Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам, Геофизические процессы и биосфера, 10, 1, 9–35.
- Любушин, А. А. (2011b), Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г., Наука и технологические разработки, 1, 3–12.
- Любушин, А. А. (2011с), Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума, Физика Земли, 6, 26– 34.
- Рикитаке, Т. (1979), *Предсказание землетрясений*, Москва, Мир, 388.
- Родкин, М. В., И. Н. Тихонов (2011), Мега-землетрясение в Японии 11 марта 2011 года: величина события и характер

афтершоковой последовательности, Геофизические процессы и биосфера, 10, 1, 64–80.

- Тихонов, И. Н. (2011), О вероятном сценарии развития афтершокового процесса после землетрясения 11 марта 2011 года в Японии, Вестник ОНЗ РАН, 3, NZ3001, doi:10.2205/2011NZ000102.
- Тихонов, И. Н., Н. Ф. Василенко, Д. Е. Золотухин, Т. Н. Ивельская, А. А. Поплавский, А. С. Прытков, А. И. Спирин (2008), Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года, *Тихоокеанская* геология, 27, 1, 3–17.
- Тихонов, И. Н., В. Л. Ломтев (2011), Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г.: тектонические и сейсмологические аспекты, Геофизические процессы и биосфера, 10, 2, 49–66.
- Шебалин, П. Н., И. А. Воробьева (2006), Алгоритмы прогноза землетрясений, Вычислительная сейсмология, Вып. 37, ГЕОС, 292.
- Gasperini, P., B. Lolli (2006), Correlation between the parameters of the aftershock rate equation: Implications for the forecasting of future sequences, *Phys. Earth Pl. Int.*, 156, 41–58, doi:10.1016 /j.pepi.2006.01.005.
- Lyubushin, A. A. (2008), Multifractal properties of low-frequency microseismic noise in Japan, 1997–2008, Book of abstracts of 7th General Assembly of the Asian Seismological Commission and Japan Seismological Society. Fall meeting, Tsukuba, Japan, 24– 27 Nov. 2008, 92.
- Lyubushin, A. A. (2010a), Synchronization of multifractal parameters of regional and global low-frequency microseisms, European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, 02–07 of May, 2010, Geophys. Res. Abstr., 12, EGU2010-696.
- Lyubushin, A. A. (2010b), Synchronization phenomena of lowfrequency microseisms, European Seismological Commission, 32nd General Assembly, Sept. 06II10, 2010(b), Montpelier, France: Book of abstr. Ses., ES6, 124.
- Lyubushin, A. (2010c), Multifractal parameters of low-frequency microseisms, Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, Chapter 15, 253–272, doi:10.1007/978-3-642-12300-9 15.

А. А. Любушин, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская 10, Москва, Россия.

М. В. Родкин, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, ул. Профсоюзная 84/32, Москва, Россия. (rodkin@mitp.ru)

И. Н. Тихонов, Учреждение РАН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 16, г. Южно-Сахалинск, Россия. (tikhonov@imgg.ru)