

# Великое Японское землетрясение

Б.В.Левин, М.В.Родкин, И.Н.Тихонов

Напомним нашим читателям, что 11 марта текущего года немного восточнее японского острова Хонсю произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой  $M = 9.0$  [1]. В результате этой катастрофы земная ось сдвинулась на величину от 10 до 25 см, а значительный участок о.Хонсю (напротив эпицентра землетрясения) переместился в сторону Тихого океана. Максимальное смещение отдельных пунктов GPS-наблюдений составило около 4.5 м (рис.1). Осложненное разрушительными волнами цунами и техногенными катастрофами на АЭС, землетрясение стало трагедией общенационального масштаба. Число погибших и пропавших без вести составило более 28.5 тыс. Суммарный экономический ущерб оценен правительством Японии более чем в 300 млрд долл. США, а такого рода оценки имеют тенденцию со временем существенно возрастать. Уже сейчас ясно, что основной ущерб (человеческие жертвы и материальные потери) от двух стихийных бедствий (землетрясения и цунами) обусловлен в основном воздействием цунами. При этом масштаб ущерба от вызванной цунами техногенной катастрофы на АЭС «Фукусима-1» по-прежнему остается неясным.

В какой степени удар стихии был неожиданным? Этот вопрос распадается на два: было ли

© Левин Б.В., Родкин М.В., Тихонов И.Н., 2011



**Борис Вульфович Левин**, член-корреспондент РАН, директор Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. Круг научных интересов связан с глобальной сейсмичностью и исследованиями цунами.



**Иван Николаевич Тихонов**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией сейсмологии того же института. Занимается разработкой методов и алгоритмов прогнозирования сильных землетрясений.



**Михаил Владимирович Родкин**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. Область научных интересов — физика и статистика реализации экстремально сильных событий и их прогнозирование.

ожидаемо землетрясение такой силы и существовал ли прогноз именно данного конкретного события? В практическом отношении важно также знать, в ка-

кой степени разгул подземных сил можно считать завершившимся — т.е. можно ли ожидать новых толчков? Мощные землетрясения ведь часто сопровож-

даются афтершоками и даже повторными событиями сравнимой силы.

### Максимально возможное сейсмическое событие

Япония, как известно, характеризуется очень высоким уровнем сейсмической опасности. За историческое время здесь неоднократно случались страшные сейсмические катастрофы. Так, в 1923 г. произошедшее в районе Токио землетрясение магнитудой  $M = 8.3$  унесло жизни (по разным данным) от 99 до 144 тыс. человек. Однако землетрясения, по силе подобного нынешнему событию, с  $M = 9.0$  и при этом неглубокого, за все историческое время не наблюдалось. Если рассматривать только сильнейшие события, то первое такое известное землетрясение ( $M = 8.6$ ) произошло в 869 г. [2], в последующие столетия известны только два события с  $M = 8.6$  и два с  $M = 8.7$ .

Таким образом, исходя из исторических данных за более чем тысячелетний период, можно было полагать, что землетрясения с  $M = 9$  в Японии невозможны. И такое предположение весомо подкреплялось мировым опытом. Сильнейшие события с  $M \geq 9$  были известны только на протяженных (длиной более 1000 км) однородных участках зон субдукции, таких, как в Южной Америке или Индонезии. В Японии таких участков нет. Зона субдукции здесь представлена сложной структурой разноориентированных отрезков. Такой вывод, как считалось, подкреплялся и инструментальными данными: за период 1923–2010 гг. максимальная зарегистрированная магнитуда (по применяемой в Японии шкале) составила 8.3.

Недооценка возможной силы землетрясения привела и к недооценке опасности цунами. Семиметровое ограждение на АЭС «Фукусима-1» оказалось значительно ниже максималь-

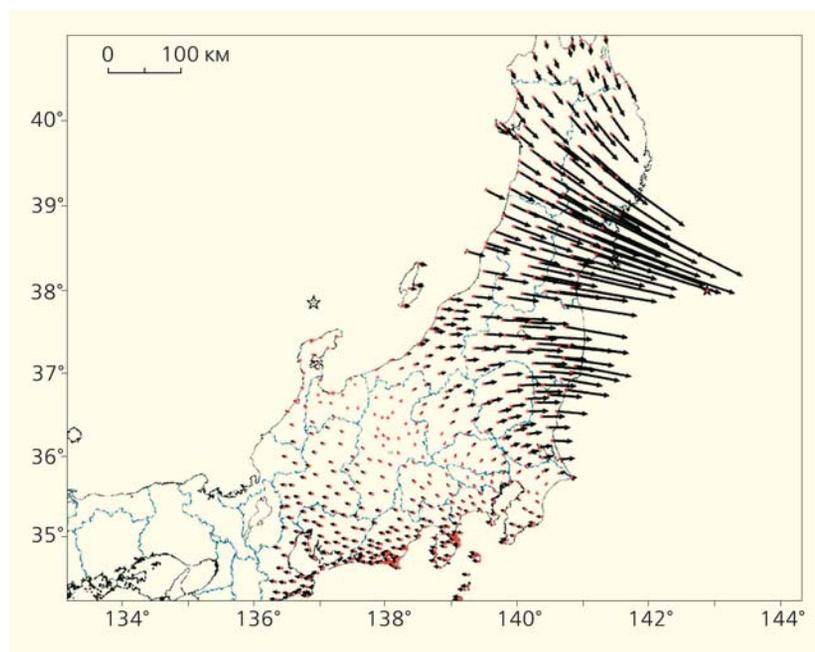


Рис.1. Векторы смещений пунктов GPS-наблюдений на о.Хонсю. Звездочкой показано положение пункта, относительно которого приведены вектора смещения. Рисунок любезно предоставлен японскими коллегами.

ной высоты ( $\approx 14$  м) подошедшей волны. При этом не удалось даже закрыть ворота. Автоматика по неизвестным причинам не сработала, а бригада, пытавшаяся сделать это вручную, погибла под ударом цунами. Ворвавшаяся волна залила дизели и надолго обесточила АЭС. Все реакторы на станции были своевременно заглушены, но тепло продолжало выделяться, а насосы контура водяного охлаждения уже не работали. В результате произошли перегрев реакторной зоны, расплавление стержней АЭС и выбросы перегретого радиоактивного газа.

Трагедия на «Фукусиме-1», таким образом, оказалась следствием двух обстоятельств: недооценки возможной силы землетрясения и высоты цунами и отказа аварийных механизмов защиты от цунами.

Для полноты картины отметим, что существовали и другие предположения о возможности в Японии экстремальных событий. В 2008 г. Р.Мак-Каффри опубликовал статью, где указы-

валось, что сильнейшие землетрясения могут происходить в разных зонах субдукции, в том числе и в Японии [3]. А в 2010 г. группа сейсмологов и статистиков опубликовала статью [4], в которой на основе предельных теорем теории вероятности и по результатам наблюдений за 1923–2007 гг. было показано, что в Японии возможны события с магнитудой  $9.5 \pm 0.8$ . Учитывая печальный опыт текущего года, хочется думать, что теперь к этим результатам отнесутся с большим вниманием и оценки сейсмической опасности многих областей, расположенных вблизи зон субдукции, будут пересмотрены в сторону увеличения. Кроме данных по историческим и палеоземлетрясениям представляется необходимым использовать новые статистические методы оценки величин максимальных сейсмических воздействий. Такой подход — один из способов компенсировать заведомо недостаточную длительность инструментальных наблюдений.

## Еще раз о прогнозах

Под прогнозом землетрясения принято понимать заблаговременное уведомление, содержащее информацию о магнитуде, времени и месте ожидаемого сильного события, желательного с оценкой погрешности прогнозируемых характеристик.

В связи с неудачей многочисленных попыток прогноза землетрясений в мировом научном сообществе начиная с 80-х годов прошлого века доминирует мнение о невозможности получения достаточно точных прогнозов. Об этом мы уже писали на страницах «Природы» [5]. Вместо прогноза рекомендовалось уточнять оценки сейсмической опасности, развивать сейсмостойкое строительство и средства срочного оповещения. В связи с этим непосредственно прогноза нынешнего землетрясения в Японии не было. Средства срочного оповещения сработали — реакторы АЭС своевременно заглушили, но оценки сейсмической опасности и опасности цунами оказались сильно заниженными.

В России исследования по прогнозу землетрясений тем временем продолжались, и некоторые результаты этих исследований связаны с японским событием. По-видимому, единственный неизменный по своей методике и регулярно обновляемый прогноз — среднесроч-

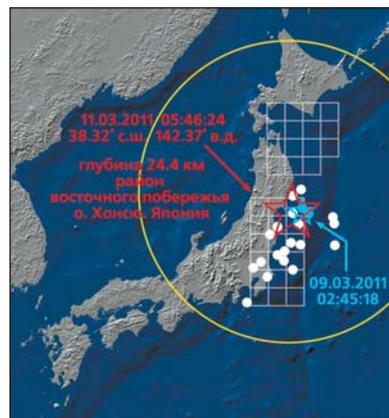
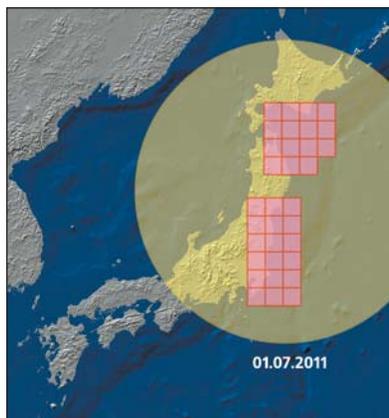


Рис.2. Прогноз (до 1 июля 2011 г.) местоположения эпицентра землетрясения ( $M \geq 8.0$ ) с помощью алгоритма M8 (круговая область), его уточнение алгоритмом MSc (области красного цвета) по состоянию на 1 июля 2010 г. (слева) и положение эпицентров мартовского мегаземлетрясения [8] и его афтершоков (справа). Красной звездочкой показаны эпицентры мегасобытия 11 марта 2011 г., белыми точками — его афтершоков, голубой звездочкой — эпицентры землетрясения 9 марта 2011 г, голубыми точками — его афтершоков.

ный, на основе алгоритмов M8 и MSc [6, 7], осуществляемый сотрудниками Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

Название алгоритм M8 получил по своему первоначальному предназначению — для прогноза событий с магнитудой более 8. Позднее область его применения расширили и на события меньшей и большей магнитуды. Этот алгоритм основан на использовании текущих данных каталогов землетрясений и нацелен на выявление совокупности аномалий

сейсмического режима заданного вида. Алгоритм MSc служит для уточнения пространственной области, где может произойти землетрясение. Длительный (около 20 лет) опыт использования алгоритма M8 свидетельствует о его эффективности, существенно большей случайного угадывания, но недостаточной для реального практического применения.

На обширную область, включающую острова Хоккайдо и Хонсю, был выдан прогноз о сильнейшем землетрясении (рис.2), но он был снят как неподтвердившийся за несколько



месяцев до мартовского события. (Отметим, что алгоритм М8 ранее не спрогнозировал и сильнейшее Андаманское землетрясение 2004 г.)

Большой успех выпал на долю метода [9, 10], развиваемого А.А.Любушиным из Института физики Земли им.О.Ю.Шмидта. Этот прогноз, основанный на анализе низкочастотных сейсмических шумов, использует несравненно больший объем фактической информации и еще более сложный математический аппарат, чем алгоритм М8. Метод Любушина применим только в тех регионах, где имеется достаточно плотная сеть цифровых сейсмических станций, регулярно предоставляющих записи широкополосных сейсмических шумов (реально такие возможности пока есть только в Японии). Любушин пытается выявить скрытые признаки роста синхронизации сейсмических шумов. Исходя из общих теоретических предпосылок, именно такое поведение следует ожидать при надвигающейся катастрофе. Действительно, сильное событие отвечает единообразной мгновенной деформации огромных объемов земной коры, и резонно предположить, что с приближением землетрясения будет развиваться некое единообразие в характере деформирования литосферы, в частности в характере сейсмических шумов. Собственно гово-

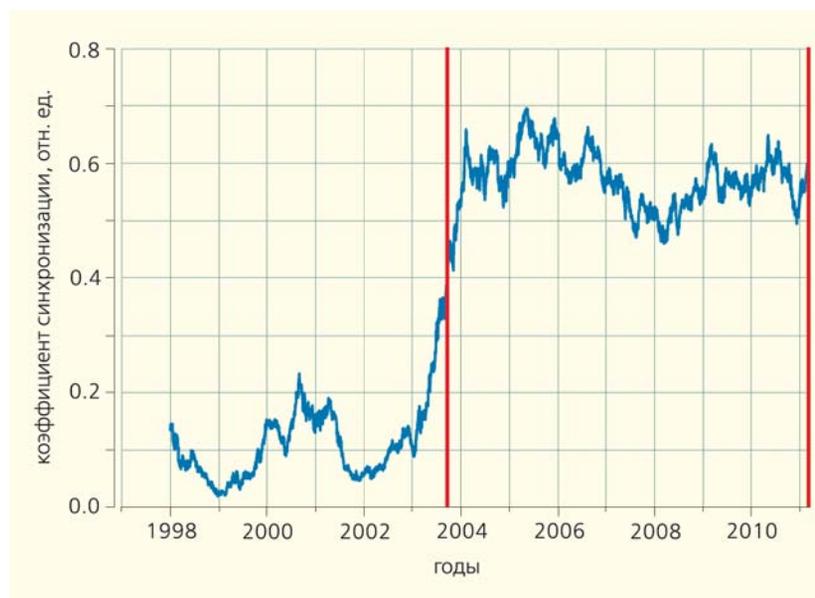


Рис.3. Рост величины обобщенной синхронизации для Японии по методу А.А.Любушина [9]. Красными линиями отмечены моменты землетрясений 25 сентября 2003 г. ( $M = 8.3$ ) и 11 марта 2011 г. ( $M = 9$ ).

ря, алгоритм М8 также в значительной мере нацелен на выявление общих признаков (предвестников) катастрофы, но используемый в нем объем информации много меньше (анализируются только данные о землетрясениях, а не характер шумов), соответственно, и вероятность случайной погрешности может быть существенно выше.

В методе Любушина анализируются коэффициент множественной синхронизации мультифрактального спектра сингулярности и ряд других близких

по смыслу параметров (просим извинения у читателей за столь сложное словосочетание, но необходимо хоть как-то обозначить сущность метода). Рассчитывая коэффициент синхронизации, Любушин обнаружил, что незадолго до сильного землетрясения у берегов Хоккайдо 25 сентября 2003 г. с  $M = 8.3$  величины множественной синхронизации сейсмических шумов резко возросли (рис.3). После землетрясения эти значения, однако, лишь слабо уменьшились, что дало основание го-



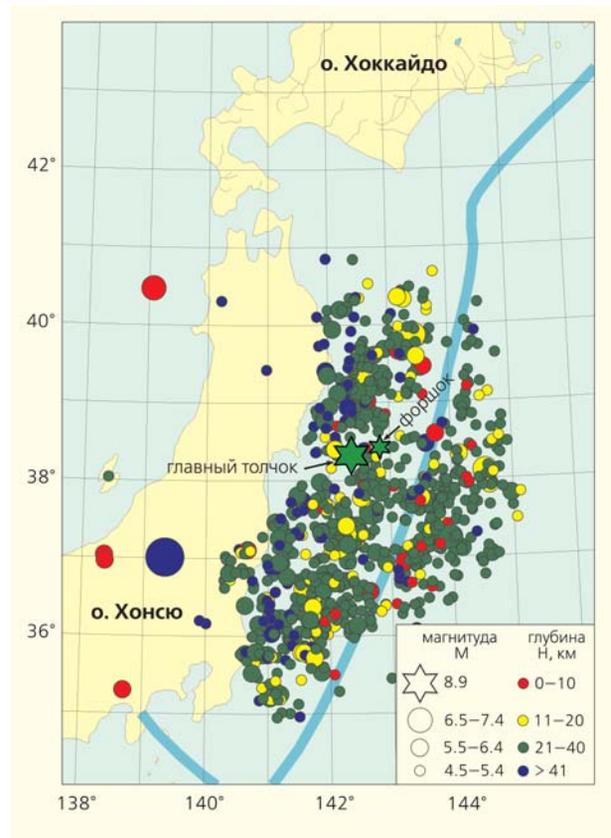
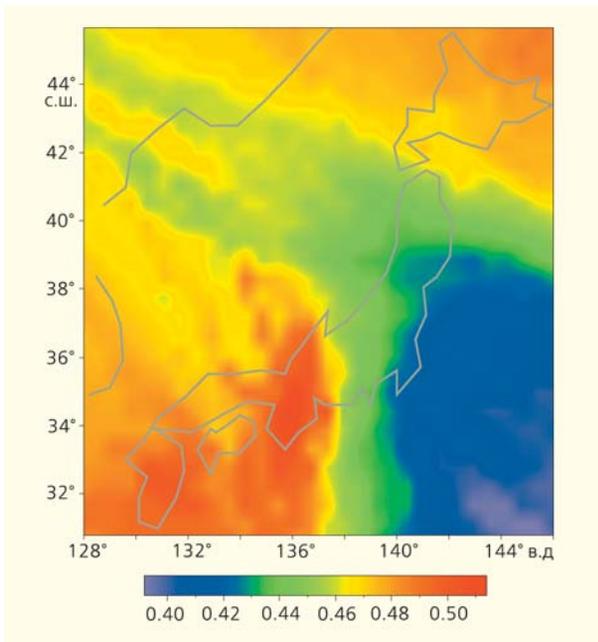


Рис.4. Пространственное распределение значений обобщенной синхронизации, по данным с 1997 г. по февраль 2011 г. (слева). Яркая выраженная синяя аномалия отвечает положению Великого Японского землетрясения и его афтершоков [10]. Расположение афтершоков с  $M \geq 4.6$  за 25 сут [11] (справа).

ворить о готовящемся еще одном сильном событии. А так как аномалия выглядела существенно солиднее, чем при землетрясении 2003 г., было резонно предположить, что новое землетрясение должно иметь магнитуду не менее 8.5. Более тонкие методы анализа позволили автору метода детализировать прогноз, предположив, что зем-

летрясение произойдет начиная с середины 2010 г.

Научная общественность и, в частности японские сейсмологи, которых Любушин неоднократно пробовал заинтересовать своими результатами, не отнеслись к его прогнозу сколько-нибудь внимательно. Но произошло Великое Японское землетрясение, и интерес к этому методу

резко возрос — тем более что уже после события Любушину удалось показать, что его метод позволял определить и место катастрофы. Максимум синхронизации попал как раз на область возникновения землетрясения и его афтершоков (рис.4).

Можно заметить, однако, что на настоящий момент отсутствуют какие-либо другие (пусть



даже ретроспективные) примеры удачного прогноза, сделанного этим методом.

Перспективность и теоретическая значимость представленного Любушиным нового метода прогноза землетрясений не вызывает сомнений. Практическая же его ценность, однако, пока не столь очевидна. Во-первых, метод требует тщательного обоснования и проверки. Во-вторых, на настоящий момент он претендует только на долгосрочный и (возможно) среднесрочный прогноз (годы, месяцы). А в таком качестве его ценность не принципиально выше методов сейсмического районирования. Возможно, этим обстоятельством отчасти и объясняется изначально незаинтересованное отношение японских специалистов к результатам Любушина.

### Новое землетрясение возможно?

Обратимся теперь к вопросу, следует ли ожидать возникновения нового сильного ( $M > 7$ ) афтершока мартовского землетрясения в Японии? Ответ на него можно получить, исследуя характер афтершоковой последовательности данного мегаземлетрясения. Многие приборы на сейсмических станциях Японского метеорологического агентства (JMA) в результате зем-

летрясения вышли из строя. Более полная и однородная информация предоставляется в Интернет Американским сейсмическим агентством (NEIC/USGS), причем его предварительные и уточненные данные существенно различаются. Особенно это касается ранних афтершоков. В предварительной версии указывалось, что за первый час после землетрясения было зарегистрировано только одно сильное событие с  $M = 7.1$ . И такое значение магнитуды было еще раз повторено (но не превышено) в серии последующих афтершоков. Разница между магнитудой основного толчка ( $M = 9.0$ ) и сильнейшего афтершока ( $M = 7.1$ ) составляет около двух единиц. Это означает, что энергия основного толчка примерно в 1000 раз больше энергии сильнейшего афтершока. Такое anomальное различие указывало на повышенную вероятность нового сильного события [10].

Согласно же уточненным данным, сильных землетрясений с  $M > 7$  за первый час после главного события оказалось два ( $M = 7.9$  и  $M = 7.7$ ). Уточненное соотношение магнитуды основного толчка ( $M = 9.0$ ) и сильнейшего афтершока ( $M = 7.9$ ) уже вполне типично и не говорит о повышенной вероятности нового сильного землетрясения. Однако некоторые другие соображения дают основание приздуматься.

Приведем сначала статистику событий, зарегистрированных в течение пяти суток [11]. В первые сутки — 160 толчков с  $M \geq 4.6$  (из них 22 с  $M \geq 6.0$ ); во вторые — 130 (из них семь афтершоков с  $M \geq 6.0$ ); в третьи — 86 (один толчок с  $M = 6.0$ ); в четвертые — 45 и в пятые — 44 толчка. Повторим, магнитуда сильнейшего афтершока, возникшего через 30 мин после главного толчка, составила 7.9.

Далее в течение месяца интенсивность афтершокового процесса постепенно снижалась до уровня ~6–8 событий в сутки. На момент подготовки статьи (чуть более месяца после главного события) зарегистрировано около 720 афтершоков с  $M \geq 4.8$ . При этом преобладающее число гипоцентров отвечало глубинам 20–40 км. Эпицентры повторных толчков заняли огромную область от побережья о.Хонсю до глубоководного желоба протяженностью около 650 км и поперечником около 350 км (рис.4,б).

В среднем афтершоковый процесс описывается известным законом Омори, отвечающим постепенному затуханию сейсмической активности. Однако общая тенденция нарушается значительными всплесками. Часть их отвечает сильным афтершокам, а часть — роям землетрясений без четко выраженного основного события.



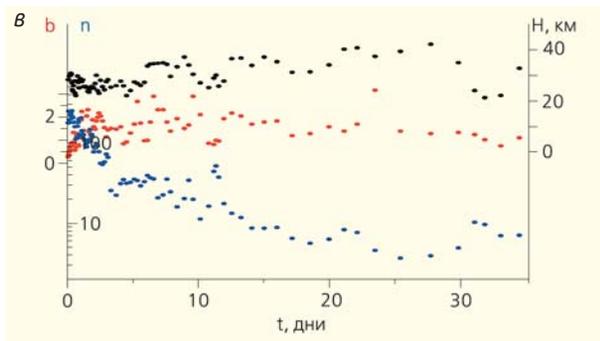
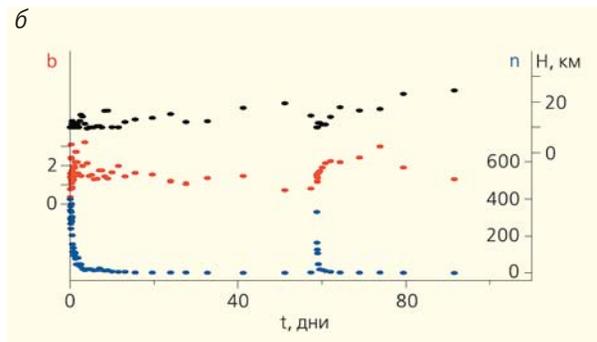
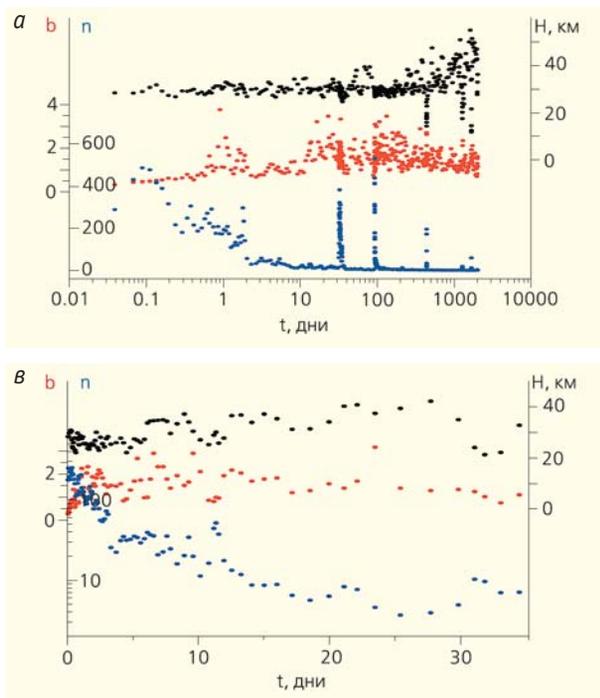


Рис.5. Изменения интенсивности ( $n$ ) потока афтершоков (синие точки), средних значений глубины ( $H$ ) событий (черные точки) и величин наклона графика повторяемости ( $b$ ) землетрясений (красные точки) для афтершоковой последовательности Андаманского землетрясения ( $a$ ), Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. ( $b$ ) и Великого Японского землетрясения ( $v$ ) [14]. Всплеск активности, сопровождаемый уменьшением значений  $H$  и  $b$ , отвечает повторному землетрясению с  $M_w = 8.1$  ( $b$ ). Для мартовского события наблюдается активизация примерно на 10—12-е и на 31—33-е сутки после основного толчка ( $v$ ).

И те, и другие всплески сейсмической активности в большинстве случаев характеризуются уменьшением средней глубины землетрясений и ростом относительного числа более сильных событий (рис.5).

Всплески активности афтершокового процесса, почти всегда сопровождающиеся уменьшением средней глубины событий и увеличением доли более сильных событий, по-видимому, объясняются эпизодами прорыва к поверхности глубинных флюидов. Действительно, подобный прорыв будет сопро-

вожаться уменьшением средней глубины землетрясений, а вызванное им падение эффективной прочности горных пород должно стимулировать объединение соседних ослабленных зон и рост доли более сильных событий. Такой характер сейсмического процесса представляется весьма интересным. Он указывает на важную роль глубинных флюидов в возникновении землетрясений. Впрочем, и в этом вопросе мы снова убеждаемся, что основы современных представлений заложили древние греки. Аристотель

писал, что землетрясения связаны с выдавливанием вод из подземных пещер и аналогичны содроганиям человека при отравлении естественной надобности.

Итак, согласно уточненным данным, различие по силе между главным событием и сильнейшим за месяц афтершоком составляет около единицы магнитуды (а по энергии они различаются примерно в 30 раз). Такое соотношение довольно типично, но следует ли отсюда, что нет оснований предполагать возможности появления



еще хотя бы одного афтершока близкой силы? Вспомним Андаманское мегаземлетрясение и Симуширский дублет — спустя два-три месяца после главного удара там возникли сильные события с магнитудами  $M = 8.6$  и  $M = 8.1$ .

Детализируем, насколько возможно, два основных сценария дальнейшего развития афтершокового процесса японского мегаземлетрясения. В рамках первого сценария предполагается, что и далее продолжится постепенное снижение интенсивности афтершоков при наличии спорадических всплесков сейсмической активности за счет толчков с  $M \sim 6$ . В пользу такого сценария свидетельствует соотношение М.Ботта [15], согласно которому средняя разность магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока составляет немногим более единицы. Рассчитанное нами по данным за 100 лет среднее значение этой величины составило  $0.90 \pm 0.44$ . Уточненное соотношение между основным толчком нынешнего события ( $M = 9.0$ ) и его сильнейшим афтершоком ( $M = 7.9$ ) попадает в этот интервал.

Второй сценарий предполагает, что постепенное затухание сейсмического процесса может быть нарушено сильнейшим афтершоком с  $M \sim 8.0$ . В его пользу свидетельствуют повышенная текущая активность афтершоко-

вого процесса Великого Японского землетрясения и его схожесть с афтершоковыми последовательностями Андаманского и первого Симуширского землетрясений (которые, как известно, сопровождалась спустя соответственно 3 и 2 мес после главного удара афтершоками с  $M = 8.6$  и  $M = 8.1$ ).

Напомним, как проходили сильнейшие повторные толчки Андаманского и Симуширского землетрясений. Афтершок Андаманского с  $M = 8.6$  реализовался на 92-й день афтершоковой последовательности. К этому моменту ее характер приобрел ряд специфических особенностей: с одной стороны, повышенная (по сравнению с законом Омори) интенсивность афтершокового процесса, а с другой — резкие изменения числа афтершоков, вплоть до почти полного замирания (аналогичного фазе сейсмического затишья, часто наступающего перед сильным землетрясением). Столь различное поведение указывает на неустойчивость процесса. На время чуть более месяца спустя после главного события афтершоковый процесс японского события во многом приобрел такой характер.

Если, однако, развитие афтершоков пойдет по андаманскому сценарию, где наиболее вероятно расположится очаг с  $M = 8.0 \pm 0.5$ ? На наш взгляд, здесь возможна реализация сценария,

подобного случаю Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. [11]. В 2006 г. наблюдались две зоны афтершоков: одна вблизи о.Симушир, а вторая — за Курильским желобом. И второе землетрясение с  $M = 8.1$  произошло именно в этой области. Похожую картину распределения эпицентров афтершоков мы видим при Японском землетрясении [13, 14]. Основная область концентрации афтершоков прищывает к о.Хонсю, но есть и второй кластер, расположенный севернее  $37.0^\circ$  с.ш., за глубоководным желобом, который служит разделяющей границей (рис.4,б).

\* \* \*

В заключение кратко коснемся морально-психологического состояния человека и всего общества, внезапно застигнутого серией тяжелых природных и техногенных катастроф. Здесь проявились лучшие качества японского народа: стойкость духа, верность долгу, мужество, готовность к самопожертвованию, терпение, трудолюбие, честность. Всего этого так недостает многим другим народам в часы тяжелых испытаний.

Телевизионные репортажи показывали, как японцы без паники, сохраняя спокойствие и хладнокровие, покидали свои офисы и дома. В Японии не выявлено ни одного факта грабежа и мародерства. Владельцы торговых заведений снижали цены,



хозяева торговых автоматов бесплатно распространяли питьевую воду, потерявших кров и имущество обеспечивали пищей и необходимыми вещами. Ради спасения одного пса, обнаруженного на обломках дома в море, специально посылался вертолет. Жители 20-километровой зоны вокруг АЭС «Фукусима-1» терпеливо переносили тяготы эвакуации, бросив все свое имущество (и не опасаясь, что оно будет расхищено мародерами).

Но есть и негативные моменты. Это не только недооценка опасности цунами при со-

оружии АЭС, но и попытка скрыть от мировой общественности масштабы аварии, нежелание принять помощь и советы специалистов-ядерщиков из других стран, занижение уровня радиационной угрозы в первые дни после катастрофы. Отметим, однако, что недооценка опасности цунами не была вызвана только желанием сэкономить, а имела под собой довольно веские (отмеченные выше) основания. Что касается занижения опасности, то, возможно, это было связано с поспешностью принятия решений — имели место также случаи резкого

(на порядок) завышения уровня радиации.

Отметим, что на момент сдачи статьи в печать сценарий возникновения сильного вторичного землетрясения не реализовался и в настоящий момент вероятность такого события представляется уже достаточно малой. Однако метод Любушина указывает на существование обширной (но не столь сильной, как при подготовке мартовского мегаземлетрясения) зоны сейсмической опасности примерно на широте Токио, к югу от пострадавшего района. ■

## Литература

1. *Пинегина Т.К.* Землетрясение и цунами в Японии // *Природа*. 2011. №5. С.43—51.
2. *Usami T.* Study of historical earthquakes in Japan // *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*. 1979. V.54. Part 3/4. P.399—439.
3. *McCaffrey R.* Global frequency of magnitude 9 earthquakes // *Geology*. 2008. V.36. №3. P.263—266.
4. *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.
5. *Родкин М.В.* Задача: прогноз землетрясения // *Природа*. 2010. №10. С.31—37.
6. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of seismic flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V.61. P.73—83.
7. *Kossobokov, V.G., V.I. Keilis-Borok, and S.W. Smith.* Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* 1990. V.5 №B12. P.19763—19772.
8. *Кособоков В.Г.* Япония — прогноз и реальность // *Вестник ОНЗ РАН*. 2011. Т.3. [http://onznews.wdcb.ru/news11/info\\_110309.html](http://onznews.wdcb.ru/news11/info_110309.html).
9. *Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т.10. №1. С.9—35.
10. *Любушин А.А.* Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // *Наука и технологические разработки*. 2011. Т.90. №1. С.5—14.
11. *Тихонов И.Н., Ломтев В.Л.* Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г.: тектонические и сейсмологические аспекты // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т.10. №2. С.49—66.
12. *Wei D., Seno T.* Determination of the Amurian plate motion, in *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* // *Geodyn. Ser. AGU*. V.27. Washington, 1998. P.419.
13. *Тихонов И.Н.* О вероятном сценарии развития афтершокового процесса после землетрясения 11 марта 2011 г. в Японии // *Вестник ОНЗ РАН*. 2011. Т.3. №Z3001, doi: 10.2205/2011NZ000102.
14. *Родкин М.В., Тихонов И.Н.* Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: величина события и характер афтершоковой последовательности // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т.10. №1. С.64—80.
15. *Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. V.2. №6. P.483—514.
16. *Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е. и др.* Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. // *Тихоокеанская геология*. 2008. Т.27. №1. С.3—17.