

УДК 550.34.013.4 550.343.6

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЯПОНИИ: ЭНТРОПИЯ И МОНИТОРИНГ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ 11.03.2011 г.

С.Ц. Акопян

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Метод сейсмической энтропии позволяет выделять большие объемы литосфера — сейсмические системы, ответственные за подготовку сильных землетрясений определенного энергетического уровня. Приводится описание сейсмических систем Японии, ответственных за подготовку ансамбля сильных землетрясений магнитудой  $M \geq 7.8$ . Параметры кумулятивной энергии и энтропии позволяют описывать динамическое поведение и временную эволюцию сложно построенных, сейсмически активных структур литосферы в районе о. Хонсю, образовавшихся в результате взаимодействия Тихоокеанской, Филиппинской и Евразиатской плит. Выявленные системы и закономерности дают возможность следить за развитием сейсмических процессов и прогнозировать зарождение неустойчивости на долго-, средне- и краткосрочном этапах подготовки катастрофических землетрясений. Возможности метода продемонстрированы на примере мониторинга и прогноза недавнего катастрофического землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., проведенного в режиме реального времени на основе трековых и энергетических диаграмм.

**Ключевые слова:** сейсмический цикл, математическое моделирование, анализ неустойчивости, динамика землетрясений, мониторинг сейсмичности.

PACS: 91.30.Ab Px, 91.45.Ga

### ВВЕДЕНИЕ

Метод сейсмической энтропии дает возможность проводить математическое моделирование сейсмических процессов в реальной среде и выделять объемы литосферы, вовлеченные в процесс подготовки землетрясений того или иного энергетического уровня. Для мониторинга динамического поведения среды необходимо выявить информативные, надежно регистрируемые параметры, которые позволили бы моделировать и контролировать процесс подготовки неустойчивости на разных временных этапах (долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном). Землетрясения, механизмы очагов, смешения по разломам являются наиболее надежно регистрируемыми параметрами, непосредственно отражающими реакцию среды на внешнее воздействие, но для их эффективного использования необходимы теоретические разработки.

Большинство сейсмостатистических методов описания активности и динамики поведения среды основаны на эмпирическом законе повторяемости землетрясений Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, Richter, 1954; Jordan et al., 2011]. Однако статистические осреднения по времени

и магнитуде, производимые при применении этого закона, приводят к потере важной информации о критическом поведении среды; имеется также некоторый произвол в выборе ее сейсмоактивного объема. При описании среды статистически значимые меньшие по магнитуде землетрясения (с высокой повторяемостью) дают малый энергетический вклад, а в области сильных землетрясений из-за уменьшения повторяемости закон нарушается [Bird et al., 2010].

Автор ранее предложил энергетический подход к описанию динамики поведения среды и возникновения неустойчивости, основанный на параметре суммарной упругой сейсмической энергии в выделенном объеме геологической среды [Акопян, 1995а]. Этот параметр необходим, но недостаточен для описания динамики поведения реальной среды, в которой доминируют пластические неупругие деформации, крипы, тепловыделения и т.д. Для косвенного описания происходящих в геологической среде процессов, которые невозможно напрямую измерять в больших объемах, были введены параметры количества состояний и сейсмической энтропии, зависящие от

времени [Акопян, 1995а–в]. На этой основе было сформулировано понятие сейсмической системы (СС), введена метрика (единичное землетрясение) и выявлен закон производства сейсмической энтропии. Полученные результаты позволили разработать теорию количественного описания сейсмических процессов в реальной среде [Акопян, 1998].

Позднее, в работах [Main, Al-Kindy, 2002; Al-Kindy, Main, 2003], также был введен параметр сейсмической энтропии, но в отличие от нашего подхода это было сделано формально, на основе термодинамического определения энтропии и закона Гутенберга – Рихтера. Следует заметить, что механическая замена термодинамической энергии на энергию землетрясений в определении энтропии требует уточнения и формулировки новой физической задачи, возникающей в результате такой замены. В противном случае появляется много вопросов и неопределенностей относительно адекватности полученных моделей реальным процессам подготовки землетрясений, для которых определяется энтропия. Кроме того, такое определение энтропии содержит все отмеченные выше недостатки закона Гутенберга – Рихтера, при этом нет строгого критерия выбора критического объема среды для выявления сейсмической неустойчивости.

В работах [Akopian, Kocharian, 2012, 2013] в рамках новых параметров теоретически выведен степенной закон критического поведения дискретных объемов среды, который ранее был получен эмпирически [Акопян, 1998]. Этот закон действует в статистической области землетрясений-индикаторов ( $M_h \leq M < M_{th}$ , где  $M_h$ ,  $M_{th}$  — соответственно нижняя и верхняя пороговые магнитуды землетрясений-индикаторов) — там, где нарушается закон Гутенберга – Рихтера. Он гласит, что в СС сильные ( $M_{th} \leq M < M_{max}$ ) землетрясения объединяются в ансамбли с независимыми сейсмическими циклами [Akopian, Kocharian, 2013]. (Здесь и далее под  $M$  понимается магнитуда, определяемая по поверхностным волнам.) Другими словами, сильные землетрясения ансамбля подготавливаются землетрясениями-индикаторами в конкретном объеме литосфера за конечное время. Потеря сейсмической системы устойчивости (сильное землетрясение) отслеживается на трековой диаграмме при достижении траекторией подготовки землетрясения зоны критичности (аттрактора). Вопреки общепринятым мнению слабая сейсмичность ( $M < M_h$ ) не играет определяющей роли в процессе подготовки сильных землетрясений.

В настоящей статье метод сейсмической энтропии применяется для математического моделирования динамических процессов подготовки

сильных ( $M \geq 7.8$ ) землетрясений Японии. Япония хорошо изучена, почти вся ее территория покрыта высокочувствительными сейсмологическими, геодезическими, деформационными и т.п. сетями наблюдений. Однако, имея такую обширную сеть наблюдений, японские сейсмологи не смогли предсказать разрушительные землетрясения в Кобе (1995 г.) и Токио (2011 г.). Отметим, что долгосрочный прогноз землетрясения Токио на основе анализа микросейсмического шума был дан А.А. Любушкиным [2011а, б]. Тектоническим и сейсмологическим аспектам землетрясения Токио были посвящены работы [Лутиков, 2011; Рогожин, 2011; Рогожин и др., 2011; Родкин, Тихонов, 2011; Тихонов, Ломтев, 2011].

### СЕЙСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ЯПОНИЯ» ( $M_s \geq 7.8$ )

Ансамбль сильных землетрясений

Сильная ( $M_s \geq 7.8$ ) сейсмичность в Японии обусловлена сложным взаимодействием трех плит: Тихоокеанской на востоке, Филиппинской на юге и Евразиатской (Япономорской) на западе и северо-западе, образующих зоны Беньофа (зоны вулканизма и глубокофокусной сейсмичности до 700 км) (рис. 1). Плиты соприкасаются и взаимодействуют друг с другом в районе прогиба Сагами.

СС «Япония» находится на стыке трех плит и контролирует динамику их сложного взаимодействия. На рис. 1 показаны границы (конфигурация на поверхности  $L$  и глубина  $H$ ) СС «Япония», включающей острова Хонсю, Сикоку, Кюсю, Японский желоб, прогибы Нанкай и Сагами и сегмент желоба Исио-Бонин, на поверхности и на глубине  $H$ . С учетом этой плейт-тектонической модели производился поиск СС на основе метода сейсмической энтропии. Глубина СС «Япония» достигает 100 км, протяженность — 1700 км, ширина — 650 км. На севере система граничит с СС «Хоккайдо – Южные Курилы». Направления главных осей напряжений скатия в СС «Япония» имеют тенденцию к северо-западной ориентации. Это подтверждает единый устойчивый тектонический механизм, который стремится сжать Японские острова в северо-западном направлении.

Для устойчивого мониторинга динамики и описания критического поведения больших объемов литосферы во времени были введены сейсмические параметры: кумулятивная энергия  $E_c$ , число состояний системы  $S$  и их десятичные логарифмы — кумулятивный энергетический класс  $K_c$  и энтропия  $W$ , рассчитываемые по формулам [Акопян, 1995а]:

$$E_c(T) = \sum E_i, \quad K_c = \lg E_c, \quad (1)$$

$$S(E_c, T) = TE_c - \sum \{T_i E_i\}, \quad W = \lg S, \quad (2)$$

где  $T = t - t_{j-1}$  — текущее время внутри  $j$ -го сейсмического цикла после времени  $t_{j-1}$  последнего сильного землетрясения в системе;  $E_i, t_i$  — соответственно энергия излучения и время в очаге  $i$ -го землетрясения-индикатора ( $T_i = t_i - t_{j-1}$ ), причем суммирование ведется по всем землетрясениям-индикаторам внутри выделенного объема литосферы. Для поиска СС использовались данные работ [Utsu, 1979, 1982; Grunewald, Stein, 2006] и каталоги землетрясений NOAA, NEIS Геологической службы США. Основой для выделения СС является построение трековых и энергетических диаграмм.

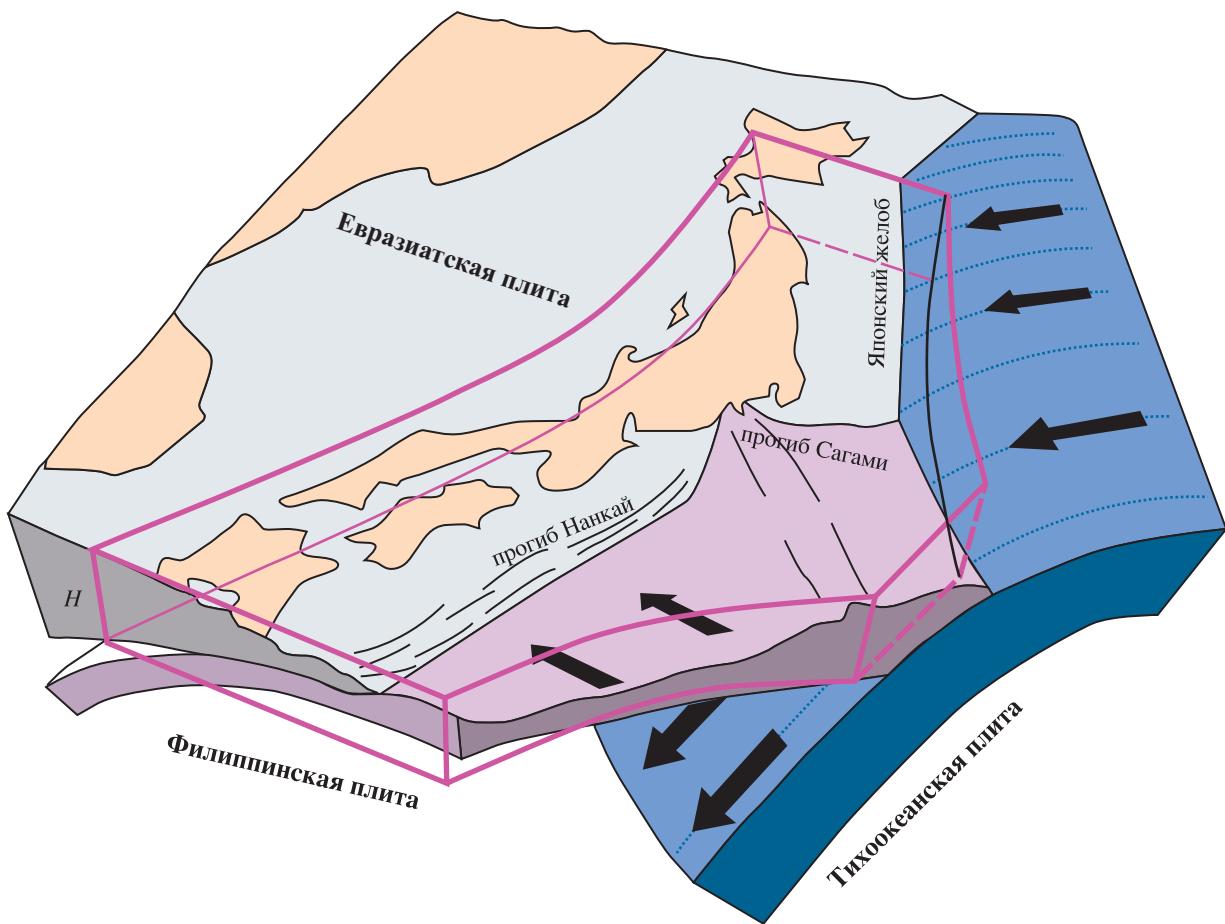
В работах [Акопян, 1998; Akopian, Kocharyan, 2013; Акопян, Рогожин, 2013] показано, что сильные землетрясения объединяются в ансамбли в дискретных объемах литосферы, образуя независимые сейсмические циклы. В табл. 1 приведены параметры ансамбля сильных землетрясений для СС «Япония» и значения параметров  $K_c$  и  $W$  для сейсмических циклов этих землетрясений,

рассчитанные по формулам (1) и (2). На рис. 2 показана конфигурация СС «Япония» с  $M_{th} = 7.8$ . Эта пороговая магнитуда подразделяет землетрясения в системе на землетрясения-индикаторы с  $5.0 \leq M < 7.8$  (см. рис. 2, а) и сильные землетрясения с  $M \geq 7.8$  (см. рис. 2, б). Сильные землетрясения 1933, 1938, 1968, 1994 и 2003 гг. на северо-востоке системы связаны с зоной субдукции Тихоокеанской плиты под Евразиатскую. На юге и юго-востоке сильная сейсмичность 1941, 1944, 1946 гг. связана с взаимодействием Филиппинской плиты с Евразиатской в районе Нанкайского прогиба. А землетрясения 1916, 1923, 1953 гг. в центральной части системы связаны с прогибом Сагами, где происходит сложное взаимодействие трех плит: Филиппинская плита надвигается на Тихоокеанскую, а в районе прогиба Сагами обе эти плиты вдавливаются под Евразиатскую плиту [Ishida, 1992]. Землетрясения 1927 и 1983 гг. — внутриплитовые и расположены несколько особняком (см. рис. 2, б).

Сейсмические циклы 14 сильных землетрясений (отсчет циклов начинается с землетрясения 13.03.1909 г.) и рассчитанные по формуле (1) графики кумулятивной энергии землетрясений-ин-

**Таблица 1.** Параметры сильных ( $M \geq 7.8$ ) землетрясений СС «Япония» после завершения 14 сейсмических циклов (средний период повторяемости  $T = 7.3$  года)

$j$	Дата	Название, место	$\Phi$ , град. с.ш.	$\lambda$ , град. в.д.	$H$ , км	$K_c$	$W$	$K_s$	$M_s$	$P_{k'}$ , %	$P_{w'}$ , %	$P$ , %	$Q, 10^{-3}$
0	13.03.1909 г.	Идзу	31.50	142.50	80	15.50	16.54	17.1	8.3	—	—	—	—
1	21.04.1916 г.	Тихий океан	33.00	141.00	60	16.75	18.02	16.6	7.8	89	79	70	23
2	01.09.1923 г.	Канто	35.00	139.50	25	16.73	18.34	17.1	8.3	83	90	75	11
3	07.03.1927 г.	Танго	35.70	135.00	10	16.11	17.52	16.7	7.9	35	44	15	17
4	02.03.1933 г.	Санрикю	39.20	144.50	25	17.01	18.44	17.7	8.7	93	87	81	16
5	05.11.1938 г.	Фукусима	36.70	141.70	60	16.89	18.43	16.6	7.8	82	82	67	13
6	18.11.1941 г.	Кюсю	32.00	132.00	25	16.49	17.80	16.7	7.9	49	45	22	21
7	07.12.1944 г.	Тонанкай	33.70	136.00	25	16.54	17.83	17.1	8.3	54	47	41	22
8	20.12.1946 г.	Нанкайдо	33.00	135.60	30	16.47	17.81	17.2	8.4	47	46	25	20
9	25.11.1953 г.	Босо Оки	33.90	141.50	40	16.76	18.35	17.1	8.3	65	81	53	11
10	16.05.1968 г.	Токати Оки	40.90	143.40	10	17.06	18.90	16.9	8.1	93	94	87	06
11	26.05.1983 г.	Япономорск	40.46	139.10	23	17.14	19.09	16.6	7.8	92	95	87	05
12	28.12.1994 г.	Хашинохи	40.53	143.42	26	16.98	18.82	16.6	7.8	82	86	71	06
13	25.09.2003 г.	Токачи Оки	41.81	143.91	27	16.93	18.62	17.1	8.3	74	76	56	08
14	11.03.2011 г.	Тохоку	38.32	142.37	24	17.04	18.64	17.9	9.0	81	76	62	11



**Рис. 1.** Границы СС «Япония» ( $M_{th} = 7.8$ ): конфигурация СС на поверхности и на глубине  $H$ . Стрелками показаны направления движения плит по отношению к Евразиатской

дикаторов Японии внутри циклов приведены на рис. 3, где логарифм площади есть сейсмическая энтропия (2). Средний период повторяемости составляет 7.3 года. При расчетах шаг по времени выбирался равным 1 мес.

Если правильно определены объем литосферы и пороговая магнитуда, то на трековой диаграмме подготовка сильных землетрясений изображается траекториями, стягивающимися в математическую область неустойчивости (аттрактор). Этот процесс описывается степенным законом

$$E_c = \beta_c S^{a_c}, \quad (3)$$

где  $a_c$  и  $\beta_c$  — положительные константы, отражающие сейсмотектонические особенности региона. Логарифмируя уравнение (3), можно записать в линейном виде:

$$K_c = a_c W + b_c \quad (4)$$

где  $b_c = \lg \beta_c$ . Выбор объема СС «Япония» и пороговой магнитуды позволяет произвести однозначную выборку землетрясений-индикаторов и

сильных землетрясений из сейсмологического каталога и определить константы  $a_c$  и  $b_c$  закона (4).

На рис. 4 показана трековая диаграмма (зависимость логарифма кумулятивной энергии землетрясений-индикаторов  $K_c$  в сейсмических циклах от энтропии  $W$ ) для СС «Япония». Начало координат на рисунке соответствует энергетическому классу  $K = 14$  землетрясений-индикаторов. Уравнение прямой регрессии (4) на трековой диаграмме (аттрактор) рассчитан методом решения обратных задач [Дрейпер, Смит, 2007] на основе данных  $K_j, W_j$  ( $j = 1-14$ ) из табл. 1 и имеет вид:

$$K_c = 0.496 W + 7.704, \quad 17.50 < W < 19.10. \quad (5)$$

Аттрактор включает точки неустойчивости ансамбля сильных ( $M \geq 7.8$ ) землетрясений Японии. Экстраполяция (5) до пересечения с диагональю (линией равновесия) позволяет определить нижний порог землетрясений-индикаторов:  $K_h = 15.3$ ,  $M_h = 6.6$ . На рис. 4 видно, что по значениям энтропии сильные ( $M \geq 7.8$ ) землетрясения в аттракторе можно подразделить на три группы:

землетрясения с эпицентрами в юго-западной (ЮЗ на рисунке), центральной (Ц) и северо-восточной (СВ) частях системы. Такая структура аттрактора отображает динамику поведения сложно построенной плитоблоковой структуры системы, приведенной на рис. 1. Видно, что по мере возрастания энтропии вначале входит в неустойчивое состояние юго-западная часть системы, потом — центральная, а затем — северо-восточная. Это является основным прогностическим критерием для сильных ( $M \geq 7.8$ ) землетрясений в СС «Япония».

Рассмотрим этот прогностический критерий подробнее. Как уже говорилось, при увеличении энтропии вначале входит в неустойчивое состояние юго-западная часть системы, что обусловлено взаимодействием Филиппинской плиты с Евразиатской и частично с Тихоокеанской плитой. К этой зоне относятся землетрясения 1909 (предположительно), 1916, 1941, 1944, 1946 гг. Несколько особняком в этой части системы стоит землетрясение Танго 1927 г., которое произошло не в субдукционной зоне (см. рис. 2, б), а на западе о. Хонсю в прибрежной зоне Японского моря на разломе Гомура [Yamasaki, Tada, 1928; Kanamori, 1973]. Трек подготовки этого землетрясения находится вблизи, но ниже точки аттрактора, и имеет некоторый дефицит кумулятивной энергии (см. рис. 4).

Статистика показывает, что в таких случаях в системе происходит нетипичное землетрясение с интенсивной афтершоковой активностью, восполняющей дефицит кумулятивной энергии. Нетипичным для системы считается сильное землетрясение, происходящее не на основных, а на побочных разрывных структурах. Как правило, это новообразованные разломы или древние заречившиеся разломы, находящиеся вблизи границ системы, вдали от основных активных разломов. Указанные признаки присущи землетрясению Танго. В работе [Matsuda, 1968] указано, что разлом Гомура не проявлял до землетрясения 1927 г. заметной активности на протяжении нескольких тысяч лет, а само землетрясение сопровождалось интенсивной афтершоковой активностью [Nasu, 1935].

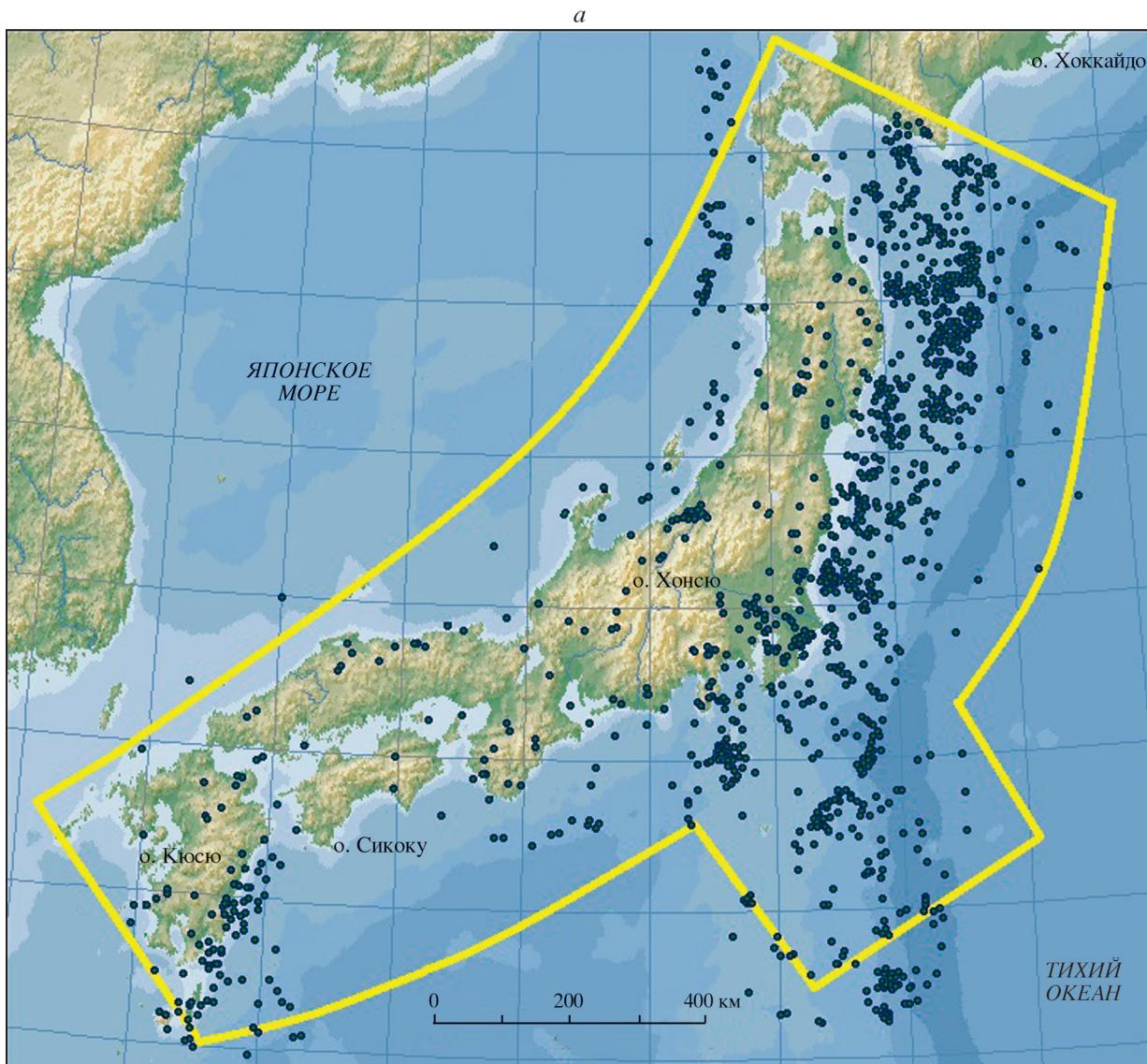
Продолжим анализ динамического поведения среды и структуры аттрактора. Если траектория обходит и покидает зоны неустойчивости юго-западной части системы, то эта часть уже до конца сейсмического цикла переходит в устойчивое состояние, а зона неустойчивости перемещается в центральную часть системы — в зону тройного сочленения плит (прогиб Сагами). В этой зоне аттрактора локализованы точки неустойчивости исторических землетрясений Канто 1923 г. (район Большого Токио) и Босо Оки 1953 г. Если траектория не попадает в эту локальную зону

неустойчивости, а обходит ее, то до завершения сейсмического цикла центральная часть системы также переходит в безопасное состояние, а неустойчивость перемещается на северо-восток (к северо-востоку от о. Хонсю). Внутри этой зоны неустойчивость вначале перемещается с юга на север в сторону о. Хоккайдо, затем она опять дрейфует от о. Хоккайдо на юг. После консолидации и запирания зон субдукции в Японском желобе на северо-востоке о. Хонсю неустойчивость «перепрыгивает» на запад, на противоположный берег о. Хонсю, в Японское море.

Таким механизмом объясняется довольно редкое сильное Япономорское землетрясение 1983 г. (префектура Акита), которое аккумулировало самое большое значение энтропии в системе. Траектория подготовки землетрясения 1983 г. представляет большой интерес в силу ее близости к траектории подготовки землетрясения Тохоку 2011 г. За 5 лет до землетрясения 1983 г., 12.06.1978 г., в системе на востоке от о. Хонсю произошло сильное землетрясение Мияги кен Оки с  $M = 7.7$ , которое, согласно нашей модели, причисляется к землетрясениям-индикаторам. После этого землетрясения траектория достигла координат  $K = 17.046$ ,  $W = 18.723$ , которые были близки к значениям координат траектории непосредственно перед землетрясением Тохоку. За два дня до землетрясения Тохоку после триггерного землетрясения 09.03.2011 г.,  $M = 7.7$ , траектория также достигла высоких значений:  $K = 17.040$ ,  $W = 18.636$  (см. рис. 4). Кстати, эпицентры землетрясений-индикаторов 12.06.1978 г. и 09.03.2011 г. также находились к северо-востоку от о. Хонсю, близко друг от друга — на расстоянии 130 км.

#### Япономорское землетрясение 1983 г.

Возникновение сильного землетрясения вдоль береговой зоны префектуры Акита внутри Евразиатской плиты для сейсмологов было полной неожиданностью [Mogi, 1983; Shimazaki, Mori, 1983]. Эпицентр этого землетрясения занимал обширную площадь: 120 км с юга на север и 30 км в ширину. Механизм был связан с разрывом меридионального простирания с пологим надвигом по плоскости, имеющей восточное падение под углами 30–35°. Как было отмечено выше, траектория подготовки этого сильного землетрясения к середине 1978 г. достигала высоких значений. После землетрясения Мияги кен Оки 1978 г. Японский желоб, к которому был приурочен его очаг, «заперся» для подготовки сильных ( $7.8 \leq M < 8.4$ ) землетрясений — траектория сильно отклонилась вверх от зоны неустойчивости (описывается уравнением (4)). Система консолидировалась, Тихоокеанская плита как бы «срослась»



**Рис. 2.** Эпицентры землетрясений-индикаторов с  $5.0 \leq M < 7.8$ ,  $H < 100$  км (а) и эпицентры и очаговые зоны сильных ( $M \geq 7.8$ ) землетрясений (б) внутри СС «Япония»

с Евразиатской плитой, что привело к внутриплитовому сильному землетрясению в ослабленной тыловой зоне.

По наблюдениям [Mogi, 1983, 1985] за долгосрочными предвестниками японских землетрясений эта ослабленная зона с середины 1978 г. до начала 1983 г. отмечалась как «сейсмическая брешь». Одновременно с появлением «сейсмической бреши» в этот период начали наблюдаться аномальные изменения наклона земной коры на побережье Японского моря от п-ова Ога до г. Фукаура [Vertical..., 1982]. В работе [Моги, 1988, с. 283] автор, анализируя сейсмическое затишье, обращает внимание на то, что в 1978 г. на востоке от о. Хонсю в Японском желобе произошло землетрясение Миаги кен Оки. Он предположил, что это

землетрясение могло привести к долгосрочным предвестникам Япономорского землетрясения. Предлагаемая нами модель подтверждает это предположение и объясняет механизм такой взаимосвязи на основе трековой диаграммы и аттрактора.

Итак, к середине 1978 г. траектория подготовки землетрясения 1983 г. сильно отклонилась вверх от зоны неустойчивости (накопила большое значение кумулятивной энергии при относительно низких значениях энтропии), и поэтому в системе наступило относительное затишье. К маю 1983 г. траектория вновь приблизилась к области неустойчивости, описываемой уравнением (4) и соответствующей наиболее ослабленной зоне к северо-западу от о. Хонсю, в Японском море произошло сильное землетрясение. При этом

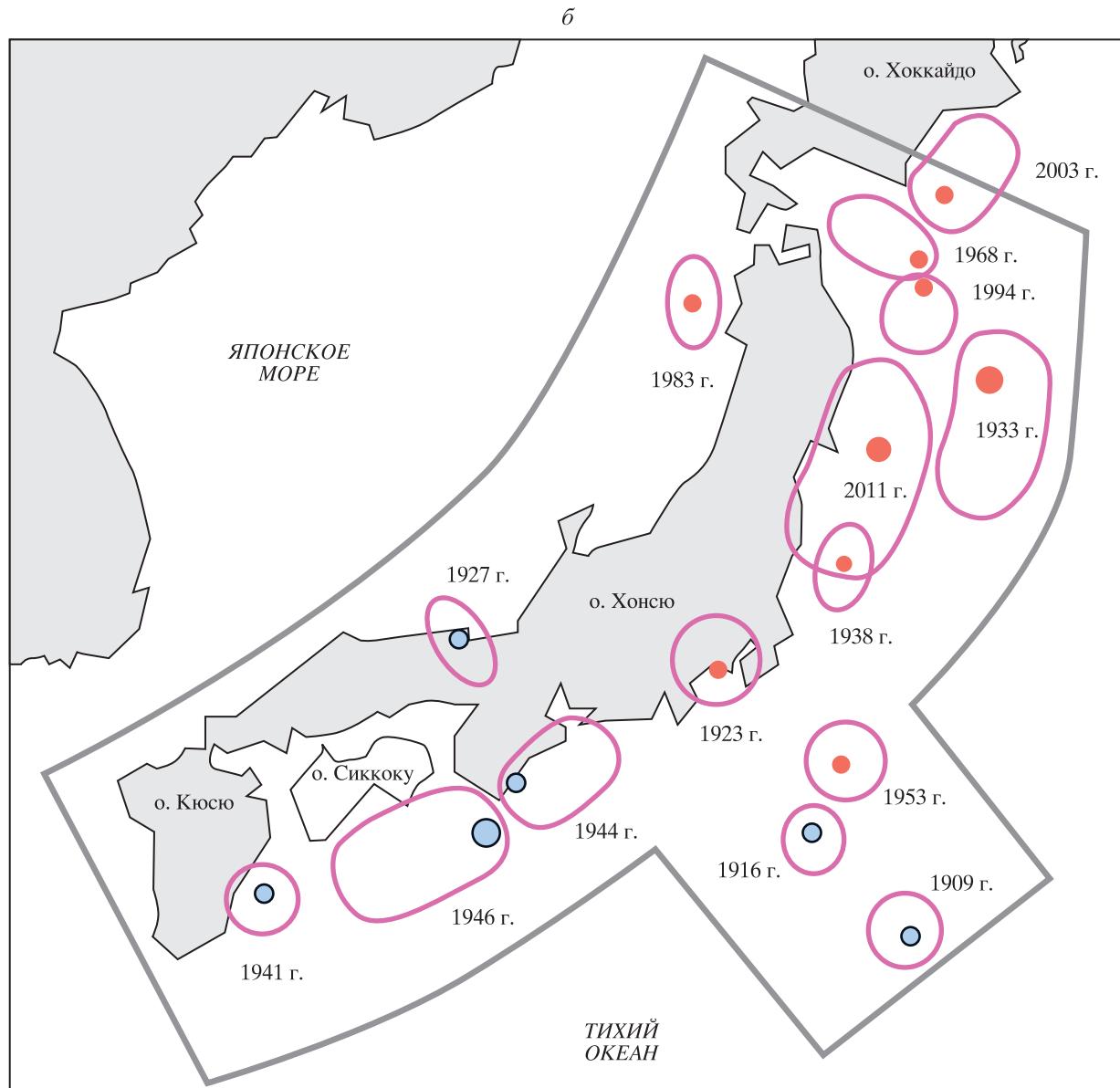


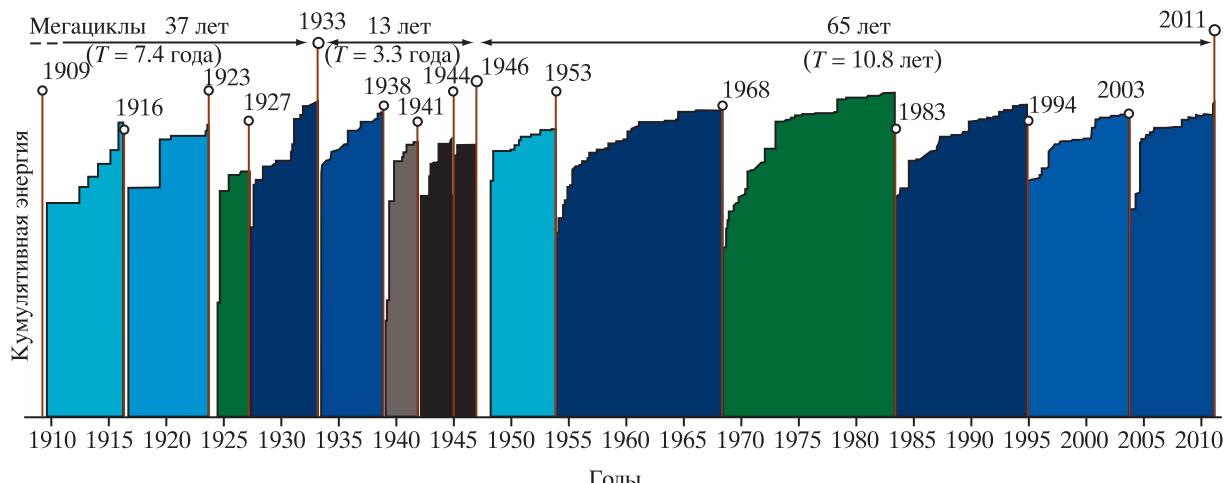
Рис. 2, (окончание)

значения кумулятивного энергетического класса и энтропии достигли наивысших критических значений  $K_c = 17.145$  и  $W = 19.092$  (см. табл. 1) за весь период наблюдений.

Это означает, что для реализации сильного землетрясения 1983 г. система потратила колоссальные усилия. Оно явилось результатом последовательного запирания всех субдукционных зон восточнее и юго-восточнее о. Хонсю (траектория огибала все эти зоны неустойчивости). Система консолидировала свой каркас до глубины 100 км и, действуя как единое целое, направила усилия в ослабленную зону очага землетрясения 1983 г. Ответ на вопрос, почему отклонение трека в 1978 г. не привело к мегаземлетрясению, а аналогичное развитие трека 09.03.2011 г. завершилось

событием Тохоку, будет дан в следующих разделах статьи.

Как только траектория приближается к критическим областям аттрактора (уравнение (4)), в соответствующем элементе системы происходит сильное землетрясение, восстанавливающее равновесное состояние всей системы [Акопян, 1998]. Энергия излучения (магнитуда) этого сильного землетрясения определяется на основе энергетической диаграммы, показывающей зависимость упругой энергии излучения сильных землетрясений от энтропии в конце сейсмических циклов. На рис. 5 приведена энергетическая диаграмма ансамбля сильных землетрясений СС «Япония». Точки на энергетической диаграмме объединены в соответствии с их приуроченностью к разным



**Рис. 3.** Сейсмические циклы сильных ( $M \geq 7.8$ ) землетрясений СС «Япония» и графики кумулятивной энергии землетрясений-индикаторов

$T$  — средний период повторяемости циклов в мегациклах. Логарифм площади под графиками кумулятивной энергии есть энтропия (близкие значения энтропии обозначены одинаковым тоном)

разломным (субдукционным) зонам внутри системы. Видно, что близкие по местоположению эпицентра и механизмам очагов землетрясения располагаются на энергетической диаграмме в локальных линейных зонах. Так, объединяются землетрясения 1944 и 1946 гг. Нанкайского прогиба, 1923 и 1953 гг. прогиба Сагами, землетрясения 1933 и 2011 гг. и 1968 и 1994 гг. в разных сегментах Японского желоба. Линейные уравнения регрессии для энергии излучения сильных землетрясений для разных зон СС «Япония» имеют вид (см. рис. 5):

$$\text{ЮЗ } K_s = -0.191W + 20.067, (17.50 < W < 18.05); \quad (6a)$$

$$\text{Ц } K_s = 17.1, \quad (17.33 < W < 18.36); \quad (6b)$$

$$\text{СВ } K_s = -0.779W + 31.510, (18.40 < W < 19.10); \quad (6b)$$

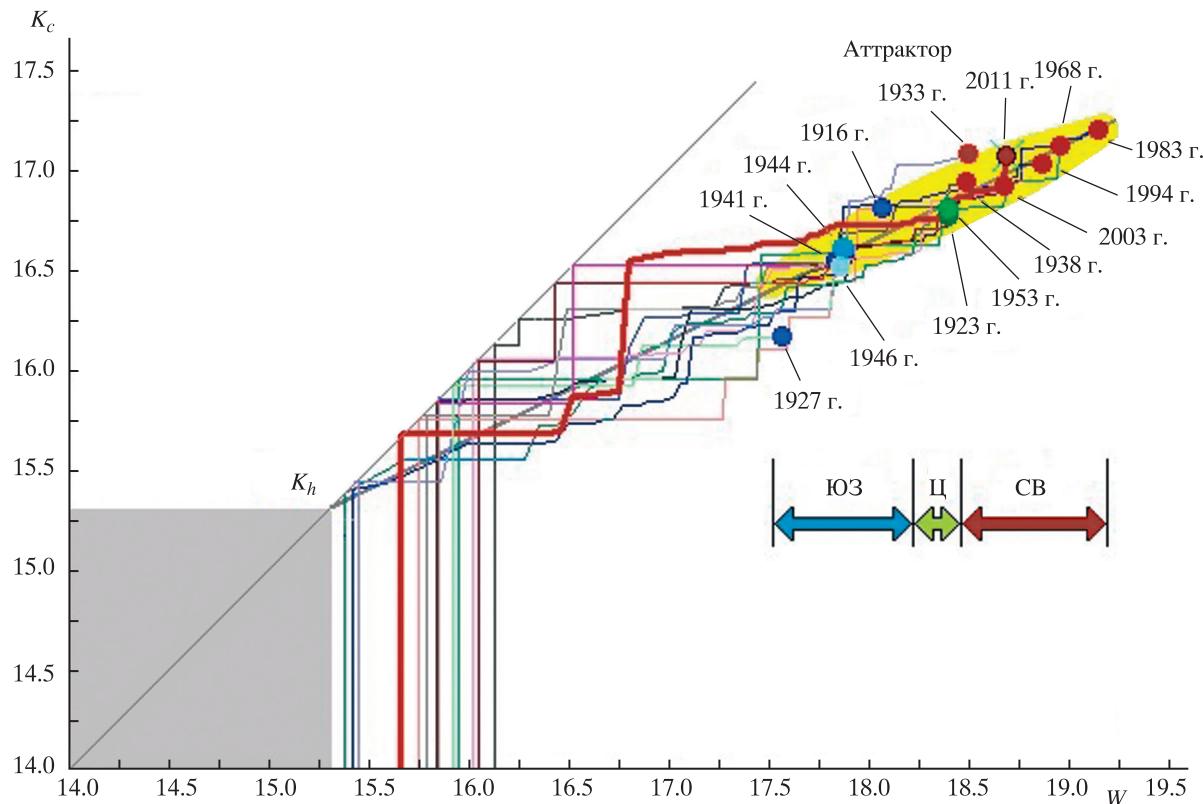
$$\text{Мега } K_s = 0.905W + 1.021, \quad (17.80 < W < 18.65). \quad (6g)$$

Уравнение (6a) формально объединяет и описывает энергию излучения трех сильных землетрясений 1916, 1927 и 1941 гг., расположенных в юго-западной части системы и оконтуривших очаговые зоны землетрясений 1944 и 1946 гг. В центральной части системы излучение происходит в соответствии с уравнением (6b), что соответствует энергии землетрясения магнитудой 8.3. Сюда вошли землетрясения 1923 и 1953 гг. Землетрясения как в северо-восточной, так и в северо-западной части системы излучают энергию в соответствии с уравнением (6b), но здесь имеется некоторый разброс магнитуд, требующий более детального анализа. Например, несколько высо-

кая магнитуда землетрясения Токачи Оки 2003 г. может быть объяснена приграничным расположением очага (см. рис. 2, б) и участием в подготовке этого землетрясения соседней СС «Южные Курилы – Хоккайдо».

Энергетические точки сильнейших землетрясений 1946, 1933 и 2011 гг., объединенные в соответствии с уравнением (6g), имеют дефицит энтропии, поскольку их траектории чувствительно отклоняются вверх от аттрактора. Это указывает на то, что их подготовка в СС «Япония» описывается лишь частично. Для полного их описания необходимо рассмотреть большую по пороговой магнитуде и/или размерам систему [Акопян, 1998].

На энергетической диаграмме в областях Б1 и Б2 (см. рис. 5) для одних и тех же значений энтропии наблюдается неоднозначность, т.е. имеется несколько пространственно-энергетических вариантов реализации сильных землетрясений в соответствии с линейными уравнениями (6a), (6b) или (6g). Это явление, когда при увеличении управляющего параметра в системе наблюдаются разнообразные переходные явления, называется бифуркацией [Николис, Пригожин, 2003]. Концепция переходных явлений и структурной неустойчивости играет исключительно важную роль в теории динамических систем. Выбор однозначного решения в случае возникновения пространственной неустойчивости производится путем привлечения трековой диаграммы (см. рис. 4). Скачки трека и сейсмические затишья внутри сейсмического аттрактора могут привести к резкому переходу области неустойчивости от одной разломной зоны к другой с соответствующим изменением магнитуды ожидаемого землетрясения.



**Рис. 4.** Трековая диаграмма СС «Япония»

Жирной линией обозначена траектория подготовки землетрясения Тохоку 2011 г., диагональ — линия равновесного состояния. Показаны области энтропии для сильных землетрясений на юго-западе (ЮЗ), в центральной части (Ц) и на северо-востоке (СВ) системы. АтTRACTор включает точки, в которых треки завершаются сильными землетрясениями.  $K_c$ ,  $W$  указаны в безразмерных единицах

Неоднозначность на энергетической диаграмме можно снять посредством укрупнения или разбиения системы на подсистемы. Так, переход к мегасистеме позволяет описывать катастрофические землетрясения 1946, 1933 и 2011 гг., а разбиение СС «Япония» на подсистемы «СВ», «Ц» и «ЮЗ» с понижением пороговой магнитуды дает возможность раздельно контролировать эти зоны на более низком энергетическом уровне. Однако подробно этот подход в данной статье не рассматривается.

Одновременный мониторинг в сейсмической и мегасейсмической системах Японии позволил отслеживать динамику подготовки мегаземлетрясения Тохоку и прогнозировать ее.

#### Мониторинг мегаземлетрясения Тохоку и его прогноз в СС «Япония»

Мониторинг в СС «Япония» производился после последнего сильного землетрясения Токачи Оки 25.09.2003 г. на основе трековой и энергетической диаграмм, приведенных на рис. 4 и 5, с 2008 г. На рис. 4 показан трек подготовки земле-

трясения Тохоку. С 2003 по 2007 г. трек обходил зоны неустойчивости атTRACTора, соответствующие юго-западной части о. Хонсю, островам Сикоку и Кюсю. С февраля 2008 г. трек стал приближаться к зоне неустойчивости в центральной части о. Хонсю. Мы оповестили японских сейсмологов о сценариях развития сейсмичности и о возможной опасности в районе Большого Токио (зона А на рис. 6), а на сайте Центра прогнозирования землетрясений «ГеоКвейк» ([www.geoq.ru](http://www.geoq.ru)) в режиме реального времени начали проводить мониторинг ожидаемого землетрясения с  $M \geq 7.8$  в СС «Япония» [Akopian, 2012]. К тому времени было ясно, что землетрясение может произойти только на северо-востоке СС «Япония» — незаштрихованная область (за вычетом областей 1 и 2) на рис. 6.

Следует отметить, что опасная зона ожидания сильного землетрясения не остается на одном месте внутри объема СС, а перемещается по мере увеличения энтропии и текущей сейсмичности. Это происходит вследствие реагирования неоднородностей среды внутри системы на постоянно меняющиеся внешние воздействия. Местами

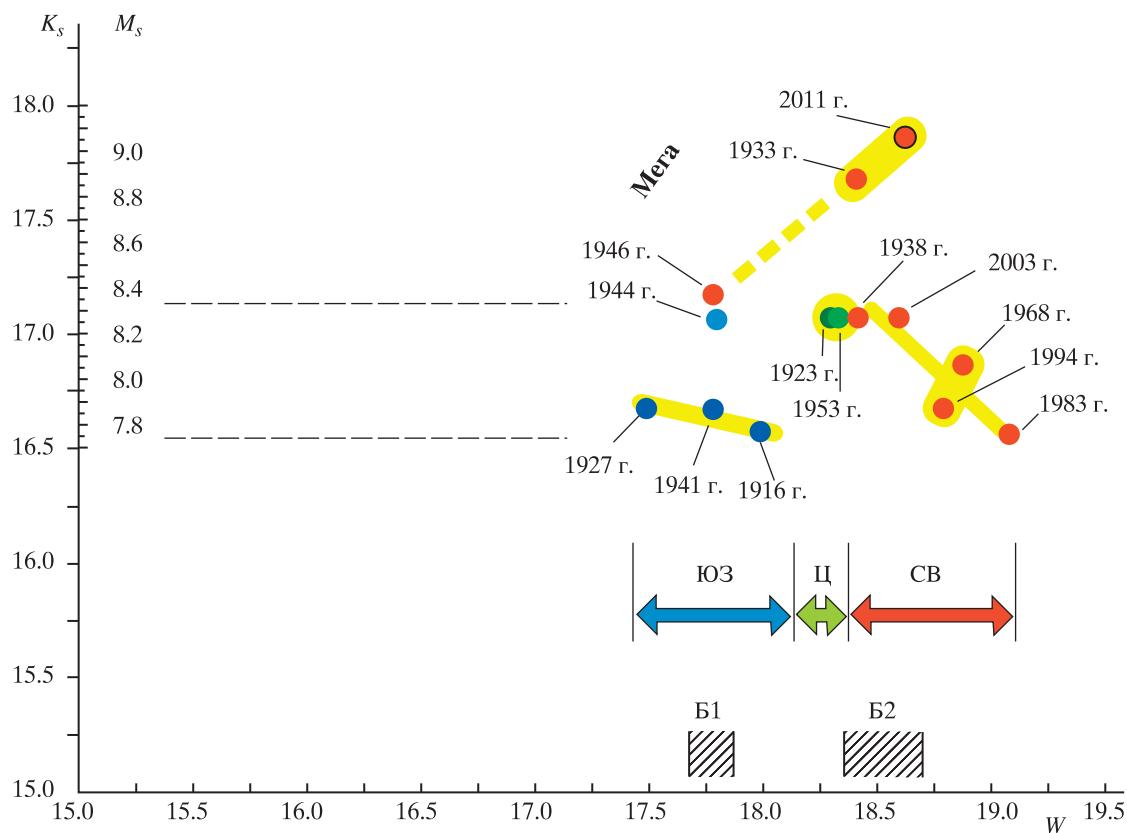


Рис. 5. Энергетическая диаграмма СС «Япония»

Части системы (подсистемы): ЮЗ — юго-западная; Ц — центральная; СВ — северо-восточная; Б1, Б2 — области бифуркации;  $K_s$  и  $W$  указаны в безразмерных единицах

эти перемещения происходят медленно, а иногда опасная зона может «перепрыгивать» на большие расстояния. При этом ожидаемая магнитуда сильного землетрясения может не только увеличиваться, но и в соответствии с уравнениями (6а, в) уменьшаться.

На рис. 6 показано, как дрейфовала внутри СС «Япония» опасная зона ожидания сильного землетрясения с февраля 2008 г. по март 2011 г.: перемещаясь от зоны А к зонам В, С, Д, она затем, минуя зоны Е и Е1, приблизилась к зоне F, откуда «скакком» переместилась в зоны Д и Е. До зоны Е1, соответствующей точкам неустойчивости землетрясений 1968 и 1994 гг. в атTRACTоре, траектория не дошла. На рисунке обозначены зоны, критические значения которых траектория миновала во время мониторинга (зоны F, В, С, Е1), и очаговые области, в которые в конечном счете попала траектория мегаземлетрясения Тохоку (зоны Е, Д).

Детальное поведение трека землетрясения Тохоку и локальные области неустойчивости атTRACTора для центральной и северо-восточной частей о. Хонсю, соответствующие зонам, указанным на рис. 6, приведены на рис. 7 начиная с февраля 2008 г. вплоть до мегакатастрофы. Также на рис. 7

показана полоска прямой регрессии (S), проходящая вблизи точек неустойчивости землетрясений 1923, 1953, 2003, 1968 и 1994 гг. Видно, что траектория землетрясения развивалась вблизи этой линейной зоны, огибая точки неустойчивости землетрясений 1923 и 1953 гг. в центральной части системы, а к 2011 г. точку неустойчивости землетрясения 2003 г. Развитие трека на этом участке атTRACTора соответствует перемещению области неустойчивости от зон А, В, С в центральной части системы к зоне D, а затем через зону Е к северной оконечности системы (зона F).

Несколько выше полоски прямой регрессии показаны линейные области неустойчивости для зоны D и предположительно для зоны E. В зоне D имеем реализацию одного сильного землетрясения, в зоне E сильных землетрясений пока не происходило. Выше областей неустойчивости D и E начинается суммарная (D + E) область неустойчивости для мегаземлетрясений (это означает, что эпицентриальная область охватывает зоны D и E). Здесь статистики мало, в эту область до землетрясения Тохоку попала лишь одна точка неустойчивости землетрясения Санрику 1933 г.

С 2009 по 2011 гг. трек развивался вблизи линейной зоны (формула (5)), ниже зон D и E.

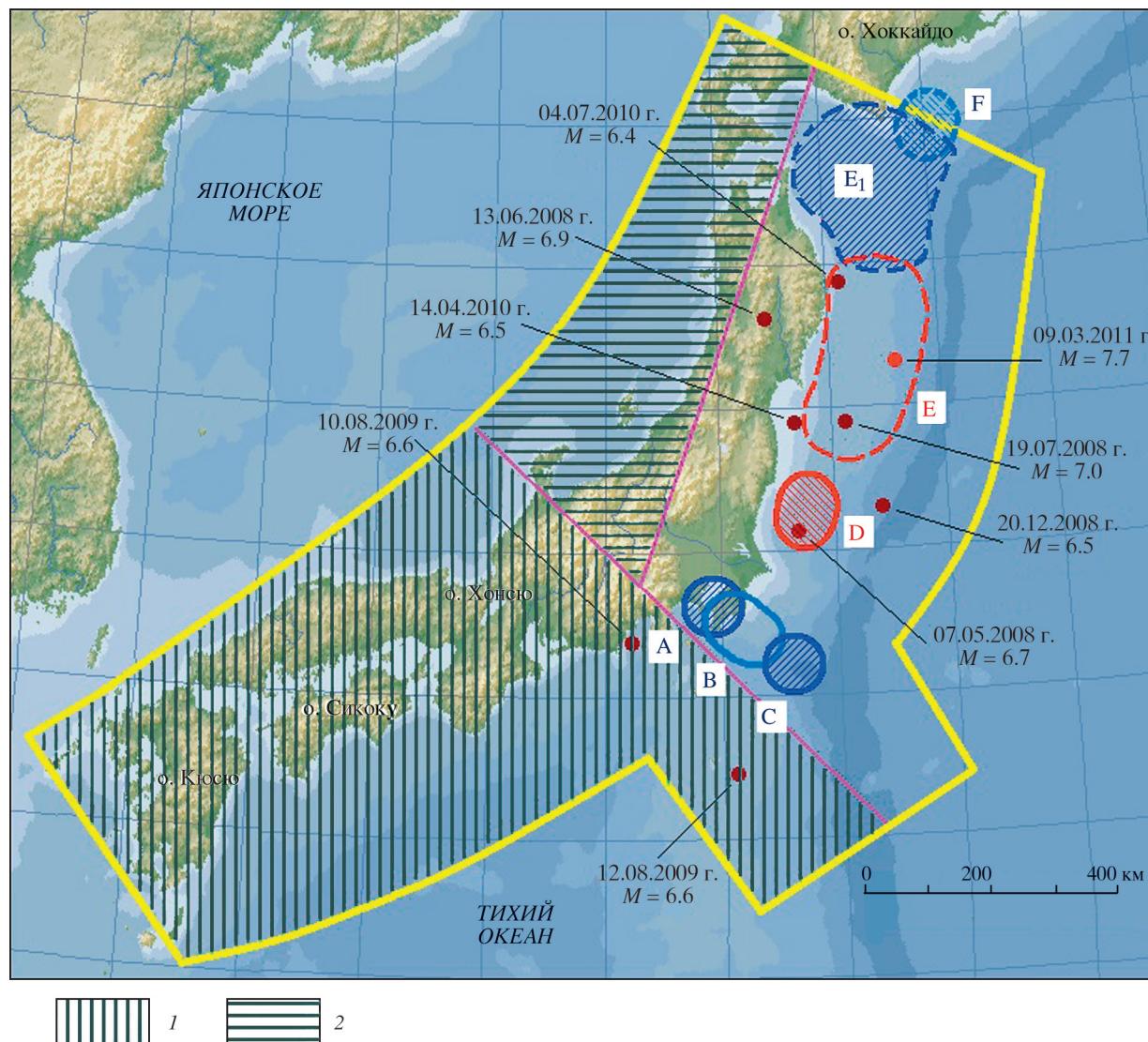


Рис. 6. Контролируемая область прогноза землетрясений (за вычетом областей 1 и 2) после февраля

2008 г. и динамика перемещения области неустойчивости в СС «Япония»

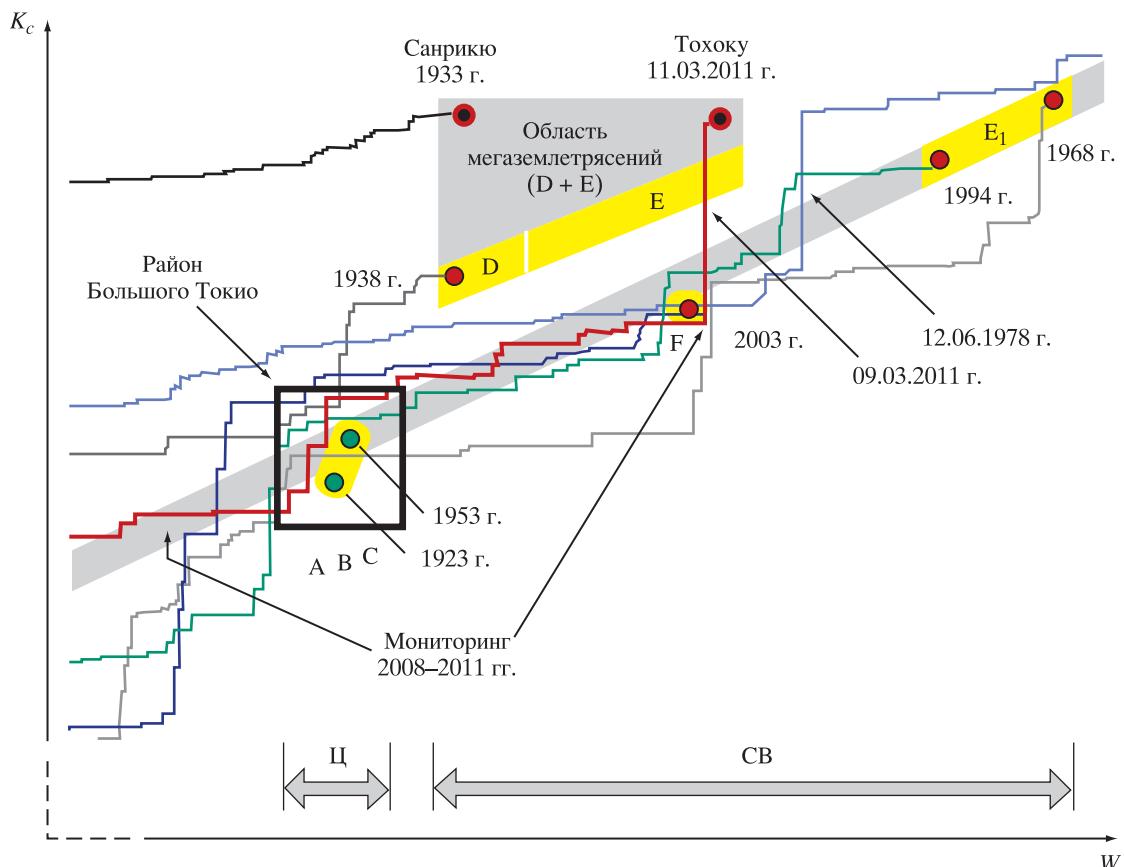
1 — область, опасная для юго-западной части СС «Япония» (см. рис. 4, 5); 2 — Охотоморская опасная область в северо-восточной части СС «Япония» (см. рис. 4, 5). Точками показаны эпицентры значимых землетрясений-индикаторов

Предыдущие траектории этот участок линейной зоны проходили без потери устойчивости, а для попадания в опасные локальные зоны D и E все время имелся дефицит кумулятивной энергии, равный энергии землетрясения-индикатора с  $M = 7.3\text{--}7.4$ . В ходе мониторинга до землетрясения Тохоку мы неоднократно сообщали на сайте ЦПЗ «ГеоКвейк», что цунамигенное катастрофическое землетрясение в обширной океанической зоне на северо-востоке о. Хонсю (в зонах D и E) может произойти в случае, если в СС «Япония» произойдет сильное землетрясение-индикатор с  $M \geq 7.4$ .

Итак, к началу 2011 г. трек снизу обогнул область неустойчивости землетрясения Токачи Оки

(зоны F) и направлялся в потенциально опасную зону E1. Это означало, что в дальнейшем, при умеренной сейсмической активизации, траектория должна была попасть в зону неустойчивости E1 (см. рис. 6). Но за два дня до мегакатастрофы, 09.03.2011 г., произошло наиболее сильное землетрясение-индикатор в сейсмическом цикле с 2003 г. (по разным определениям оно имело магнитуду от 7.4 (Геологическая служба США) до 7.7 (Служба срочных сообщений ГЦ РАН, г. Обнинск), которое резко изменило ситуацию в системе. Основываясь на положениях нашей модели, мы приняли верхний предел магнитуды 7.7.

На рис. 7 видно, что землетрясение 09.03.2011 г. сыграло роль триггера, резко приподняв траек-



**Рис. 7.** Фрагмент центральной и северо-восточной частей трековой диаграммы СС «Япония»  
Выделен трек мегаземлетрясения Токио. Отмечены два сильных землетрясения-индикатора 12.06.1978 г. и 09.03.2011 г., после которых треки скачкообразно изменили направление. А, В, ... F — зоны неустойчивости (см. рис. 6); (D + E) — суммарная область неустойчивости для мегаземлетрясений. Прямоугольником отмечена область атTRACTора в районе Большого Токио. Остальные пояснения см. в тексте

торию вверх. В результате траектория попала в опасную зону мегаземлетрясений (D + E). Спустя два дня, 11.03.2011 г., произошла мегакатастрофа Токио с очаговой областью в зонах Е и D. Рис. 6 наглядно показывает механизм подготовки очага землетрясения Токио (детально это землетрясение на основе фокальных механизмов афтершоков было исследовано в работе [Toda et al., 2011].) Зона критичности миновала боковые, северные (Е1, F) и южные (А, В, С) сегменты Японского желоба и переместилась в его центральную часть — в очаговую область землетрясения Токио (зоны Е, D), которая, как видно на рис. 2, б, выделялась как сейсмическая брешь [Федотов, 1965] в ансамбле сильных землетрясений.

#### Мониторинг вероятности и диссипативной функции

Динамическая вероятность сильного землетрясения при подготовке землетрясения Токио рассчитывалась по следующей формуле:

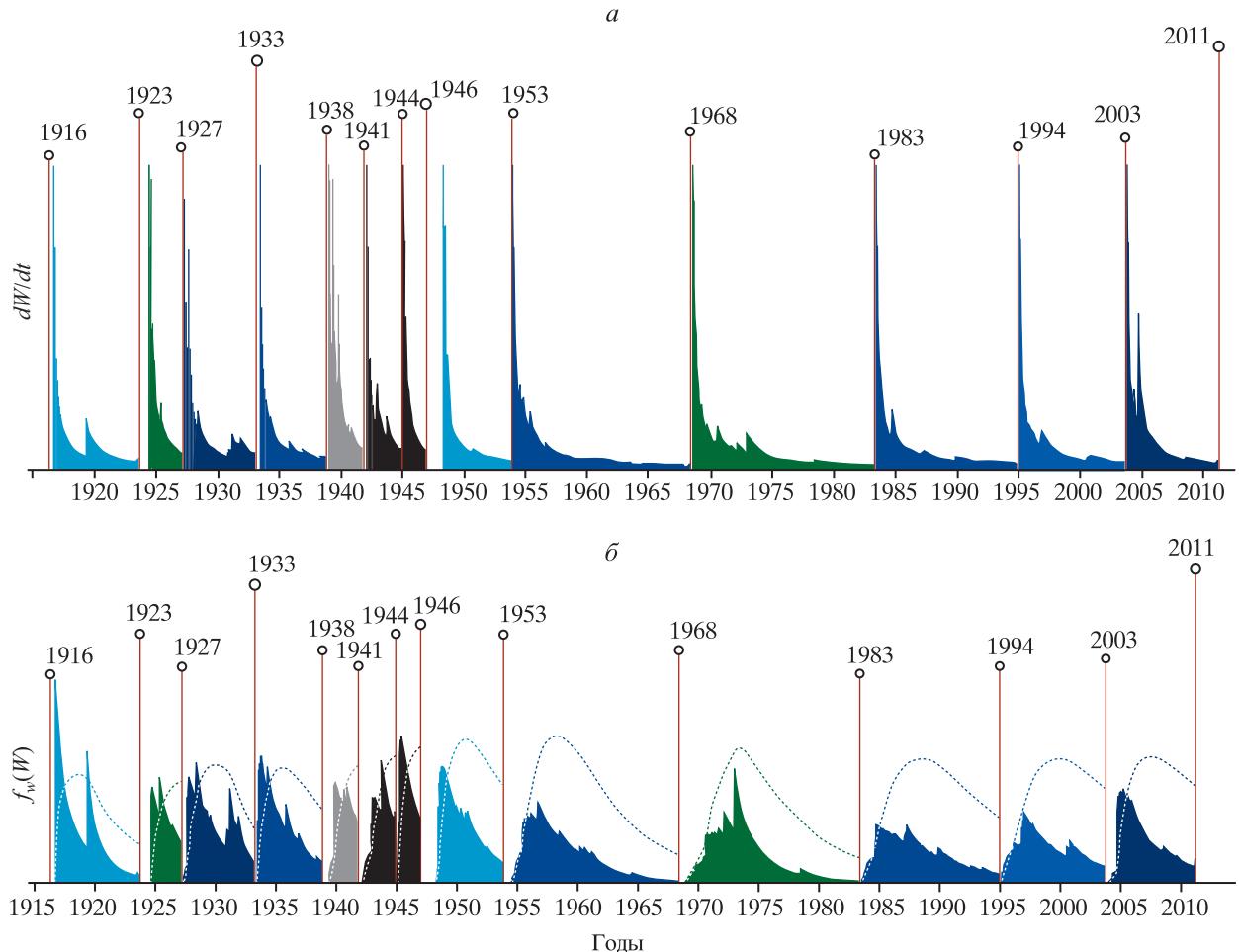
$$P = P_w P_k, \quad (7)$$

где  $P_w$  — вероятность по энтропии;  $P_k$  — вероятность по кумулятивному энергетическому классу, определяются по формулам [Акопян, 1995в]

$$P_w(W) = \int_0^W f_w(W) dW, \quad P_k(K_c) = \int_0^{K_c} f_k(K) dK, \quad (8)$$

$$f_w(W) = 1/\sigma_w \sqrt{2\pi} \exp\{-(W - W_0)^2/(2\sigma_w^2)\}, \\ f_k(K) = 1/\sigma_k \sqrt{2\pi} \exp\{-(K - K_0)^2/(2\sigma_k^2)\}, \quad (9)$$

где  $f_w(W), f_k(K)$  — функции Гаусса плотности распределения вероятностей;  $W_0$  и  $K_0$  — средние значения величин энтропии  $W$  и кумулятивного энергетического класса  $K_c$ ;  $\sigma_w, \sigma_k$  — среднеквадратичные отклонения. Параметры функций Гаусса определялись по формулам:



**Рис. 8.** Диаграммы распределения скорости производства энтропии (а) и функции плотности логнормального распределения вероятности (б) в сейсмических циклах СС «Япония». Для сравнения показана сглаженная кривая; вертикальный масштаб — произвольный

$$\begin{aligned} W_0 &= 1/n \sum W_f, \quad \sigma_w = \sqrt{\sum (W_j - W_0)^2 / n}, \\ K_0 &= 1/n \sum K_{cj}, \quad \sigma_k = \sqrt{\sum (K_{cj} - K_0)^2 / n}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $j$  — индекс суммирования ( $j = 1-14$ );  $n$  — число завершившихся сейсмических циклов.

Если имеется достаточно длинный ряд сейсмических наблюдений, то после каждого сейсмического цикла, начиная со второго, можно по формулам (10) рассчитать средние значения  $W_0$ ,  $K_0$ , среднеквадратичные отклонения  $\sigma_w$ ,  $\sigma_k$  и найти нормальные распределения (9) случайных величин — землетрясений-индикаторов. После землетрясения Тохоку в СС «Япония»  $W_0 = 18.24$ ,  $\sigma_w = 0.55$ , а  $K_0 = 16.60$ ,  $\sigma_k = 0.54$ .

В табл. 1 приведены вероятности сильных землетрясений, рассчитанные по формулам (7)–(9) в сейсмических циклах СС «Япония». Вероятность  $P$ , определяемая по формуле (7), обладает

замечательной особенностью: она вне аттрактора равна нулю, возрастает, когда трек входит в аттрактор, и приближается к 1 (к максимуму), когда трек проходит весь аттрактор. Самая низкая вероятность у землетрясения Танго 1927 г. ( $P = 15\%$ ), а самая высокая — у землетрясения 1983 г. ( $P = 87\%$ ).

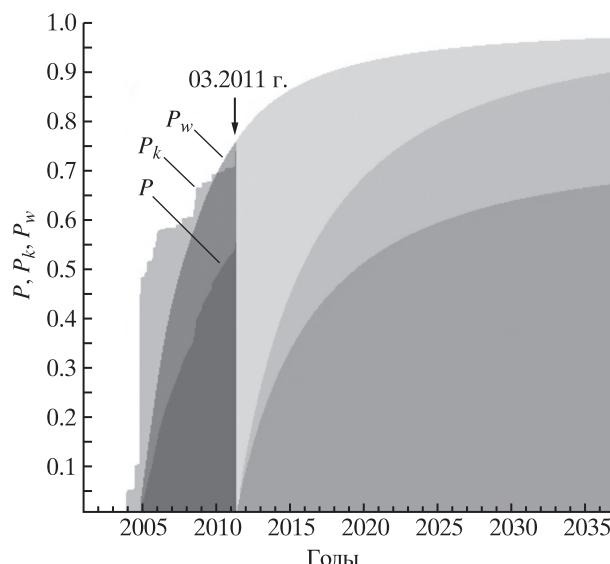
Вероятность по энтропии можно выразить через время  $T_m$ , прошедшее с конца предыдущего цикла [Акопян, 1995в]:

$$P_w(0 \leq T \leq T_i) = \int_0^{T_m} \Phi\{W(T)\} dT, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Phi_w\{W(T)\} &= f_w \frac{dW}{dT} = \frac{1}{\sigma_w} \sqrt{2\pi} \frac{dW}{dT} \times \\ &\exp[-(W - W_0)^2 / 2\sigma_w^2], \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$dW/dT = 1/(S \ln 10) dS/dT, \quad (13)$$



**Рис. 9.** Динамика роста вероятностей  $P$ ,  $P_w$ ,  $P_k$  сильного землетрясения в СС «Япония» во время подготовки землетрясения Тохоку  
Пояснения см. в тексте

а  $\Phi_w$  — логнормальная функция плотности распределения вероятности, которая определяется параметрами нормального распределения  $W_0$ ,  $\sigma_w$  и зависит от скорости изменения энтропии  $W$  во времени (производной). Производство энтропии в объеме сейсмической системы в единицу времени (с нормировкой  $\ln 10$ ) назовем функцией диссипации [Волькенштейн, 1986; Николис, Пригожин, 2003] и, подставляя в (13)  $dS/dT = E_c$ , запишем в виде

$$Q(T) = \ln 10 dW/dT = E_c(T)/S(T), \quad (14)$$

где  $1 \geq Q \geq Q_k$ .

Диссипативная функция зависит от отношения кумулятивной энергии к функции числа состояний. В начале сейсмических циклов, когда стартует траектория,  $E_c = S$  и  $Q = 1$ , затем диссипативная функция монотонно уменьшается, но в моменты землетрясений-индикаторов скачкообразно возрастает. В конце сейсмического цикла функция диссипации (необратимо) асимптотически стремится к конечному критическому состоянию  $Q_k$ , когда землетрясения-индикаторы больше не могут вернуть систему в равновесное состояние. Происходит сильное землетрясение, восстанавливающее равновесие в системе. Эти критические значения  $Q_k$  для сейсмических циклов Японии варьируют от 0.023 до 0.005 (см. табл. 1). С ростом энтропии  $Q_k$  убывают: для юго-западной части системы они высокие — 0.017–0.023, для центральной части — средние, 0.011–0.013, а для территории

к северо-востоку от о. Хонсю — низкие, 0.011–0.005. На рис. 8 приведены диаграммы диссипативной функции (14) и функции плотности логнормального распределения вероятности (12) для сейсмических циклов СС «Япония».

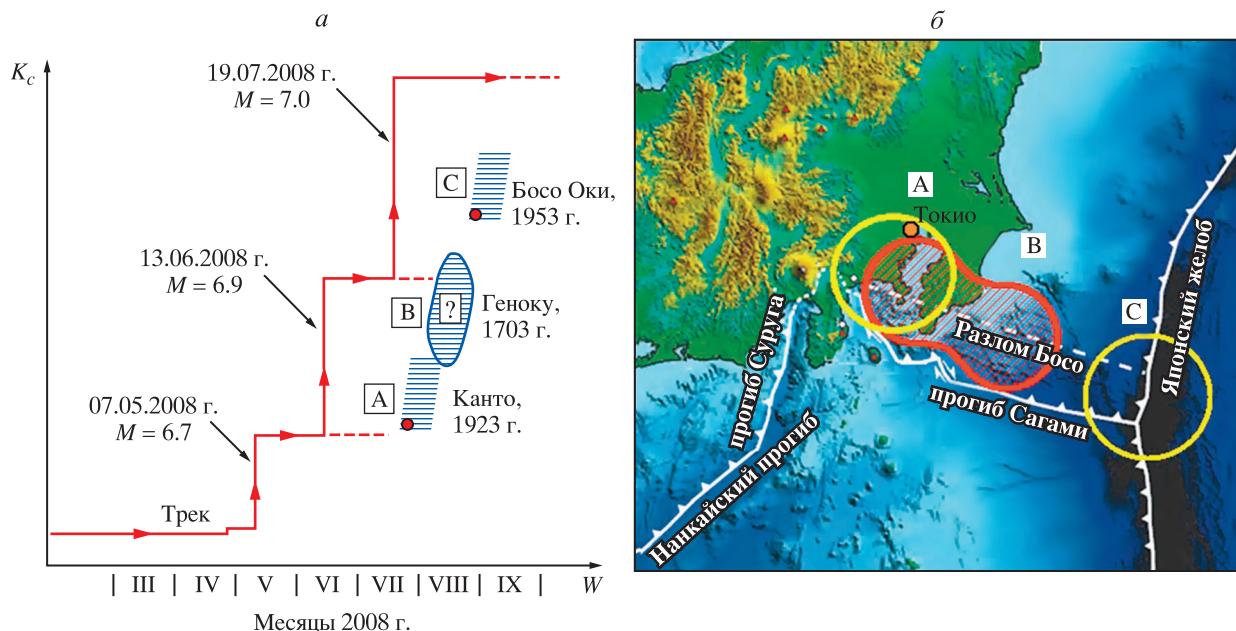
Скорость  $dW/dt$  (диссипативная функция  $Q$ ) как бы задает темп возрастания вероятности сильного землетрясения. Чем меньше диссипативная функция, тем больше вероятность сильного землетрясения. Поскольку в моменты времени землетрясений-индикаторов диссипативная функция резко возрастает, то возрастает и темп роста вероятности сильного землетрясения во времени.

Для землетрясения Тохоку на рис. 9 приведена диаграмма динамики роста вероятности потери устойчивости, рассчитанная на основе формул (7)–(13). Показан также рост условных вероятностей (11), (12) [Акопян, 1995в] на момент землетрясения. После 09.03.2011 г. вероятность  $P$  катастрофического землетрясения увеличилась на 7%. При мониторинге и прогнозе землетрясения Тохоку наряду с параметрами  $K(T)$  и  $W(T)$ , контролирующими траекторию, рассчитывались параметр  $Q(T)$  и вероятности  $P(T)$ ,  $P_w(T)$ ,  $P_k(T)$  на текущий момент времени.

#### Сейсмическая обстановка в районе Большого Токио в 2008 г.

Опасная сейсмическая ситуация, которая сложилась в середине 2008 г. в районе Большого Токио, была выявлена на основе нетрадиционного метода сейсмической энтропии. Если бы тогда произошло землетрясение прогнозируемой магнитуды 8.3, оно стало бы полной неожиданностью для сейсмологов, а последствия были бы намного катастрофичнее, чем при землетрясении Тохоку. Исторические землетрясения в области прогиба Сагами хорошо изучены [Grunewald, Stein, 2006; Nishimura et al., 2006; Nyst et al., 2006; Stein et al., 2006]. Детальное описание мониторинга района Большого Токио важно с точки зрения обеспечения будущей безопасности наиболее индустриально развитой, густонаселенной части Японии. Оно также демонстрирует точность метода сейсмической энтропии и возможности краткосрочного прогноза.

На рис. 10, а показан укрупненный фрагмент трековой диаграммы (аттрактора), отмеченный на рис. 7 прямоугольником. На этом участке проходило драматическое развитие траектории с апреля по сентябрь 2008 г. Показаны области неустойчивости землетрясений Канто 1923 г. и Босо Оки 1953 г., которые произошли в районе прогиба Сагами. К началу 2008 г. траектория обошла все зоны неустойчивости юго-западной части Японии (Танго, 1927 г.; Кюсю, 1941 г.; Тонанкай,



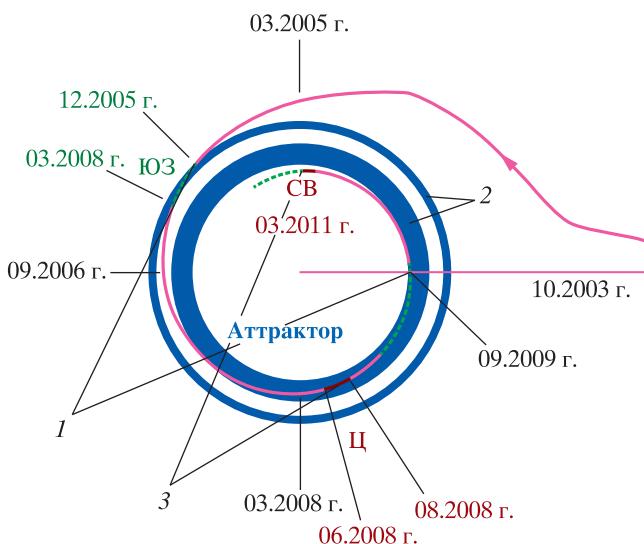
**Рис. 10.** Укрупненный фрагмент трековой диаграммы (а) и соответствующая динамика перемещения области неустойчивости (б) в центральной части СС «Япония» после февраля 2008 г. (см. также рис. 6, 7) Показаны области неустойчивости и очаговые зоны землетрясений 1923 г. (зона А), 1953 г. (зона С) и исторического землетрясения Геноку, 1703 г. (зона В)

1944 г.; Нанкайдо, 1946 г.). Это означало, что в этих районах до конца текущего сейсмического цикла сильное землетрясение с  $M \geq 7.8$  уже не могло произойти.

В феврале 2008 г. стало ясно, что траектория к середине года приблизится к области неустойчивости землетрясения Канто 1923 г. С июля по сентябрь 2008 г., согласно трековой диаграмме, в районе Токио ожидалось сильное землетрясение с  $M = 8.3$  и глубиной очага до 25 км. 21.02.2008 г. автор отправил письмо в Координационный комитет Японии по прогнозу землетрясений (Coordinating Committee for Earthquake Prediction, ССЕР) с подробным описанием этого прогноза и возможных сценариев развития сейсмичности. Там, в частности, было сказано, что трек подготовки сильного землетрясения находится в аттракторе и приближается к зоне неустойчивости землетрясений Канто 1923 г. (зона А) и Босо Оки 1953 г. (зона С) в Центральной Японии. На тот момент трек имел координаты  $K = 16.703$  и  $W = 18.261$ . Координаты ближайшей точки неустойчивости (землетрясения Канто), которую трек достигал к августу–сентябрю 2008 г., составляли  $K = 16.726$  и  $W = 18.339$ . Дефицит кумулятивной энергии трека по сравнению с землетрясениям Канто равнялся энергии землетрясения с  $M = 6.7$ , а по сравнению с землетрясением Босо Оки — энергии землетрясения с  $M = 7.1$ . Это означало, что любое землетрясение в системе с  $M = 6.7$  могло спровоцировать и

послужить предвестником Токийского землетрясения. Также в письме было указано, что г. Токио может «спастись», если в системе произойдет землетрясение с  $M = 7.1$ – $7.3$ . В этом случае катастрофическое землетрясение с  $M = 8.3$  может мигрировать в сторону океана, в зону С (см. рис. 10).

Фактически был дан средне-краткосрочный прогноз. В дальнейшем прогнозы подтвердились. 07.05.2008 г. в системе произошло землетрясение-индикатор с  $M = 6.7$  (см. рис. 6) и ситуация в районе г. Токио стала критической. Как видно на рис. 10, при сейсмическом затишье трек попадал в зону неустойчивости А исторического землетрясения Канто в конце июля 2008 г. «Спасение» г. Токио наступило за полтора месяца до возможной катастрофы. В системе произошли два сильных землетрясения-индикатора: 13.06.2008 г. с  $M = 6.9$  и 19.07.2008 г. с  $M = 7.0$  (см. рис. 6). Вначале опасная зона переместилась в сторону океана, предположительно в зону В исторического землетрясения Геноку 1703 г. (см. рис. 10) [Shishikura, 2003; Shishikura, Toda, 2003], затем сверху обошла зону С землетрясения Босо Оки 1953 г. и удалилась из района Большого Токио. Этот пример показывает, насколько динамично в системе может меняться сейсмическая ситуация и соответствующие прогнозы. Но вся эта драматическая картина осталась вне поля зрения японских сейсмологов, поскольку ее можно было «увидеть», только вооружившись методом сейсмической энтропии.



**Рис. 11.** Фазовая диаграмма землетрясения Тохоку ( $M = 9.0$ ) 11.03.2011 г.

Поворот на угол  $5^\circ$  соответствует 1 мес. Радиусы окружностей соответствуют значениям энтропии, при которых траектория пересекается с прямой регрессии или приближается к ней. Буквы — подсистемы СС «Япония»: СВ — северо-восточная; ЮЗ — юго-западная; Ц — центральная. 1 — участки трека, опасные для локальных зон системы по энтропии, но безопасные по энергии; 2 — области неустойчивости вблизи прямой регрессии; 3 — критические участки фазовой диаграммы, опасные и по энтропии, и по энергии

Отметим, что параметры локальной зоны неустойчивости, соответствующей в атTRACTоре Большому Токио (см. рис. 7, 10), не изменятся по крайней мере в ближайшие 100 лет, и катастрофическое ( $M = 7.8\text{--}8.3$ ) землетрясение в районе Большого Токио может произойти в будущем, только если траектория вновь приблизится к этой зоне.

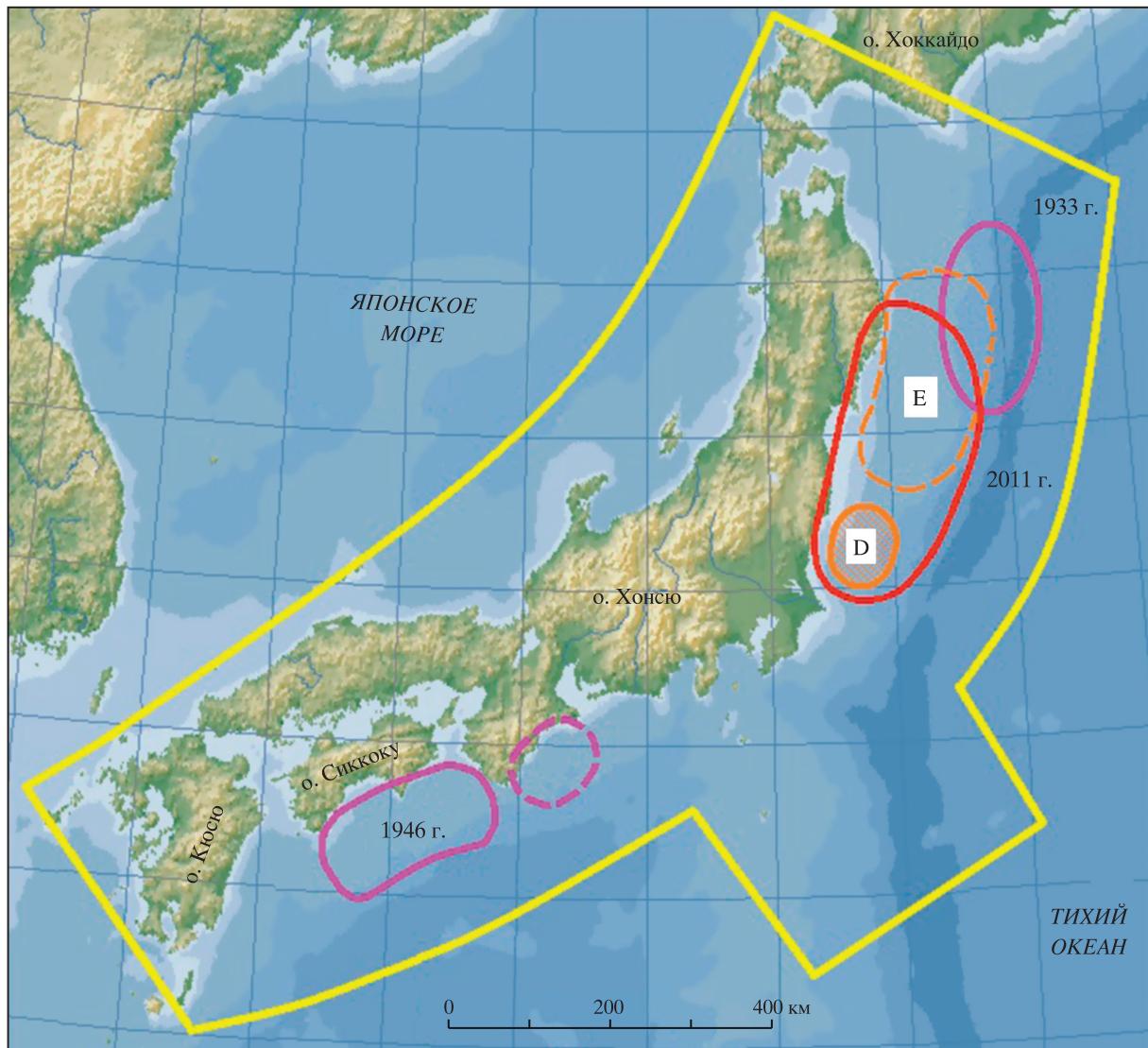
#### Фазовая диаграмма землетрясения Тохоку

Процесс подготовки катастрофического землетрясения Тохоку в СС «Япония» можно наглядно проиллюстрировать с помощью фазовой диаграммы (спиральной траектории), построенной по предлагаемому в [Акопян, 1995б] методу (рис. 11).

Положение траектории определяется в полярных координатах ( $R, \Phi$ ), где переменная  $R$  — расстояние от начала координат,  $\Phi$  — угловая координата. В качестве координаты  $\Phi$  выбрано время  $\Phi = T\Phi_0$ , где  $T$  — число месяцев, отсчитываемых с начала сейсмического цикла (в данном случае с сентября 2003 г.),  $\Phi_0 = 5^\circ$  — задаваемый шаг по углу, равный 1 мес. Вращение на угол  $2\pi$  на рис. 11 соответствует шести годам. В качестве координаты  $R$  выбрана разница между максимальным ( $W_{\max} = 20$ ) и текущим значением энтропии в системе:  $R(T) = W_{\max} - W(T)$ .

В начальный момент времени  $\Phi = 0$ ,  $R(0) = W_{\max}$ . Со временем  $W(T) \rightarrow W_{\max}$ , а  $R(T) \rightarrow 0$ . В процессе подготовки сильного землетрясения спиральная траектория, стремясь к центру окружности, приближается и пересекает критические окружности, соответствующие по энтропии пересечению траектории с локальными зонами неустойчивости внутри атTRACTора. В моменты землетрясений-индикаторов резко возрастает скорость движения траектории к центру. Радиус большой окружности соответствует значению энтропии вблизи зоны неустойчивости землетрясений 1941, 1944 и 1946 гг. на юго-западе системы. С декабря 2005 г. по март 2006 г. траектория по энтропии прошла на безопасном расстоянии выше зон неустойчивости этих землетрясений на трековой диаграмме (см. рис. 4 и 1 на рис. 11).

В дальнейшем спиральная траектория находилась вблизи прямой регрессии (внутри области 2 на рис. 11). С июня по август 2008 г. она прошла в опасной близости от зон неустойчивости 3 в районе Большого Токио в центральной части системы. С 2009 г. и вплоть до землетрясения Тохоку спиральная траектория по энтропии находилась в зоне неустойчивости к северо-востоку от о. Хонсю. На рис. 11 отмечен критический участок (3) фазовой диаграммы спустя 90 мес после начала сейсмического цикла, когда произошло триггерное землетрясение 09.03.2011 г., которое



**Рис. 12.** МегАСС «Япония»: контролируемая область прогноза землетрясений с  $M \geq 8.4$

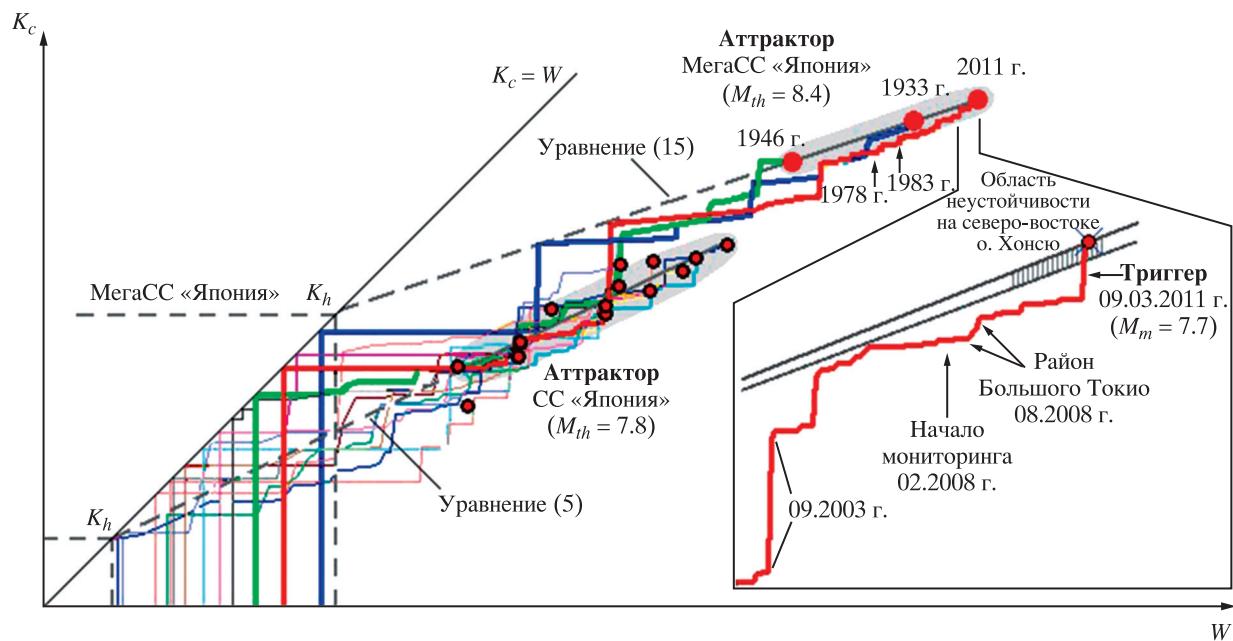
Показаны контуры — очаговые области мегаземлетрясений 1933, 1946 и 2011 гг.; D, E — прогнозические зоны ожидания мегакатастрофы по данным СС «Япония»

переместило траекторию от зоны регрессии в локальную зону неустойчивости аттрактора для мегаземлетрясений. Спиральная диаграмма является фазовым «портретом» катастрофического землетрясения Тохоку в СС «Япония»; полную картину подготовки этого землетрясения дает мегасейсмическая система «Япония».

#### МЕГАСЕЙСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ЯПОНИЯ» ( $M \geq 8.4$ )

В работе [Акопян, 1998] было показано, что сильные землетрясения, траектории которых сильно отклоняются от аттрактора, имеют дефицит производства энтропии, и для их полно-

го описания необходимо перейти к большим по размерам и/или пороговым магнитудам системам. Мегасейсмическая система (МегАСС) «Япония» имеет те же границы, что и СС «Япония» (см. рис. 1), но более высокую пороговую магнитуду —  $M_{th} = 8.4$ . Это означает, что все сильные землетрясения в СС «Япония» в диапазоне магнитуд  $7.8 \leq M < 8.4$  являются в мегасистеме землетрясениями-индикаторами и участвуют в подготовке мегаземлетрясений. МегАСС «Япония» относится к разряду недостаточно хорошо определенных, поскольку до мегаземлетрясения Тохоку начиная с 1896 г. имелись всего два завершившихся сейсмических цикла (для мегаземлетрясений Санрику 1933 г. и Нанкайдо 1946 г.).



**Рис. 13.** Трековая диаграмма МегАСС «Япония», совмещенная с диаграммой для СС «Япония» (см. рис. 4)

Жирными линиями показаны треки мегаземлетрясений. На врезке — участок трека подготовки землетрясения Токио с 2003 по 2011 г.

На рис. 12 показаны эпицентральные области, а на рис. 3 — сейсмические циклы этих мегаземлетрясений и средние периоды повторяемости внутри них циклов СС «Япония». В табл. 2 приведены параметры ансамбля мегаземлетрясений и значения параметров кумулятивного энергетического класса  $K_c$  и энтропии  $W$ , рассчитанные по формулам (1) и (2). АтTRACTор и энергетическая диаграмма МегАСС «Япония», рассчитанные на основе данных табл. 2, имеют вид:

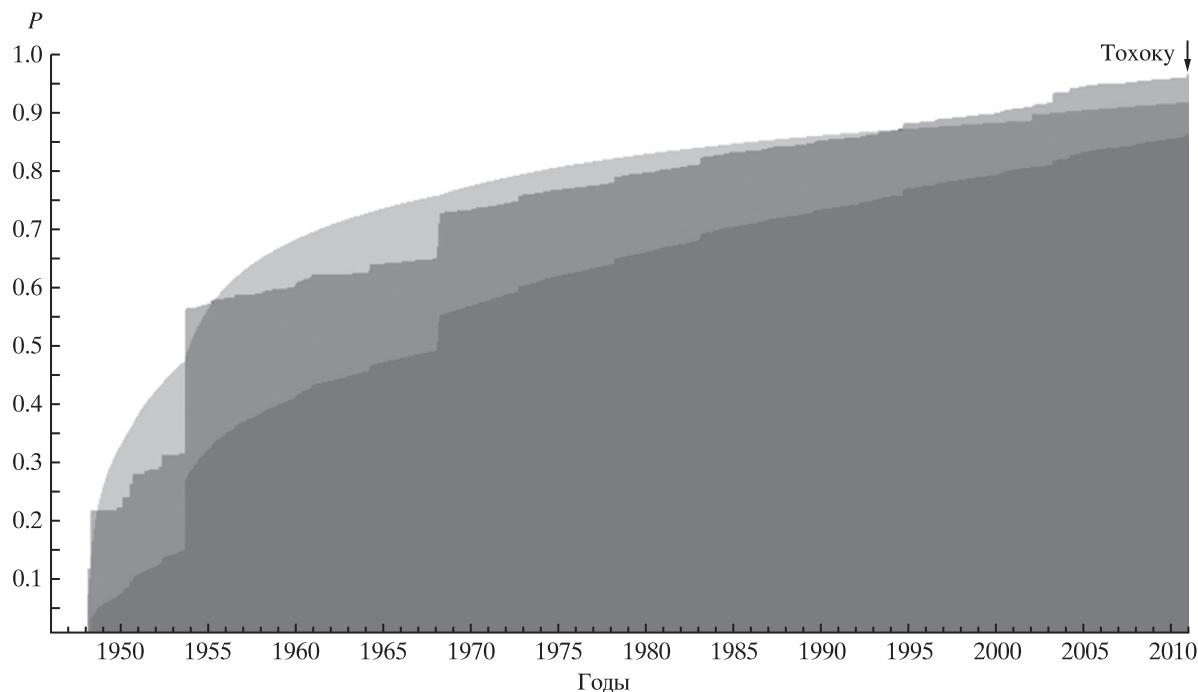
$$K_c = 0.337W + 11.064, \quad W > 19.450, \quad (15)$$

$$K_s = 0.670W + 4.168, \quad W > 19.450. \quad (16)$$

На рис. 13 приведена трековая диаграмма МегАСС «Япония». Для сравнения на этом же рисунке показан атTRACTор СС «Япония». Экстраполяция (15) до пересечения с диагональю (линией равновесия) позволяет определить значимый нижний порог землетрясений-индикаторов для МегАСС «Япония» [Akopian, Kocharyan, 2013]:  $K_h = 16.7, M_h = 7.9$ . Эти величины указывают на то, что основной энергетический вклад в подготовку мегаземлетрясений дают сильные землетрясения с  $7.8 \leq M < 8.4$ . На рис. 3 наряду с циклами сильных землетрясений СС «Япония» показаны мегацикли. Видно, что мегацикль подготовки землетрясения Токио отличается от мегациклов подготовки землетрясений 1933

**Таблица 2.** Параметры сильных ( $M \geq 8.4$ ) землетрясений МегАСС «Япония» после завершения трех сейсмических циклов (средний период повторяемости  $T = 38.3$  года)

$j$	Дата	Название, место	$\varphi$ , град. с.ш.	$\lambda$ , град. в.д.	$K$	$W$	$K_s$	$M_s$	$P_k, \%$	$P_w, \%$	$P, \%$	$Q$
0	15.06.1896 г.	Санрикю	38.00	143.00	—	—	17.3	8.5	—	—	—	—
1	02.03.1933 г.	Санрикю	39.20	144.50	17.88	20.20	17.7	8.7	93	99	92	0.002
2	20.12.1946 г.	Нанкайдо	33.00	135.60	17.63	19.46	17.2	8.4	75	80	60	0.007
3	11.03.2011 г.	Токио	38.32	142.37	18.00	20.59	18.0	9.1	95	92	88	0.001



**Рис. 14.** Динамика роста вероятности сильного ( $M \geq 8.4$ ) землетрясения в МегаСС «Япония» на 10.03.2011 г. ( $P = 87.53\%$ ;  $P_k = 95.21\%$ ;  $P_w = 91.93\%$ )

и 1946 гг. большей продолжительностью и большим средним периодом повторяемости внутренних циклов.

Удлинение мегацикла подготовки землетрясения Тохоку объясняется тем, что статическое производство энтропии в нем доминировало над динамическим [Акопян, 1998]. Это является результатом постоянного дефицита суммарной энергии землетрясений-индикаторов трека в процессе подготовки мегаземлетрясения Тохоку, стартовавшего после землетрясения Нанкайдо в 1946 г. На рис. 13 видно, что трек развивался намного ниже аттрактора. Такое поведение трека с дефицитом энергии объясняет, почему в 1978 г. землетрясение-индикатор Миаги кен Оки не привело к мегакатастрофе, и столь высокую энергию (магнитуду), накопленную системой при землетрясении Тохоку.

На врезке рис. 13 показано развитие трека после землетрясения Токачи Оки в 2003 г. до катастрофы 11.03.2011 г. Землетрясение Токачи Оки приблизило траекторию к зоне неустойчивости (формула (15)), но до сентября 2008 г. сохранялся существенный дефицит кумулятивной энергии землетрясений-индикаторов. К сентябрю 2008 г. трек за несколько месяцев (как было описано выше) «подпрыгнул», обошел область неустойчивости района Большого Токио и приблизился (поднялся) к области неустойчивости мегакатастроф, соответствующей северо-восточной части

о. Хонсю (см. рис. 13), которая стала уже достижимой посредством энергии одного сильного землетрясения-индикатора.

К марта 2011 г. траектория накопила рекордную энтропию ( $W = 20.585$ ), достаточную для того, чтобы, согласно уравнениям (15), (16), система могла разрядиться только посредством мегаземлетрясения с  $M = 9.0$ . Но траектория находилась еще ниже аттрактора (см. уравнение (15)) — дефицит энергии равнялся энергии землетрясения-индикатора с  $M = 7.5$ – $7.7$ . Поэтому, как только произошло землетрясение 09.03.2011 г., трек резко приподнялся, попал в аттрактор с параметрами  $K = 17.995$ ,  $W = 20.585$  и сразу последовала мегакатастрофа. Все произошло настолько быстро, что из-за неопределенности магнитуды триггерного землетрясения нам не удалось опубликовать на сайте краткосрочный прогноз землетрясения Тохоку.

Аналогично, триггером для землетрясения Нанкайдо 1946 г. было землетрясение Тонанкай 1944 г. (см. рис. 13). Но тогда магнитуда триггерного землетрясения Тонанкай была несколько больше дефицита энергии и траектория в конце 1944 г. миновала («перепрыгнула») зону неустойчивости, попав туда только после двухлетнего затишья. Сказанное показывает, насколько важно для прогноза землетрясения оперативное и точное определение магнитуд сильных землетрясений-индикаторов.

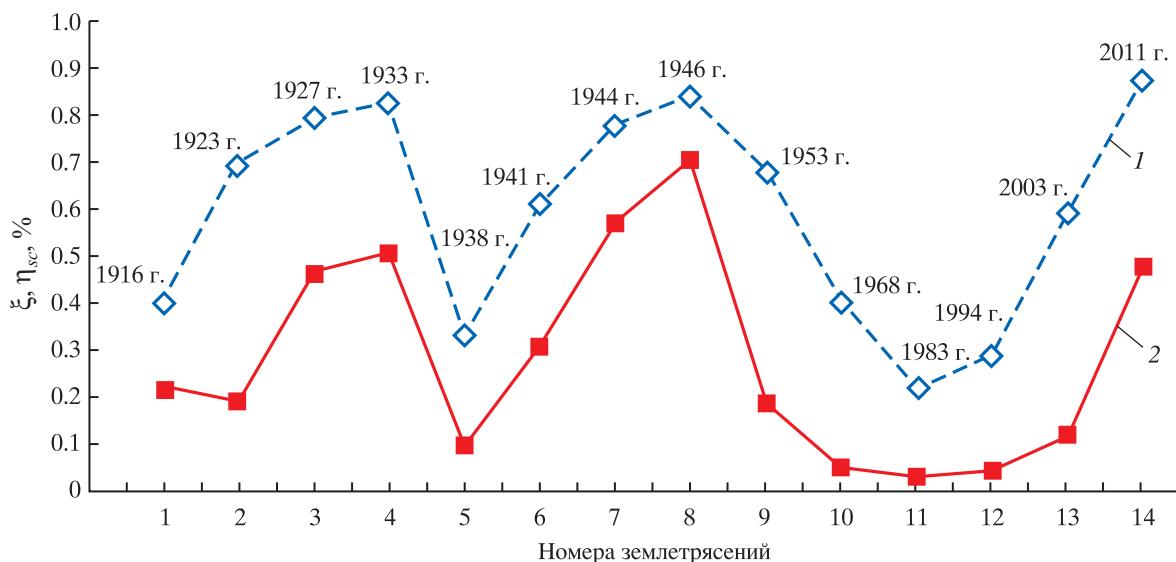


Рис. 15. Графики  $\xi$  (1) и  $\eta_{sc}$  (2) для ансамбля 14 сильных землетрясений СС «Япония»  
1–14 — номера землетрясений, см. табл. 1

Теперь приведем количественные определения описанного процесса. Подставляя величину энтропии трека  $W = 20.585$  перед землетрясением Тохоку в уравнение (15), получим  $K = 18.001$ , а параметр кумулятивной энергии трека после 09.03.2011 г. достиг значения  $K = 17.995$ , т.е. магнитуда землетрясения 09.03.2011 г.  $M = 7.7$  в точности компенсировала дефицит энергии землетрясений-индикаторов, необходимой для потери устойчивости, и сыграла роль триггера землетрясения Тохоку. Подставляя энтропию  $W = 20.585$  в уравнение (16), получим  $K_s = 18.0$ , что соответствует магнитуде 9.1. Это свидетельствовало о подготовке мегакатастрофы Тохоку к северо-востоку от о. Хонсю, в марте 2011 г. ее возникновение было неизбежно и полностью предсказуемо на основе двух предыдущих мегациклов.

На рис. 14 показана динамика роста вероятностей (7), (8) землетрясения Тохоку в МегАСС «Япония». Вероятность мегакатастрофы в начале марта 2011 г. уже была очень высокой, а после землетрясения-индикатора 9 марта она скачкообразно увеличилась на 2% и стала равной  $P = 87.53\%$  ( $P_w = 91.93\%$ ,  $P_k = 95.21\%$ ). Диссипативная функция перед землетрясением Тохоку достигла рекордно низкого значения — 0.001 (см. табл. 2).

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЯПОНИИ

В [Акопян, 1995б; Акопян, Рогожин, 2013] был введен коэффициент эффективности работы сейсмической системы  $\eta_{sc}$ , равный отношению произ-

водства энтропии во время сильного землетрясения  $\Delta W$  к полному производству энтропии  $W$  внутри сейсмического цикла. В общем виде этот коэффициент можно записать как

$$\eta_{sc} = E_s / (E_{sf} + E_s), \quad (17)$$

где  $E_{sf}$  — полная кумулятивная неупругая энергия, выделившаяся в объеме системы в сейсмическом цикле при подготовке сильного землетрясения:

$$E_{sf} = \xi \ln(10) S \lg(S), \quad (18)$$

$$\xi = E_s / (E_s + E_c). \quad (19)$$

Параметр  $\xi$  зависит от отношения  $E_c/E_s$ . Если  $E_c \ll E_s$ , то  $\xi = 1$ ; если  $E_c = E_s$ , то  $\xi = 0.5$ . Коэффициент (17) существенно отличается от КПД сейсмического излучения для очага землетрясения в сейсмологии [Wiss, Brune, 1971; Касахара, 1985]. Формула (17) характеризует КПД работы всего объема сейсмической системы в процессе подготовки и реализации сильного землетрясения, включая кумулятивные необратимые процессы  $E_{sf}$  вне и внутри очаговых зон. В табл. 3 приведены значения  $\xi$ ,  $\eta_{sc}$ ,  $E_{sf}$  для ансамбля сильных землетрясений в СС «Япония» и МегАСС «Япония». Видно, что системы потратили колоссальные усилия для производства землетрясения Тохоку. На рис. 15 приведен график  $\xi$ ,  $\eta_{sc}$  для ансамбля сильных землетрясений СС «Япония». Коэффициенты  $\xi$ ,  $\eta_{sc}$  для мегаземлетрясений — самые высокие, а для Япономорского землетрясения — самые низкие.

**Таблица 3.** Упругие и неупругие параметры ансамбля сильных землетрясений в сейсмических системах Японии

$j$	Год события	$\xi$	$\eta_{sc} \%$	$E_{sf}$
СС «Япония»				
0	1909	—	—	—
1	1916	0.41	0.22	1.80E+19
2	1923	0.70	0.19	6.47E+19
3	1927	0.80	0.47	1.06E+19
4	1933	0.83	0.51	9.70E+19
5	1938	0.34	0.10	3.87E+19
6	1941	0.62	0.31	1.60E+19
7	1944	0.78	0.58	2.17E+19
8	1946	0.84	0.71	2.23E+19
9	1953	0.69	0.19	6.48E+19
10	1968	0.41	0.06	1.41E+20
11	1983	0.22	0.03	1.21E+20
12	1994	0.29	0.05	8.41E+19
13	2003	0.60	0.12	1.07E+20
14	2011	0.88	0.48	1.64E+20
МегаСС «Япония»				
0	1896	—	—	—
1	1933	0.36	0.03	3.90E+21
2	1946	0.21	0.05	1.34E+21
3	2011	0.32	0.01	1.64E+22

### РЕЗЮМЕ

Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в Японии на основе разработанного автором метода сейсмической энтропии позволяет по-новому интерпретировать накопленную сейсмическую информацию, оно открывает возможность контролировать сложные динамические процессы взаимодействия плит в районе о. Хонсю. Построение энергетических и трековых диаграмм позволило выявить ансамбль сильных землетрясений Японии и установить область их подготовки в большом объеме литосферы.

В статье приведены пространственно-временные прогностические критерии, которые дали возможность производить мониторинг и давать прогноз в реальном масштабе времени подго-

товки мегаземлетрясения Тохоку. Мониторинг в рамках СС «Япония» позволил выявить области неустойчивости внутри аттрактора, соответствующие юго-западной части о. Хонсю (включая острова Кюсю и Сикоку), району Большого Токио и северо-востоку о. Хонсю.

Зарождение неустойчивости в дискретных объемах среды контролируется такими сейсмическими параметрами, как кумулятивная энергия, энтропия, вероятность потери устойчивости, диссипативная функция, рассчитываемые на основе землетрясений-индикаторов. Детальное изучение структуры аттракторов и траекторий подготовки землетрясений показывает, что решающую роль в процессе подготовки сильных

( $M \geq 7.8$ ) землетрясений Японии играют землетрясения-индикаторы с  $6.6 \leq M < 7.8$ , а в подготовке мегаземлетрясений ( $M \geq 8.4$ ) — землетрясения-индикаторы с  $7.8 \leq M < 8.4$ .

В процессе подготовки землетрясений область неустойчивости мигрирует внутри объема сейсмической системы от одной разломной (субдукционной) зоны к другой и может перерастти в мегаземлетрясение. Комплексирование атTRACTоров иерархии сейсмических систем позволяет выработать устойчивые прогностические критерии. Введены и рассчитаны коэффициенты эффективности работы сейсмических систем с учетом необратимых процессов не только во время землетрясений, но и в процессе их подготовки.

## ЛИТЕРАТУРА

- Акопян С.Ц. Энтропия сейсмической системы и новый сейсмический закон // Докл. РАН. 1995а. Т. 340, № 4. С. 531–535.
- Акопян С.Ц. Мониторинг сейсмической энтропии и проблема прогноза землетрясений // Докл. РАН. 1995б. Т. 341, № 2. С. 247–250.
- Акопян С.Ц. Вероятностный подход к проблеме прогноза землетрясений и эффективность работы сейсмической системы // Докл. РАН. 1995в. Т. 341, № 5. С. 682–685.
- Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11–26.
- Акопян С.Ц., Рогожин Е.А. Моделирование кинематики Тавро-Кавказского региона и динамика подготовки сильных землетрясений с  $M \geq 7.1$  // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40, № 2. С. 5–24.
- Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М.: Наука, 1986. 192 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Множественная регрессия. 3-е изд. М.: Диалектика, 2007. 912 с.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Лутиков А.И. Катастрофическое землетрясение Тохоку 11.03.2011 г.: предварительный сейсмологический анализ // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 2. С. 37–48.
- Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 9–35.
- 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. 3–12.
- Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. М.: Едиториал УРРС, 2003. 344 с.
- Рогожин Е.А. Строение очага землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ( $M = 9.0$ ) в Японии, его макросейсмические, сейсмологические и геодинамические проявления // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 1. С. 5–20.
- Рогожин Е.А., Юнга С.Л., Родина С.Н. Особенности реализации сейсмотектонических деформаций при генезисе очага землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 2. С. 22–36.
- 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.
- 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
- Федотов С.А. О закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66–93.
- Akopian S.Ts. On line mode monitoring and forecast megaearthquake Tohoku, March 11, 2011 // ESC 2012, 19–24 August 2012, Obninsk: Book of Abstr. M.: Poligrafics, 2012. P. 215.
- Akopian S.Ts., Kocharian A.N. The time evolution of seismic systems and non-equilibrium dynamics in ensemble of strong earthquakes // ESC 2012, 19–24 August 2012, Obninsk: Book of Abstr. M.: Poligrafics, 2012. P. 199.
- Akopian S.Ts., Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophys. J. Int. October 25, 2013. DOI: 10.1093/gji/ggt398.
- Al-Kindy F.H., Main I.G. Testing self-organized criticality in the crust using entropy: A regionalized study of the CMT global earthquake catalogue // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 2521–2529.
- Bird P., Kreemer C., Holt W.E. A long-term forecast of shallow seismicity based on the global strain rate map // Seism. Res. Lett. 2010. V. 81, No. 2. P. 184–194.
- Grunewald E.D., Stein R.S. A New 1649–1884 Catalog of destructive earthquakes near Tokyo and implications for the long-term seismic process // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, B12306. DOI: 10.1029/2005JB004059.
- Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomenon. 2nd ed. Princeton: Princeton Univ. Press, 1954. 310 p.
- Ishida M. Geometry and relative motion of the

- Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 489–513.
- Jordan T.H., Chen Y.-T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J. Operational earthquake forecasting: State of knowledge and guidelines for utilization // Ann. Geoph. 2011. V. 54, No. 4. P. 315–391.
- Kanamori H. Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1973. V. 1. P. 213–239.
- Main I.G., Al-Kindy F.H. Entropy, energy, and proximity to criticality in global earthquake populations // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. DOI:10.1029/2001GL014078.
- Matsuda T. Active faults and active folding // Symp. Res. Earthq. Predict. 1968. P. 46–49 (in Japan.).
- Mogi K. Long term precursors of the 1983 Japan Sea earthquake // Rep. Earthq. Swarm Study Group. 1983. P. 5 (in Japan.).
- Mogi K. 1983 Japan Sea earthquake ( $M = 7.7$ ) and seismotectonics in northeastern Japan // Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ. 1985. V. 60. P. 401–428 (in Japan.).
- Nasu N. Supplementary study on the stereometrical distribution of the aftershocks of the great Tango earthquake of 1927 // Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ. 1935. V. 13. P. 325–399.
- Nishimura T., Sagiya T., Stein R.S. Crustal block kinematics and seismic potential of the Northernmost Philippine Sea plate and Izu microplate, Central Japan, inferred from GPS and leveling data // J. Geophys. Res. 2006. V. 112. DOI: 10.1029/2005JB004102.
- Nyst M., Nishimura T., Pollitz F.F., Thatcher W. The 1923 Kanto earthquake reevaluated using a newly augmented geodetic data set // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, B11306. DOI: 10.1029/2005JB003628.
- Shimazaki K., Mori J. Focal mechanism of the May 26, 1983 Japan Sea earthquake // Seismol. Soc. Japan. 1983. No. 2. P. 15.
- Stein R.S., Toda S., Parsons T., Grunewald E. A new probabilistic seismic hazard assessment for greater Tokyo // Phil. Trans. Royal. Soc. Ser. A. Math. Phys. and Eng. Sci. 2006. V. 364, No. 1845. P. 1–25. DOI: 10.1098/rsta.2006.1808.
- Shishikura M. Cycle of interpolate earthquake along the Sagami trough, deduced from tectonic geomorphology // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 2003. V. 78. P. 245–254.
- Shishikura M., Toda S. Recurrence of characteristic Kanto earthquakes and unusual 1703 type earthquakes inferred from emerged shoreline topography // Eos Trans. AGU. 2003. V. 84(46). Fall Meet. Suppl. Abstr. P. S51G-08.
- Toda S., Stein R.S., Lin J. Widespread seismicity excitation throughout Central Japan following the 2011  $M = 9.0$  Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, L00G03. DOI: 10.1029/2011GL047834.
- 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 // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1979. V. 54. P. 253–308 (in Japan.).
- Utsu T. Catalog of large earthquakes in the region of Japan from 1885 through 1980 // Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo. 1982. V. 57. P. 401–463 (in Japan.).
- Vertical movements in the northern part of Tohoku district // Rep. Coord. Comm. Earthquake Predict. 1982. V. 27. P. 29–44.
- Wiss M., Brune J.N. Regional variations of source properties in Southern California estimated from the ratio of short- to long-period amplitudes // Bull. Seismol. Soc. Amer. Univ. Tokyo. 1971. V. 61. P. 1153–1167.
- Yamasaki N., Tada F. The Oku-Tango earthquake of 1927 // Bull. Earthq. Res. Inst. 1928. V. 4. P. 159–157.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**АКОПЯН САМВЕЛ ЦОЛАКОВИЧ** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10.

Тел.: +7 (499) 254-90-95. E-mail: sakopian@yandex.ru

## SEISMIC SYSTEMS OF THE JAPAN, ENTROPY AND MONITORING OF THE TOHOKU MEGAEARTHQUAKE, MARCH 11, 2011

S.Ts. AKOPIAN

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** The method of seismic entropy allows revealing large volumes of the lithosphere in Japan responsible for the nucleation of strong earthquakes of a certain energy level. The description of seismic systems in Japan responsible for nucleation of an ensemble of strong ( $M \geq 7.8$ ) earthquakes is provided. Parameters of cumulative energy and entropy allow describing dynamic behavior and temporal evolution of the complex constructed seismically active structures of lithosphere in the area of Honshu Island, formed by the interaction of the Pacific, Philippine and Eurasian plates. The revealed systems and regularities give the possibility to control development of seismic processes and to predict instability origin at long, medium and short-term stages of nucleation of the catastrophic earthquakes in Japan. Capabilities of the method are shown on the example of monitoring and the forecast of a recent catastrophic earthquake Tohoku, March 11, 2011 in the seismic and megaseismic systems of Japan, conducted in real time based on track and energy diagrams.

**Keywords:** seismic cycle, mathematical modeling, instability analysis, earthquake dynamics, monitoring seismicity.