

Японское землетрясение 11 марта 2011 года и проблемы краткосрочного прогноза сильных тектонических землетрясений

The Japanese earthquake on the 11th of March 2011 and problems of short-range forecast of strong tectonic earthquakes

ЗАВЬЯЛОВ А.Д.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, д.ф.-м.н., zavyalov@ifz.ru

ZAVYALOV A.D.

The O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, doctor of physical-mathematical sciences, zavyalov@ifz.ru

Ключевые слова: Япония; землетрясение Тохоку-оки (11 марта 2011 г.); форшоки; цунами; афтершоки; тектонические землетрясения; геодинамические последствия; зона субдукции; тектонические плиты; краткосрочный прогноз; уменьшение потерь.

Key words: Japan; the Tohoku-oki earthquake (March 11, 2011); foreshocks; tsunami; aftershocks; tectonic earthquakes; geodynamic consequences; subduction zone; tectonic plate; short-term forecast; reduction of losses.

Аннотация: в статье обсуждается сильнейшее японское землетрясение 11 марта 2011 года (Тохоку-оки) и другие связанные с ним события (форшоки, цунами, афтершоки, геодинамические последствия, другие землетрясения в данной зоне). Рассказывается сейсмическая история региона. Рассматриваются проблемы краткосрочного прогноза сильных тектонических землетрясений и уменьшения потерь от них.

Abstract: the article considers the great Japanese earthquake on the 11th of March 2011 (Tohoku-oki) and other events related to it (foreshocks, tsunami, aftershocks, geodynamic consequences, other earthquakes in this area). The seismic history of the region is told. The problems of short-range forecasts of strong tectonic earthquakes and reduction of losses from them are discussed.

В пятницу 11 марта 2011 года в 14:46:23 по токийскому времени (05:46:23 по гринвичскому) в районе северо-восточного берега острова Хонсю произошло сильное землетрясение. Его очаг располагался в земной коре под дном Тихого океана на глубине 32 км (по уточненным данным). Ближайший населенный пункт на берегу о. Хонсю г. Сендай нахо-

дился на расстоянии 129 км от эпицентра (рис. 1). Расстояние от эпицентра до столицы Японии г. Токио составило 373 км. Уточненная величина моментной магнитуды (M_W), которая рассчитывается по сейсмическому моменту (M_0), составила 9,0 (соотношение между сейсмическим моментом и моментной магнитудой имеет вид: $M_W = 2/3 \log_{10} M_0 - 10,7$).

Именно эта величина позволила поставить рассматриваемое сейсмическое событие на четвертое место в рейтинге сильнейших землетрясений, произошедших на нашей планете с 1900 года (вместе с Камчатским землетрясением 1952 г.) (табл. 1).

На сегодняшний день данное событие получило название *землетрясения Тохоку-оки* (или *Великого японского*) и

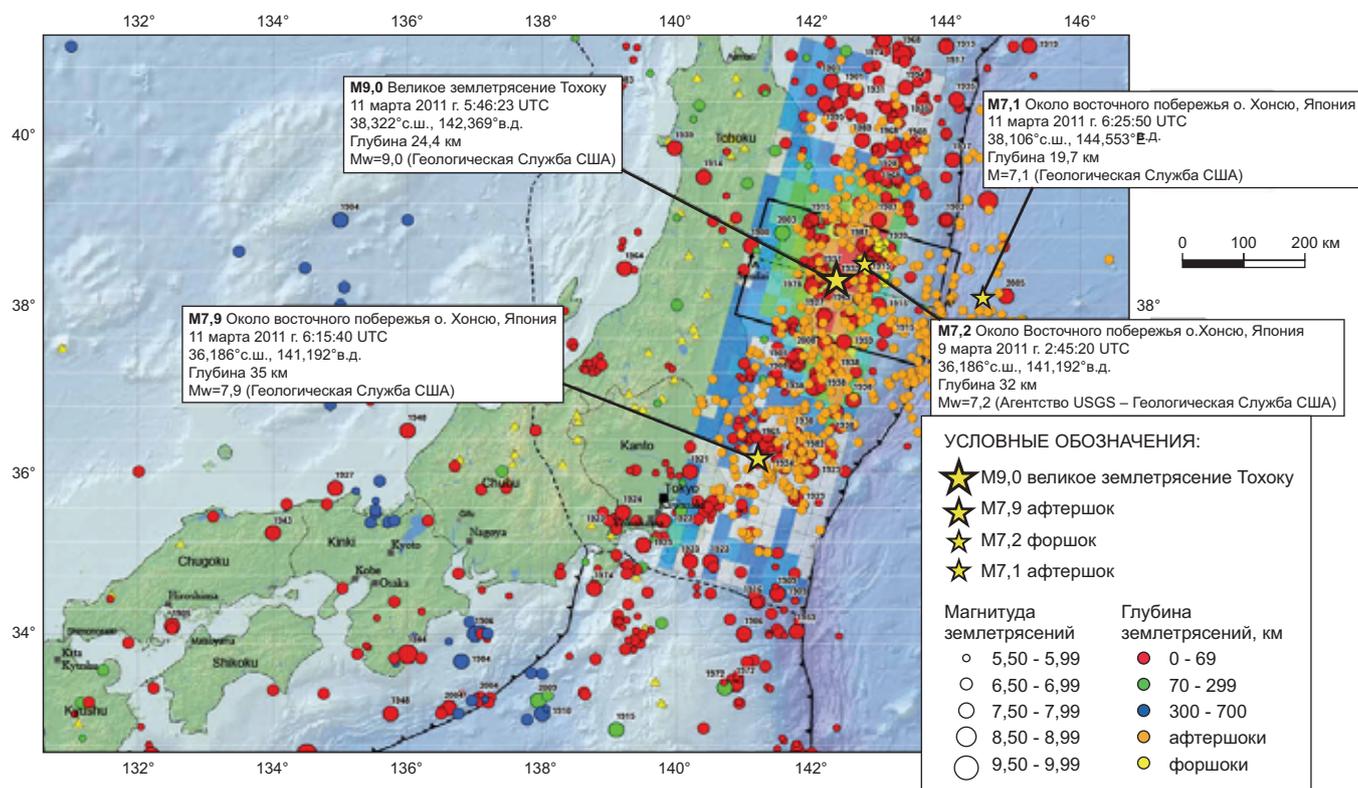


Рис. 1. Эпицентральная зона землетрясения 11 марта 2011 г. На врезках — форшоки и афтершоки с механизмами сильнейших из них. Желтые треугольники — активные вулканы

Таблица 1

Сильнейшие землетрясения мира, произошедшие с 1900 г.				
Район	Дата (по Гринвичу)	Магнитуда	Географические координаты эпицентра	
			Широта	Долгота
Чили	22.05.1960	9,5	-38,290	-73,050
Полуостров Принц Вильям Саунд, Аляска	28.03.1964	9,2	61,020	-147,650
Вблизи Западного побережья острова Северная Суматра	26.12.2004	9,1	3,300	95,780
Около Восточного побережья острова Хонсю, Япония	11.03.2011	9,0	38,322	142,369
Полуостров Камчатка	04.11.1952	9,0	52,760	160,060
У берега области Мауле, Чили	27.02.2010	8,8	-35,846	-72,719
Вблизи побережья Эквадора	31.01.1906	8,8	1,000	-81,500
Крысьи острова, США (Аляска)	04.02.1965	8,7	51,210	178,500
Северная Суматра, Индонезия	28.03.2005	8,6	2,080	97,010
Штат Ассам, Индия (Тибет)	15.08.1950	8,6	28,500	96,500
Андреановы острова, США (Аляска)	09.03.1957	8,6	51,560	-175,390
Южная Суматра, Индонезия	12.09.2007	8,5	-4,438	101,367
Море Банда, Индонезия	01.02.1938	8,5	-5,050	131,620
Полуостров Камчатка	03.02.1923	8,5	54,000	161,000
Граница между Чили и Аргентиной	11.11.1922	8,5	-28,550	-70,500
Курильские острова	13.10.1963	8,5	44,900	149,600

статус *мегаземлетрясения* (планетарного масштаба). Оно пополнило серию таких событий за последние годы, начатую печально известным Суматра-Андаманским землетрясением 26 декабря 2004 года. Обратим внимание, что предыдущий всплеск мегаземлетрясений был зафиксирован в 1952–1964 годах (см. табл. 1).

Огромная энергия (E_S), выделившаяся в результате землетрясения Тохоку-оки и оказавшая воздействие на инфраструктуру о. Хонсю и прилегающих территорий, оцененная по записям широкополосных станций [25], составила $5,1 \times 10^{17}$ Дж, что сравнимо со взрывом 121,9 мегатонны обычного взрывчатого вещества типа ТНТ.

Рассматриваемому землетрясению предшествовал сильный форшок ($M_W = 7,2$), произошедший 9 марта 2011 года (см. рис. 1). Его эпицентр находился в 44 км к северо-востоку от эпицентра главного события.

В числе афтершоков наиболее сильным явилось землетрясение с $M_W = 7,9$, также произошедшее 11 марта, но примерно через полчаса после главного толчка. Второй сильный афтершок с $M_W = 7,1$ произошел через 10 мин. после предыдущего. К концу апреля общее количество повторных толчков с магнитудами более 4,5 превысило 1100.

Землетрясение Тохоку-оки вызвало сильнейшее цунами, которое произвело массовые разрушения на северных островах японского архипелага. Японское метеорологическое агентство

(JMA) оценило его по трехбалльной шкале опасности в три балла ($I_{TS} = 3$). Высота **волн** этого цунами была различной. Максимальная **амплитуда волны** (до 10 м) наблюдалась в префектуре Мияги, где расположен г. Сендай. За считанные минуты цунами достигло побережья — и уже через час после землетрясения аэропорт г. Сендай был полностью выведен из строя. Максимальная высота заплеска составила порядка 38 м.

Волны цунами, возникшие в результате землетрясения 11 марта 2011 года, распространились по всему Тихому океану. Во многих прибрежных странах, в том числе по всему тихоокеанскому побережью Северной и Южной Америки, от Аляски до Чили, было объявлено предупреждение и проводилась эвакуация населения. Однако в этих местах цунами вызвали относительно незначительные последствия, хотя, например, на побережье Чили, которое находится дальше всех от Японии (около 17 000 км), были зафиксированы волны высотой до 2 м.

Максимальная интенсивность сейсмических сотрясений ($I_0 = 9$ по модифицированной 12-балльной шкале Меркалли) наблюдалась в населенном пункте Фурукава, который расположен немного севернее г. Сендай (где I_0 была 8). В Токио и в районе атомной электростанции «Фукусима» интенсивность составила 7 баллов.

Несмотря на высокую интенсивность толчков, разрушения, связанные непосредственно с воздействием на

объекты инфраструктуры упругих сейсмических волн, практически не отмечались. В кадрах видеохроники, показанных по телевидению, было отчетливо видно, как раскачивались небоскребы в Токио. Весьма интересным было интервью с одной японкой, которая заявила, что последние несколько часов, прошедших после землетрясения, она провела в офисе на 50-м этаже, даже не пытаясь покинуть его, поскольку все японцы знают, что небоскребы являются наиболее сейсмостойчивыми зданиями в Японии.

Причиной гибели десятков тысяч людей и разрушения жилых домов и объектов инфраструктуры стало цунами, образовавшееся в результате землетрясения.

Серьезная авария на АЭС «Фукусима-1», произошедшая в результате остановки систем аварийного обеспечения электропитанием систем охлаждения реактора, явилась следствием стратегических просчетов, допущенных при проектировании АЭС.

Произошедшее землетрясение еще раз подтвердило тезис о том, что «не землетрясения убивают людей, а здания» [1]. Здесь уместно заметить, что журнал «Нейче» (Nature) в январе 2011 года опубликовал статью Н. Амбрасейса и Р. Билхама [13], в которой было убедительно показано, что 83% погибших в результате разрушения зданий при землетрясениях, по данным за последние 30 лет, приходится на страны с аномально высоким уровнем коррупции.

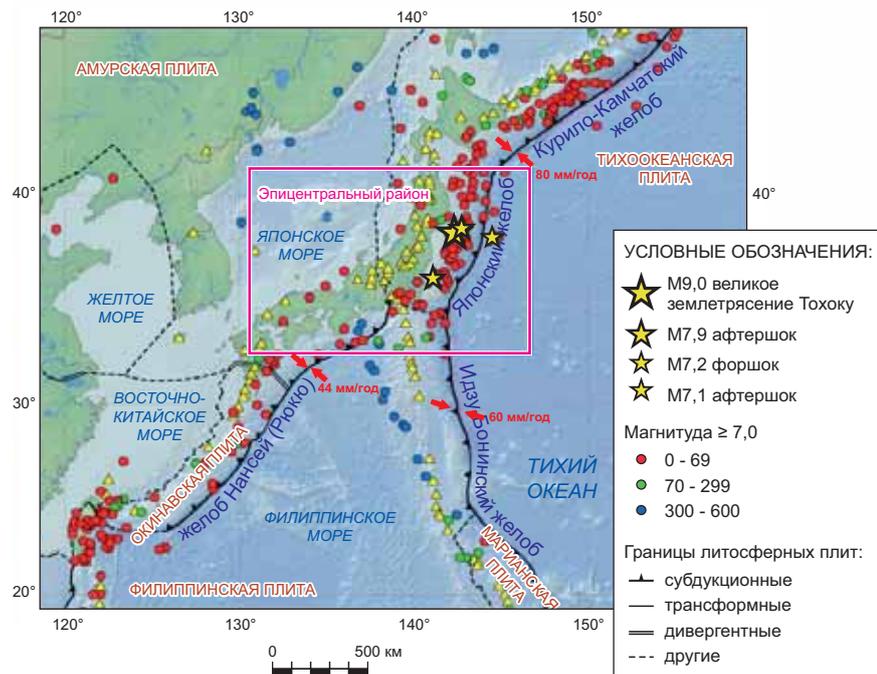


Рис. 2. Тектоническая позиция землетрясения Тохоку-оки. Желтые треугольники — активные вулканы

Тектоническая позиция

Механизмы землетрясения Тохоку-оки и его сильнейших афтершоков, местоположение и глубина его очага являются типичными для землетрясений зон субдукции (рис. 1, 2). В эпицентральной зоне рассматриваемого сейсмического события Тихоокеанская плита перемещается приблизительно в западном направлении со скоростью 83 мм/год, погружаясь под Северо-Американскую плиту в зоне Японского желоба (рис. 3). Некоторые авторы

выделяют в этом регионе несколько еще более мелких плит, в частности Охотскую и Амурскую, которые являются частями Северо-Американской и Евразийской тектонических плит соответственно.

Сейсмическая история

Регион, в котором произошло землетрясение Тохоку-оки, имеет богатую сейсмическую историю. За период с 1900 по 2010 год здесь произошло 12 землетрясений с магнитудой не менее

7,6 (см. табл. 2, рис. 4, а). Последнее из них в эпицентральной зоне рассматриваемого сейсмического события произошло в ноябре 1938 года и имело магнитуду 7,7. Поэтому землетрясение 9 марта 2011 года с $M_W = 7,2$ было вполне ожидаемо в этом районе, и все сочли, что им завершился очередной сейсмический цикл. Но через два дня стало очевидно, что оно было лишь форшоком мегаземлетрясения Тохоку-оки. Справедливости ради следует отметить, что у некоторых японских сейсмологов были догадки о возможности существования в этом районе мегациклов длительностью в сотни лет, поскольку именно здесь в 869 году нашей эры произошло землетрясение с $M_W = 8,6$ (табл. 3), также сопровождавшееся мощным цунами. И эта догадка нашла свое подтверждение 11 марта 2011 года. Очаговая зона произошедшего мегаземлетрясения заполнила 700-километровую «сейсмическую брешь» на карте (рис. 4, б), положив, по-видимому, начало новому сейсмическому мегациклу.

Согласно результатам анализа, проведенного В.Ф. Писаренко и М.В. Родкиным [6, 21], магнитуда максимально сильного возможного землетрясения в Японии оценивается величиной $9,57 \pm 0,86$ с периодом повторяемости события с магнитудой не менее 9 около 1000 лет. Эта оценка хорошо согласуется с предположением о мегацикле, завершившемся землетрясением Тохоку-оки.

Афтершоковый процесс

Землетрясение 11 марта 2011 года сопровождается интенсивным афтершоковым процессом, который завершает процесс разрушения материала в очаговой области и снятие накоплен-

Таблица 2

Каталог землетрясений с $M \geq 7,6$ в районе восточнее островов Хоккайдо и Хонсю за 1900–2010 гг. (по [10, 15, 23])

Дата	Время в очаге JST, ч-мин.	Координаты эпицентра, ° с.ш.; ° в.д.	Глубина, км	Магнитуда	Источник сведений
01.09.1923	11-58	35,1; 139,5	60	7,9	[23]
09.03.1931	12-49	41,2; 142,5	0	7,6	
03.03.1933	02-31	39,1; 144,7	0–20	8,3	
03.11.1936	05-46	38,2; 142,2	50–60	7,7	
05.11.1938	17-43	37,1; 141,7	20	7,7	
04.03.1952	10-23	42,15; 143,85	45	8,1	[15]
16.05.1968	09-49	40,7; 143,6	0	8,2	
16.05.1968	19-39	41,4; 142,9	40	7,7	
17.06.1973	12-55	43,0; 146,0	40	7,8	
15.01.1993	20-06	42,9; 144,4	103	7,6	
28.12.1994	21-19	40,4; 143,7	0	7,7	
26.09.2003	04-50	41,7; 144,2	71	8,3	

Список крупнейших ($M > 8,6$) землетрясений Японии за историческое время (по [7, 23])

Дата	Время в очаге (по Гринвичу), ч-мин.	Координаты эпицентра		Глубина, км	M
		° с.ш.	° в.д.		
13.07.0869	ночью	38,5	143,8	-	8,6
26.08.0887	06–08	33,0	135,3	-	8,6
19.09.1498	22–09	34,1	138,2	-	8,6

ных за сотни лет тектонических напряжений.

Обычно афтершоки сильных землетрясений продолжают по нескольку лет. Они интересны сейсмологам тем, что по их распределению в пространстве определяется конфигурация очага породившего их сильного землетрясения. Именно таким образом были выделены очаговые зоны сильных японских землетрясений с 1900 по 2011 год (включая Тохоку-оки) (см. рис. 4). А с другой стороны, по распределению афтершоков во времени можно высказать определенные суждения о темпе снятия накопленных напряжений, возможном сценарии развития сейсмического процесса и вероятности возникновения в очаговой зоне нового сильного афтершока.

В первые сутки после рассматриваемого землетрясения афтершоки распространялись в основном с севера на юг, совпадая с направлением оси Японского желоба. Основное их количество происходило в пределах зоны шириной не более 100 км (за ее пределами наблюдались лишь единичные события). Южная оконечность облака афтершоков быстро достигла широты Токио. В меньшей степени афтершоки распространялись к северу от эпицентра. Таким образом, можно полагать, что разрыв, образовавшийся в очаге, в большей степени был односторонним. Его длина составляет порядка 700 км.

Механизмы основного толчка и сильнейших афтершоков (см. рис. 1) хорошо согласуются между собой. Выявляются две фокальные плоскости — круто- и пологопадающая, причем обе с простиранием вдоль оси Японского желоба. Если судить по характеру распространения афтершоков, то в первые сутки, по-видимому, «работала» крутопадающая фокальная плоскость. В последующие дни облако афтершоков стало более изометричным, так как стали регистрироваться события к востоку от эпицентра, включая и область, находящуюся за Японским желобом. Вероятно, «в работу включилась» пологопадающая фокальная плоскость.

Распределения облака афтершоков в пространстве и во времени представлены на рис. 5. Их число с течением времени закономерно уменьшается, подчиняясь известному закону Омори.

Несмотря на большое количество афтершоков (более 1200 за два месяца, прошедших после основного землетрясения), их энергетика достаточно слаба, то есть выделяющаяся при них сейсмическая энергия недостаточна для понижения уровня накопленных в очаге тектонических напряжений до безопасного уровня. Это хорошо видно из графика кумулятивного сейсмического момента (рис. 6) [3].

Суммарный скалярный сейсмический момент (M_{0cum}), высвободившийся в афтершоках с 11 по 23 марта 2011 г., составил $3,68 \times 10^{20}$ Нм, или приблизительно 2,13% от M_0 главного события. Разность между прогнозным и фактическим значениями M_{0cum} составляет текущий дефицит в высвобождении M_{0cum} . К утру 23 марта такой дефицит достиг примерно $3,7 \times 10^{20}$ Нм, что свидетельствует о возможности возникновения повторного события с магнитудой порядка $8,0 \pm 0,5$. Аналогичное мнение, основанное на результатах статистического анализа афтершоков ряда сильнейших землетрясений, высказывается и в работах [9, 10]. Однако дать прогноз относительно того, когда это повторное событие произойдет, весьма затруднительно. Например, после Суматра-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 года, имевшего магнитуду $M_W = 9,1$, сильнейший афтершок с $M_W = 8,6$ произошел только спустя три месяца — 28 марта 2005 года. Так что в этом отношении необходим дальнейший мониторинг и тщательный анализ афтершокового процесса. На момент написания данной статьи (середина мая 2011 года) афтершок землетрясения Тохоку-оки с такой высокой магнитудой еще не произошел.

Геодинамические последствия

Землетрясение такого масштаба, как Тохоку-оки, не могло не вызвать изменений в геодинамике рассматриваемого региона. Сейчас еще рано судить об изменениях океанического дна в очаговой зоне, поскольку эти исследования требуют времени и значительных финансовых затрат. Но результаты предварительного анализа первых данных наземной и космической геодезии уже получены. Они показывают, что после землетрясения северная часть

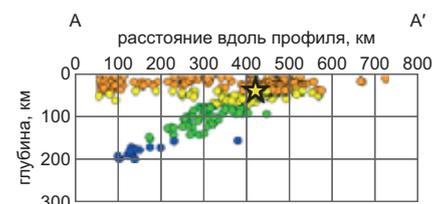


Рис. 3. Разрез вкрест простирания фокальной зоны по линии А-А' (см. рис. 1). Звездочкой показан гипоцентр землетрясения Тохоку-оки. По оси ординат — глубина в км

о. Хонсю сместилась на восток (в сторону Тихого океана) на расстояние до 4 м и опустилась в среднем на 0,5 м (максимум 1,1 м в восточной части префектуры Мияги) (рис. 7). Причем данные наблюдений хорошо совпадают с результатами моделирования.

Такое распределение смещений и полученные решения для механизма очага землетрясения Тохоку-оки говорят о том, что произошел надвиг Охотской тектонической плиты на Тихоокеанскую.

Сотрудник Геологической службы США Гэвин Хайес (Gavin Hayes) смоделировал распределение подвижек в очаге главного толчка с использованием модели конечных разрушений (Finite Fault Model). Было показано, что в очаговой области произошли смещения одного берега разрыва относительно другого величиной до 32 м на протяжении примерно 300 км вдоль Японского желоба и около 150 км по направлению падения пологой плоскости разрыва (рис. 8).

О прогнозе землетрясения Тохоку-оки

Имелись ли заранее какие-нибудь данные о возможности возникновения катастрофического землетрясения в районе о. Хонсю? Как оказалось, да. Анализ мультифрактальных параметров низкочастотного микросейсмического шума по данным сети широкополосных сейсмических станций F-net, работающей в районе Японских островов (рис. 9), еще в 2007 году позволил А.А. Любушину определить исходя из известного положения теории катастроф, что синхронизация является одним из свидетельств в пользу грядущего мощного землетрясе-

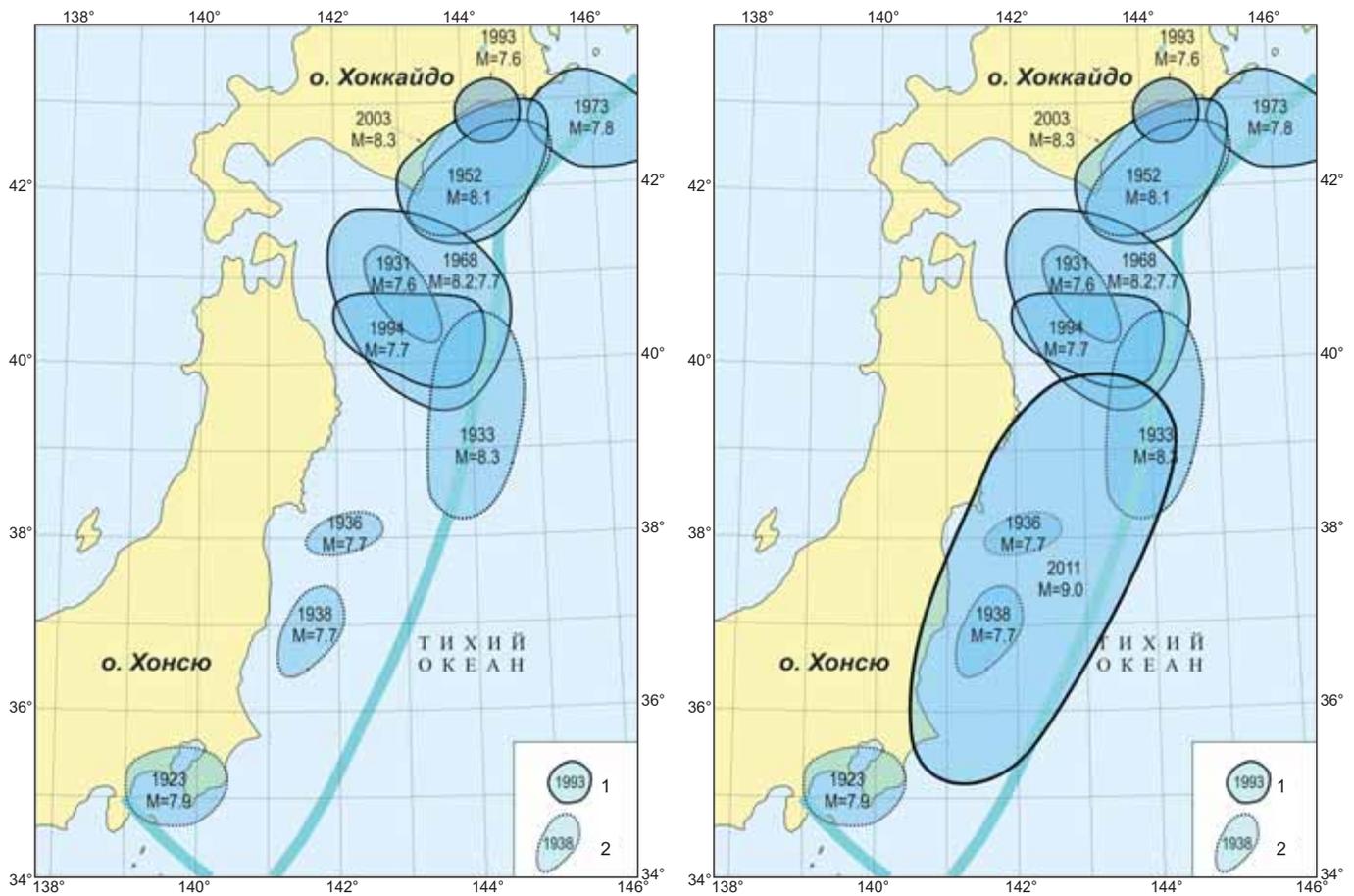


Рис. 4. Очаговые области сильнейших ($M \geq 7,6$) землетрясений в районе восточнее островов Хоккайдо и Хонсю за периоды с 1900 по 2010 г. (а) и с 1900 по март 2011 г. (б) [10]: 1 — очаговые области, оконтуренные по данным об афтершоках первых суток; 2 — границы очаговых областей, проведенные с меньшей точностью. Данный рисунок иллюстрирует заполнение афтершоками японского мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. «сейсмической бреши», расположенной южнее 39° с.ш. и существовавшей до 2011 г.

ния [14], и выдвинуть гипотезу о приближении рассматриваемого региона к крупному сейсмическому событию [4, 5, 16–19]. Признаком этого явилось уменьшение ширины носителя спектра сингулярности (рис. 10), который после землетрясения Токачи-оки 25 сентября 2003

года ($M_w = 8,3$) не вернулся к прежней величине.

Поэтому можно предположить, что событие на о. Хоккайдо, несмотря на свою силу ($M_w = 8,3$), является всего лишь форшоком еще более сильного землетрясения, готовящегося в рай-

оне Японских островов. Количественная оценка магнитуды будущего толчка $M = 8,5 - 9,0$ базировалась лишь на здравом смысле: нижняя граница ($M = 8,5$) основана на предположении, что магнитуда главного толчка должна быть больше магнитуды форшока, а верхняя ($M = 9,0$) была выбрана из соображений, что «больше не бывает» [4]. В дальнейшем результаты привлечения новых данных и анализа других статистических величин микросейсмического фона на станциях сети свидетельствовали о все большей синхронизации параметров микросейсмического фона и, таким образом, о повышении сейсмической опасности. Анализ свойств кластеризации параметров микросейсмического фона позволил сделать вывод, что именно после середины 2010 года Японские острова вступают в опасную фазу развития сейсмического процесса. Как мы теперь видим, рассмотренный прогноз оказался успешным.

Еще один прогноз был сделан В.Г. Кособоковым, который использовал в качестве основного известный алгоритм для среднесрочного прогноза «Магнитуда 8» (M_8) и уточняющий его алго-

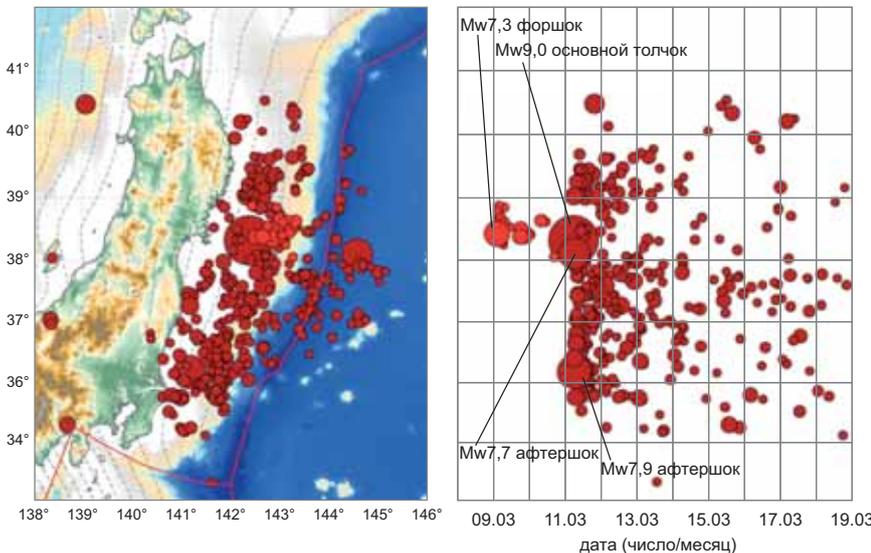


Рис. 5. Форшоки и афтершоки землетрясения Тохоку-оки за период 8–16 марта 2011 г. Величина окружностей пропорциональна магнитуде землетрясений

ритм «Сценарий Мендосино» (MSc) (рис. 11). На рисунке 11 слева изображена область (окружность), в пределах которой по состоянию на 1 июля 2010 года был диагностирован период повышенной вероятности (ППВ) возникновения землетрясения с магнитудой больше 8,0 до 1 июля 2011 года с помощью алгоритма M8, а также были определены наиболее опасные области (красные полупрозрачные прямоугольные) с использованием алгоритма MSc. Этот ППВ был преждевременно снят при обновлении прогноза в январе 2011 года. Справа на рис. 11 на фоне прогнозов июля 2010 года отмечены эпицентры мегавзброса 11 марта 2011 года (красная звезда) и его первых повторных толчков (белые точки), а также землетрясения-форшока 9 марта 2011 года (голубая звездочка) и его афтершоков (голубые точки). Таким образом, прогноз по алгоритмам M8 и MSc при следовании формальным правилам их использования оказался неудачным.

Прогноз, представленный П.Н. Шебалиным [12], фактически оказался успешным. Но он был сделан уже после того, как землетрясение Тохоку-оки произошло. Этот автор использовал разработанный им алгоритм прогноза сильных землетрясений, основанный на «обратном прослеживании предвестников» (Reverse Tracing of Precursors — RTP) [11]. В рассматриваемом сейсмоактивном регионе по данному алгоритму сначала выделяются пространственно-временные кластеры землетрясений

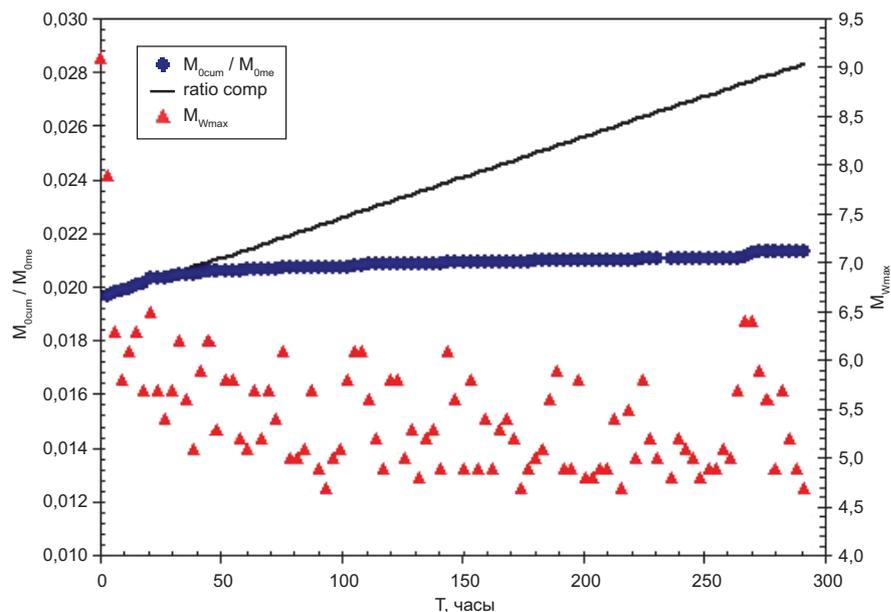


Рис. 6. Высвобождение скалярного сейсмического момента (M_{0cum}) в афтершоках первых 11 суток в долях от скалярного момента главного события (M_{0me}) — землетрясения Тохоку-оки (синяя кривая): прямая линия (ratio comp) — линейная аппроксимация высвобождения M_0 за первые 21 ч после главного события (прогнозная кривая); интервал дискретизации — 3 ч; красные треугольники — магнитуды максимальных на каждом шаге дискретизации афтершоков (M_{Wmax} , правая ось ординат)

средней силы, названные «цепочками землетрясений». Такие цепочки, как правило, возникают перед сильными

сейсмическими событиями, однако не всегда удается найти такую параметризацию, чтобы их число лишь немного

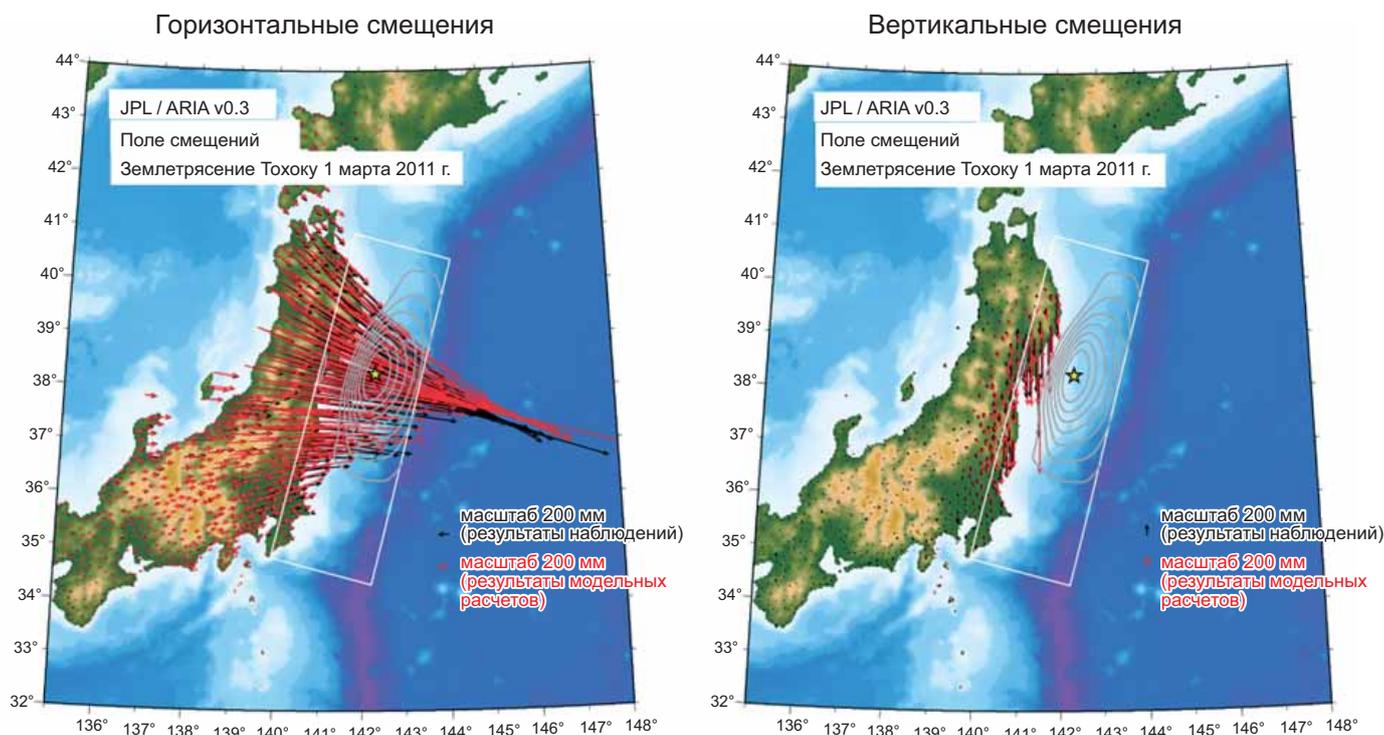


Рис. 7. Распределение горизонтальных (слева) и вертикальных (справа) смещений о. Хонсю: звездочка — положение эпицентра главного толчка; черные стрелки — результаты наблюдений по GPS-данным, красные стрелки — результаты моделирования (длина стрелок пропорциональна величине смещения)

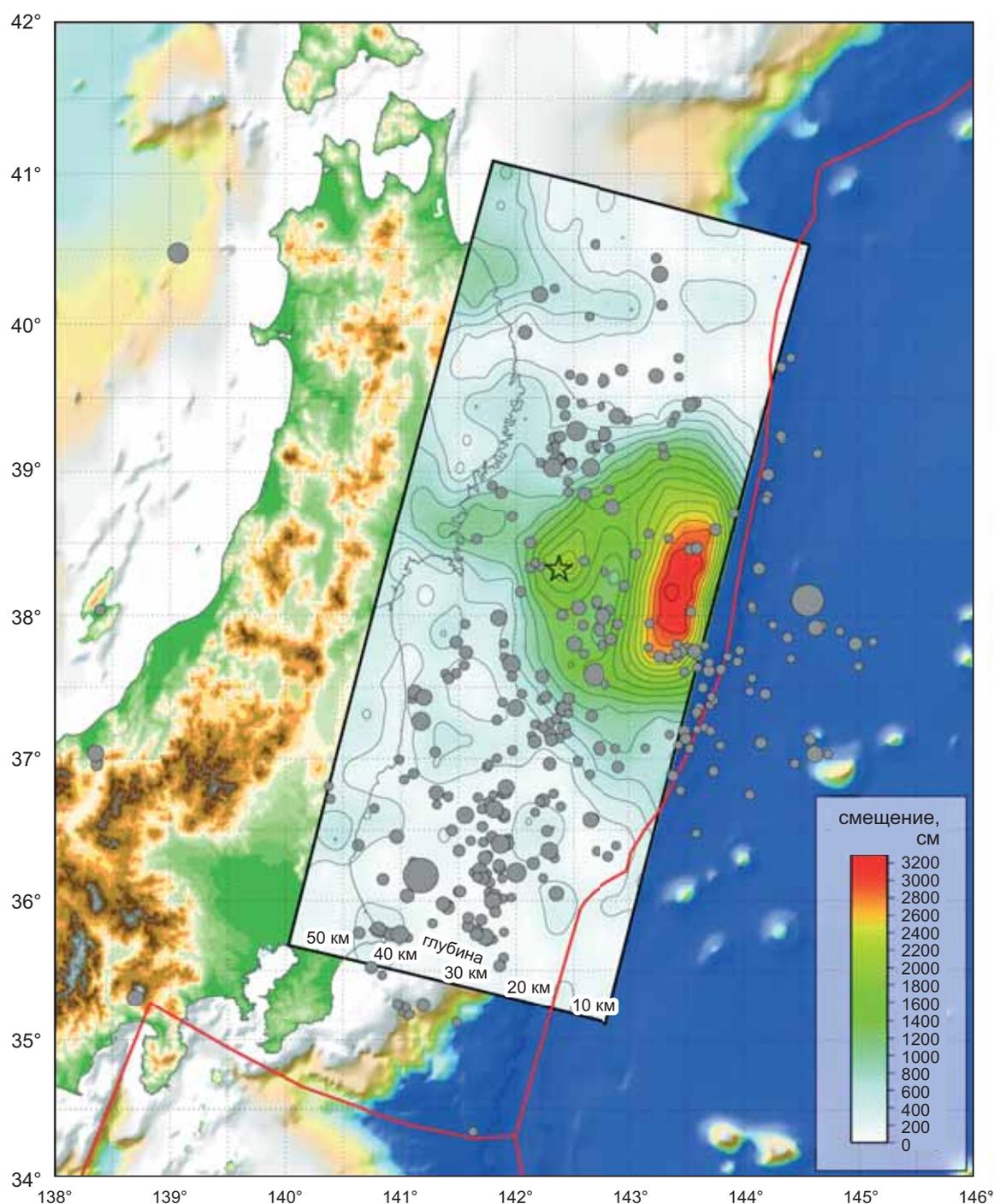


Рис. 8. Проекция распределения смещений на пологопадающую плоскость разрыва в очаге землетрясения 11 марта 2011 г.: красные линии — основные границы плит; серые кружки — афтершоки, величина которых пропорциональна их магнитуде

превышало количество сильных землетрясений. Для уменьшения числа цепочек, являющихся «ложными тревогами», было предложено рассматривать известные среднесрочные предвестники в их пространственной области и перед началом их возникновения, а затем с помощью процедуры распознавания отсеивать ложные тревоги. Эти действия, выполняемые последовательно, в комплексе, были названы «обратным отслеживанием предвестников». Из рисунка 12 видно, что и само мегаземлетрясение 11 марта 2011 года, и его форшок, и сильнейшие афтершоки попали в выделенную зону тревоги.

А.И. Лутиков [3] также уже после землетрясения Тохоку-оки проанализировал ход накопления сейсмического момента в его очаговой области (рис. 13). Период времени с 1970 года по февраль 2011 года может рассматриваться как выраженная фаза «сейсмического затишья» перед катастрофическим землетрясением 11 марта 2011 года, к концу которой в начале марта 2011 года дефицит M_{0cum} достиг значения $1,22 \times 10^{22}$ Нм, что соответствует землетрясению с $M_W \approx 8,7$. Эта оценка неплохо согласуется с реальной моментной магнитудой землетрясения 11 марта ($M_W = 9,0$).

Пути решения проблем краткосрочного прогноза тектонических землетрясений и уменьшения потерь от них

После сильного землетрясения, произошедшего 6 апреля 2009 года в центральной части Италии (с $M_W = 6,3$ и глубиной гипоцентра $H = 8,8$ км), в результате которого был сильно разрушен город Л'Аквила (**L'Aquila**) и погибли люди, правительство Италии обратилось к мировому научному сообществу с просьбой о создании специальной комиссии экспертов, которая дала бы оценку современному состоя-

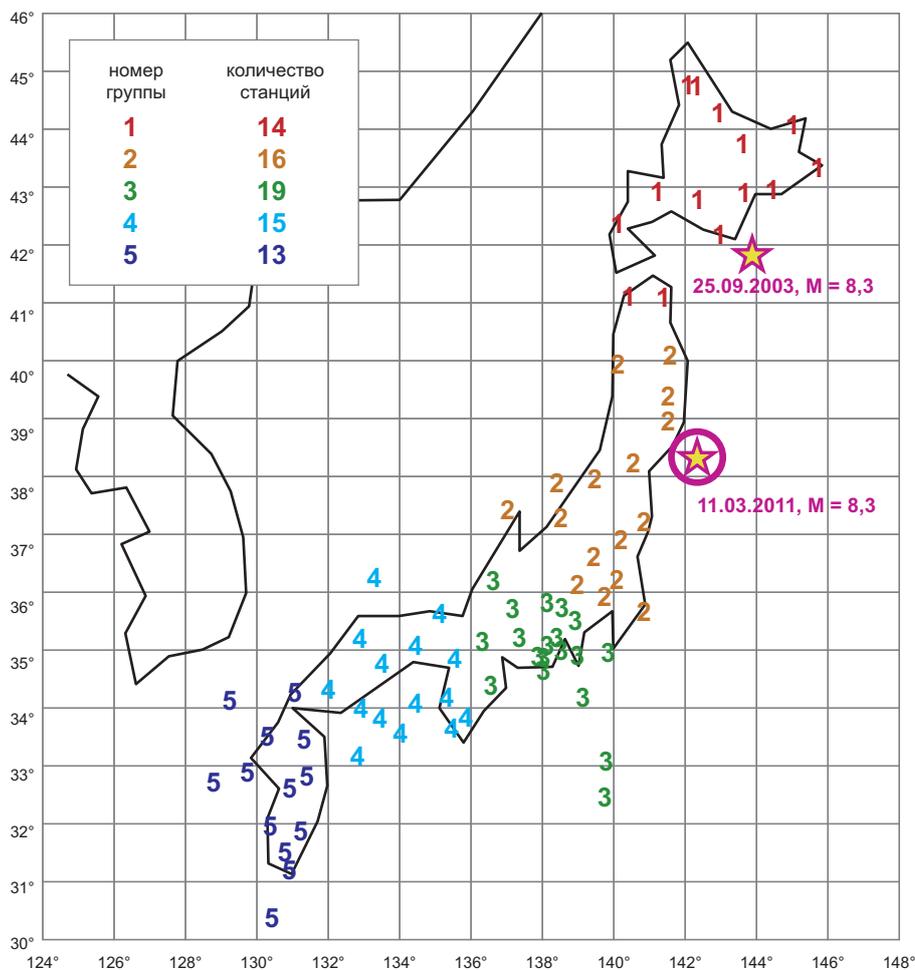


Рис. 9. Положения 77 широкополосных сейсмических станций сети F-net и их разбиение на пять пространственных кластеров с указанием числа станций в каждом. Звездами обозначены гипоцентры землетрясений 25.09.2003 г. ($M_w = 8,3$) и 11.03.2011 г. ($M_w = 9,0$)

нию проблемы прогноза сильных землетрясений, и в частности ответила бы на вопрос о возможности краткосроч-

ного прогноза произошедшего землетрясения. В комиссию вошли 10 экспертов из США, Китая, Италии, Фран-

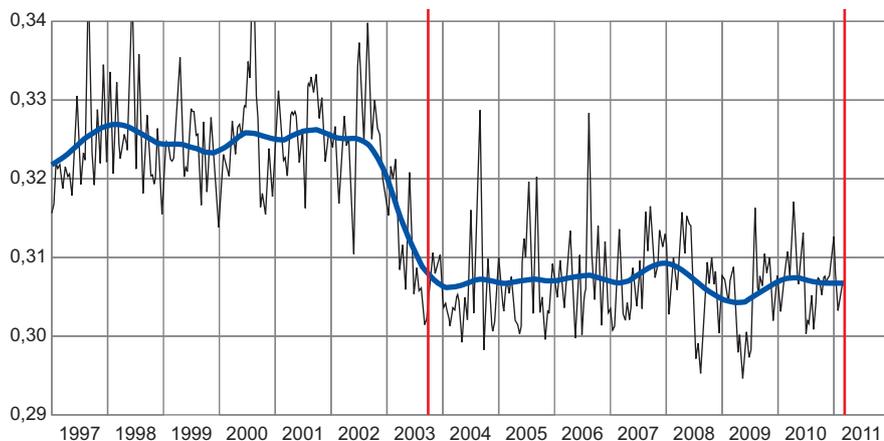


Рис. 10. Сглаженные кривые значений медиан для оценок ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности в последовательных временных окнах длиной 30 мин для исходных вертикальных сейсмических записей с частотой дискретизации 1 Гц; черная кривая — гауссовское ядерное сглаживание в окне радиуса 27 сут (черная кривая) и 1 год (синяя кривая); вертикальные линии соответствуют моментам землетрясений Токачи-оки 25.09.2003 г. ($M_w = 8,3$) и Тохоку-оки 11.03.2011 г. ($M_w = 9,0$)

ции, Великобритании, Греции, России, Японии и Германии, пользующихся высоким авторитетом в мировом геофизическом сообществе.

Перед комиссией были поставлены две задачи [20]: (1) оценить современное состояние знаний о возможностях краткосрочного прогноза тектонических землетрясений; (2) выработать руководящие принципы для использования возможных предвестников сильных землетрясений в работе службы гражданской защиты, включая использование вероятностного анализа сейсмической опасности.

В результате нескольких месяцев работы члены данной комиссии выработали следующие рекомендации [20] (комментарии к ним опубликованы в работе [8]):

1) следует продолжить развитие вероятностных подходов к прогнозированию землетрясений и создать инфраструктуру и экспертную систему, необходимые для практического использования информации, представляемой в вероятностной форме;

2) необходимо координировать работу различных организаций с целью ускорения процедур обработки и получения данных (в частности, сейсмических и геодезических) для их практического использования в прогнозе землетрясений;

3) особые усилия должны быть направлены на сбор и анализ сейсмических данных в реальном времени, на своевременное составление высококачественных сейсмических каталогов и карт скоростей деформаций;

4) следует использовать любые благоприятные возможности для создания хорошо оборудованных природных лабораторий с целью изучения процессов генерации землетрясений;

5) программы фундаментальных исследований, нацеленные на научное понимание землетрясений и их предсказуемости, должны быть частью сбалансированных национальных программ по развитию практического использования прогнозов;

6) следует продолжать реализовывать целенаправленные исследовательские программы по развитию зависящих и независящих от времени прогностических моделей с целью улучшения карт долгосрочной сейсмической опасности, ориентированных на практическое использование в прогнозных целях;

7) необходимо совершенствовать методы прогноза афтершоков;

8) следует поддерживать развитие методов прогноза землетрясений, основанных на изменениях сейсмичности, для количественных оценок краткосрочных вариаций вероятностей;

9) методы прогноза, предназначенные для практического использования, должны быть научно протестированы на имеющихся данных для определения их надежности и эффективности (как

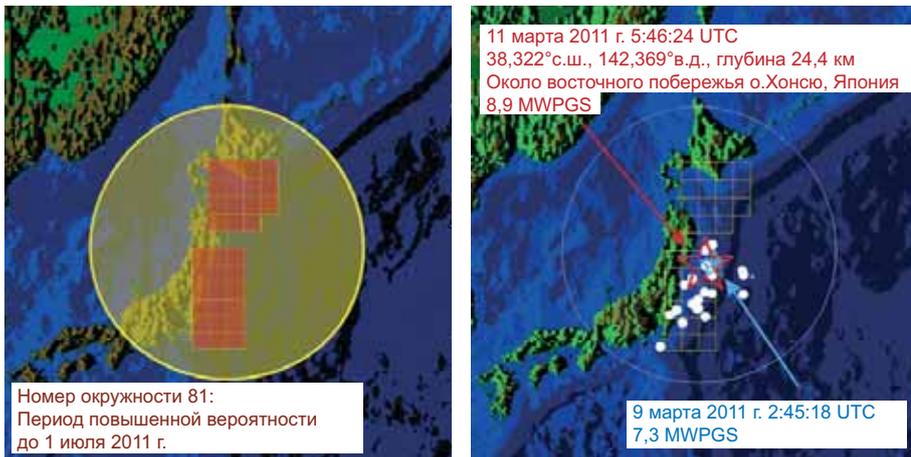


Рис. 11. Результаты прогноза землетрясения Тохоку-оки 11.03.2011 г. ($M_w = 9,0$) по алгоритмам M8 и MSc

ретроспективно, так и в реальном времени); все используемые в практике прогноза модели должны постоянно находиться в режиме тестирования в реальном времени;

10) международная инфраструктура (сеть центров тестирования международного проекта «Сотрудничество по изучению предсказуемости землетрясений», или Collaboratory of the Study on the Earthquake Predictability — CSEP), созданная для проверки прогнозных методов, в будущем должна быть использована в качестве инструмента для проверки прогностических моделей;

11) должен быть создан независимый совет экспертов для оценки методов прогноза и интерпретации их результатов; его решения должны напрямую направляться руководителю органа, ответственного за безопасность населения;

12) необходимо выработать ясные количественные протоколы для принимающих решения административных органов с указанием того, какие должны быть приняты меры, если уровень вероятности прогноза превысит определенный порог;

13) организациями, ответственными за безопасность людей, должна проводиться политика информирования населения сейсмоопасных районов о сейсмической обстановке (в сотрудничестве с организациями-партнерами и в соответствии с принципами науки об эффективных связях с населением).

«36-ая Генеральная Ассамблея Международной Ассоциации по Сейсмологии и Физике Недр Земли (МАСФНЗ), проходившая в 28 июня – 8 июля 2011 г. в Мельбурне в рамках 25-ой Генеральной Ассамблеи Международного

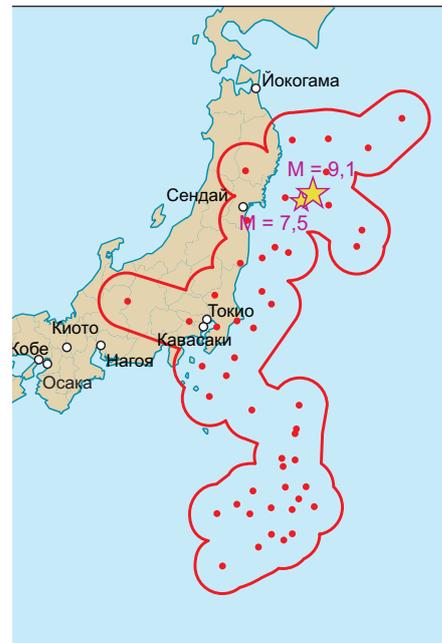


Рис. 12. Область тревоги по алгоритму RTP на период с 7 марта по 7 декабря 2011 года: звездочки — эпицентры землетрясений 09.03.2011 ($M = 7,5$) и 11.03.2011 ($M = 9,1$); красные точки — центры элементарных ячеек прогноза

Геодезического и Геофизического Союза (МГТС), в одной из своих резолюций одобрила эти выводы комиссии.»

Заключение

Проблема прогноза землетрясений, несмотря на ряд положительных результатов, полученных в последние десятилетия, еще очень далека от своего решения. И вряд ли в ближайшие годы появятся надежные и экономически оправданные прогнозы — настолько сложна эта задача, требующая слишком больших сил и средств. С другой стороны, успешные прогнозы не избавят человечество от землетрясений, которые все равно будут происходить и причинять ущерб многим зданиям и сооружениям. Кроме того, можно ли будет осуществить в требуемые сроки эвакуацию населения таких многомиллионных мегаполисов, как Токио, Сан-Франциско, Пекин?

В таком случае правомерен вопрос: «А для чего тогда вообще нужно прогнозировать землетрясения?» Дело в том, что люди не могут жить в состоянии постоянной готовности к возникновению землетрясения. Вполне естественно, что со временем чувство опасности притупляется. Тогда реальный прогноз будет сигналом к приведению в повышенную готовность отрядов спасателей, отключению газо- и нефтепроводов, остановке экологически вредных производств, переводу в безопасный режим работы атомных электростан-

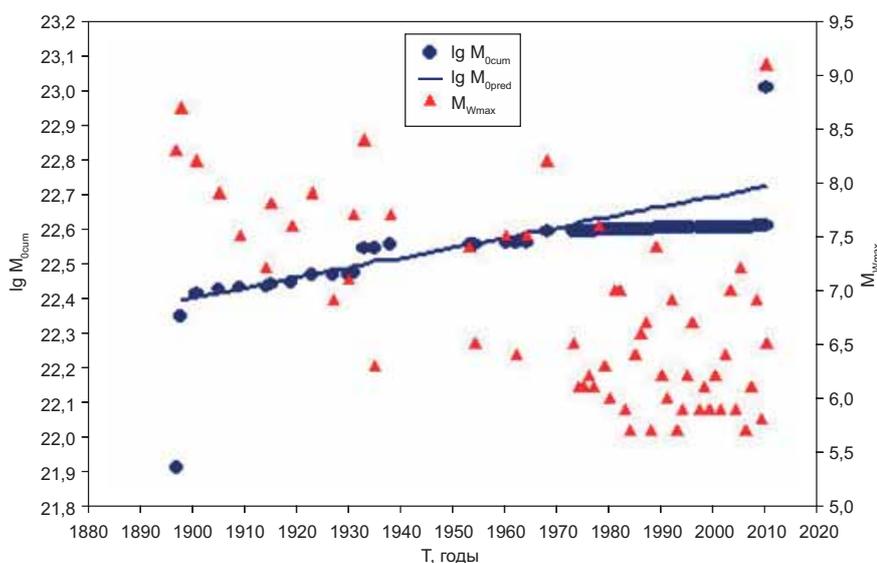


Рис. 13. Временная зависимость кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента M_{0cum} в период с 1897 г. по март 2011 г.: прямая линия — прогнозная (M_{0pred}) линейная зависимость высвобождения M_{0cum} ; треугольники — сильнейшие на каждом шаге дискретизации сейсмические события (M_{Wmax} , правая ось ординат)

ций. Выполнение этих и других организационно-технических мероприятий на опасной территории позволит снизить прямые и косвенные убытки в том случае, если землетрясение действительно произойдет.

Еще одним средством уменьшения потерь от природных катастроф при существующем уровне знаний является обучение населения, и прежде всего детей, мерам безопасности и правилам поведения в критических ситуациях. Особенно такие знания важны для случаев землетрясений и цунами, когда у человека для принятия разумного решения остается очень мало времени. И пример массового поведения японцев во время катастрофического

землетрясения 11 марта 2011 года и последовавшего за ним цунами, когда люди не впадали в панику, а действовали вполне разумно и осознанно, со всей очевидностью подтвердил необходимость такого обучения.

Но основным способом борьбы с разрушительными эффектами землетрясений должно быть антисейсмическое (сейсмостойкое) строительство новых объектов и укрепление старых зданий до такой степени, чтобы они смогли выдержать натиск стихии. Ярким примером последних лет является запуск принятой по настоянию сейсмологов программы Правительства Российской Федерации по укреплению жилищного фон-

да в Камчатской области, для которой характерен наиболее высокий в России уровень сейсмической опасности.

Любое стихийное бедствие, независимо от уровня развития человеческого общества, вызывает трепет людей перед непознанными силами природы, особенно если его последствия уносят человеческие жизни и наносят ущерб экономике. Но на нашей планете не могут погаснуть вулканы, перестать происходить землетрясения, цунами, торнадо, смерчи и прочие опасные явления. Поэтому задача науки — научиться жить на нашей планете в согласии с законами ее развития. ☞

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь. М.: Мир, 1988. 222 с.
2. Кособоков В.Г. <http://www.mitp.ru/en/predictions/20110311m89.gif>.
3. Лутиков А.И. Катастрофическое землетрясение Тохоку 11.03.2011 г.: предварительный сейсмологический анализ // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 2. С. 37–48.
4. 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.
5. Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. 2009. № 5. С. 15–28.
6. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. Вып. 38. М.: ГЕОС, 2007. 240 с.
7. 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.
8. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
9. Тихонов И.Н. О вероятном сценарии развития афтершокового процесса после землетрясения 11 марта 2011 года в Японии // Вестник ОНЗ РАН. 2011. № 3. NZ3001. DOI: 10.2205/2011NZ000102.
10. Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Тектонические и сейсмологические аспекты Великого японского землетрясения 11 марта 2011 года // Геодинамика и тектонофизика. 2011. № 2 (май). http://gt.crust.irk.ru/article_46.html.
11. Шебалин П.Н. Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания менее года // Вычислительная сейсмология. Вып. 37. Алгоритмы прогноза землетрясений. М.: ГЕОС, 2006. С. 5–180.
12. Шебалин П.Н. Широкомасштабная краткосрочная активизация сейсмичности перед сильнейшими землетрясениями Японии и Курил // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 36–46.
13. Ambraseys N., Bilham R. Corruption kills // Nature. 2011. V. 469. P. 153–155.
14. Gilmore R. Catastrophe theory for scientists and engineers. New York: John Wiley and Sons, 1981.
15. JMA Earthquake Catalog. Chiyoda, Tokyo: Japan Meteorological Agency, 1926.1.1.—2011.1.1.
16. Lyubushin A. Multifractal parameters of low-frequency microseisms / Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes // GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences 1. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. Chapter 15. P. 253–272. DOI: 10.1007/978-3-642-12300-9_15.
17. Lyubushin A.A. Multifractal properties of low-frequency microseismic noise in Japan, 1997–2008 // Book of abstracts of the 7th General Assembly of the Asian Seismological Commission and Japan Seismological Society. Fall meeting. Tsukuba, Japan, Nov. 24–27, 2008. P. 92.
18. Lyubushin A.A. Synchronization of multifractal parameters of regional and global low-frequency microseisms / European Geosciences Union General Assembly, Vienna, May 2–7, 2010 // Geophys. Res. Abstr. 2010. V. 12. EGU2010-696.
19. Lyubushin A.A. Synchronization phenomena of low-frequency microseisms // Book of abstr. of the 32d General Assembly of the European Seismological Commission, Sept. 6–10, 2010, Montpellier, France / Ses. ES6. 2010. P. 124.
20. Operational earthquake forecasting: state of knowledge and guidelines for utilization // The International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection. October 2, 2009. http://www.iaspei.org/downloads/Ex_Sum_v5_THJ9_A4format.pdf.
21. 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.
22. 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.
23. Usami T. Study of historical earthquakes in Japan // Bulletin of the Earthquake Research Institute of University of Tokyo. 1979. V. 54. № 3–4. P. 399–439.
24. 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 of University of Tokyo. 1979. V. 54. № 2. P. 253–308.
25. Web-page of the National Earthquake Information Center (NEIC) of the U.S. Geological Survey (USGS). <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/>.