

УДК 550.3

## РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ТАЙВАНЯ В 1999 И 2002 гг.

© 2016 г. И. П. Кузин, **А. Б. Фленов***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: ivkuzin2013@yandex.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2014 г.

В данной работе анализируются особенности сейсмического режима перед сильнейшими землетрясениями Тайваня в конце XX (Чи-Чи, 21 сентября 1999 г.,  $M_w = 7.6$ ) и начале XXI вв. (31 марта 2002 г.,  $M_w = 7.4$ ). По данным за 1990–1999 и 1994–2002 гг. соответственно ретроспективно изучались вариации трех параметров сейсмического режима: общего годового числа землетрясений  $N_2$  в диапазоне величин  $M_L = 2.5–5.5$  и  $M_w = 3.0–7.0$ , общего годового количества высвобожденной сейсмической энергии  $\Sigma E, J$  и углового коэффициента графиков повторяемости  $b$ . Были выявлены два явных подпериода в ходе сейсмического режима – затишье в 1990–1996 гг. перед землетрясением Чи-Чи и 1994–1997 гг. перед мартовским землетрясением 2002 г. Соответственно, в 1997–1999 гг. в первом случае и в 1998–2002 гг. во втором наблюдалась сейсмическая активизация. Вследствие преобладания слабых землетрясений в период подготовки землетрясения Чи-Чи оказался завышенным коэффициент  $b$  ( $-1.16$  в среднем), перед мартовским землетрясением 2002 г. из-за возникновения землетрясений с  $M_w = 6.8–7.0$  значения коэффициента  $b$  оказались пониженными, а именно  $-0.55$  для периода затишья и  $-0.74$  для периода активизации. Несмотря на существенное различие сейсмотектонической обстановки в областях возникновения землетрясений и диапазонах энергий исходных сейсмических событий, результат выполненных исследований получился сходным. В обоих случаях главное землетрясение возникло на максимуме высвобожденной энергии, что можно рассматривать как совпадение. Для подтверждения этой положительной тенденции необходимо накопление данных с целью уверенного статистического обоснования.

DOI: 10.7868/S0030157416030126

### ВВЕДЕНИЕ

Ретроспективный анализ сейсмического режима широко используется в сейсмологических исследованиях. Известны многие программы прогнозирования сильных землетрясений, как глобального (например, Калифорния – Невада – КН [1, 3], Магнитуда 8 [4, 14], Сценарий Мендосино-MSc [18]), так и регионального характера – RTL [11], Algorithm MEE [26]. На выходе алгоритмов глобальных программ выдается перечень зон или территорий в сейсмически активных регионах, где возможно возникновение сильных землетрясений, а также периодов времени, в течение которых они могут возникнуть. В более поздних региональных программах, RTL [11] и Алгоритм MEE [26], наряду со статистикой учитываются физические предвестники сильных землетрясений (плотность сейсмогенных разрывов, наклон графиков повторяемости землетрясений, число землетрясений в единицу времени, высвобожденная сейсмическая энергия). Поскольку задачей настоящей статьи не является прогноз силь-

ных землетрясений, обсуждение упомянутых программ выходит за ее рамки. Тем не менее, при ретроспективном анализе сейсмического режима перед сильнейшими землетрясениями Тайваня целесообразно использовать подход к выбору пространственно-временных рамок, применяемый в этих программах. Рассмотрим некоторые примеры выбора этих параметров, а также имеющиеся документы, регламентирующие такой выбор. Следует отметить, что конкретные требования к выбору длительности периода ретроспективного исследования сейсмического режима отсутствуют. Например, чтобы проверить алгоритм M 8 по данным для сейсмических районов Центральной Азии, Центральной Америки и некоторых дуг (Курило-Камчатской) был выбран период 8 лет, а для Тихого океана до 15 лет [5, 10]. Вместе с тем согласно документу [2] для алгоритма Калифорния Невада (КН) был рекомендован период ретроспективных исследований сейсмического режима 17 лет для землетрясений с  $M = 6.4–7.5$  в тех же регионах.

Размеры регионов при ретроспективном изучении сейсмического режима колеблются в более широком диапазоне, чем длительность периодов. Так, исследования сейсмического режима Тихоокеанского сейсмического пояса при прогнозировании землетрясений с  $M = 8$  проводились в кругах радиуса 427 км от центра на оси пояса или в перекрывающихся прямоугольниках со сторонами  $12^\circ$  по широте и долготе [4, 14]. На территории Российской Федерации исследования по региональной программе RTL [11] для землетрясений с  $M = 8$  проводились в кругах радиусом 100 км вокруг эпицентра. В документе [2] для определения линейных размеров исследуемого района рекомендуется уравнение:

$$\log L = \log \exp M - 5.6, \quad (1)$$

где  $L$  определяется в градусах дуги большого круга. Согласно этому уравнению значение  $L$  для  $M = 8$  составляет  $10^\circ$ , а для  $M = 7.5$  — около  $6^\circ$ . Отсюда следует, что при умеренной продолжительности периода исследований рекомендуемые линейные размеры исследуемой территории в соответствии с уравнением (1) очень велики.

В данной работе ретроспективный анализ особенностей сейсмического режима Тайваньского региона выполнялся перед разрушительными землетрясениями Чи-Чи ( $M_w = 7.6$ ) в сентябре 1999 г. и в марте 2002 г. ( $M_w = 7.4$ ). В перспективе накопление информации об известных сильных землетрясениях может помочь в повышении эффективности программ прогнозирования с учетом тектоники конкретных регионов и типизации механизмов исходных сильных землетрясений.

### Сейсмичность области Тайваня и исходные материалы

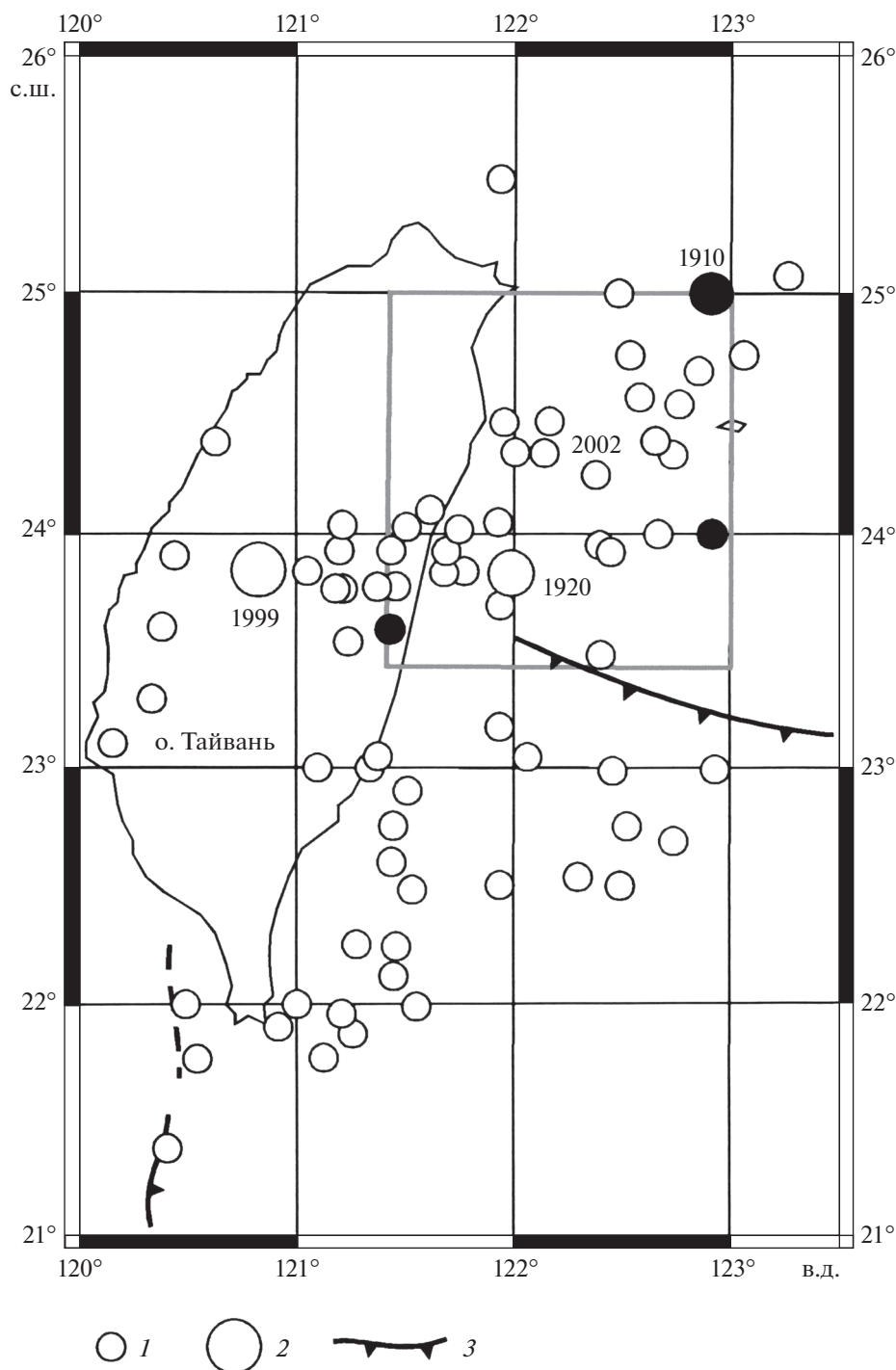
**Сейсмичность.** Тайвань характеризуется высокой сейсмичностью, которая обусловлена сложной тектоникой. С точки зрения тектоники плит в районе Тайваня выделяются две зоны субдукции разной полярности, разделенные зоной коллизии. Собственно остров расположен на Евразийской плите вблизи ее границы с Филиппинской. К югу от  $22.5^\circ$  с.ш. наблюдается субдукция океанической коры Южно-Китайского моря под Филиппинскую плиту в восточном направлении, в результате которой возникло столкновение (коллизия) этой плиты с континентальной окраиной Китая на участке от  $22.5^\circ$  до  $24.5^\circ$  с.ш. [15]. Этот процесс способствовал формированию горных хребтов Тайваня. На северо-востоке острова к северу от  $24.5^\circ$  с.ш. (от  $23.7^\circ$  по [24]) существует зона обратной субдукции, в которой Филиппинская плита погружается под Евразийскую с ЮВ на СЗ.

Большинство гипоцентров слабых и умеренных землетрясений сосредоточено в земной коре и прилегающей части мантии вблизи границ Фи-

липпинской плиты и в прибрежной зоне острова. Кроме того, они приурочены к многочисленным тектоническим разломам в горной части острова и под дном Филиппинского моря, будучи обусловленными уже упомянутой коллизией Евразийской и Филиппинской плит (более подробно см. ниже). Результатом этого процесса явилось возникновение сильнейшего землетрясения Тайваня в XX в. — Чи-Чи в 1999 г. ( $M_w = 7.6$ ). При этом подвижка в его очаге по разлому Челунгпу (взбросо-сдвиг) ориентирована субширотной, т.е. вкrest простирания структур.

Мартовское землетрясение 2002 г. возникло в пограничной области о-ва Тайвань и юго-западного фланга дуги Рюкю (Тайваньская субдукционно-коллизийная зона). Эта область характеризуется чрезвычайно сложной тектоникой. С одной стороны, восточное побережье Тайваня, принадлежащее Евразийской плите, контактирует с Филиппинской плитой к северу от окончания Берегового хребта ( $23.7^\circ$  с.ш.) и сохраняет коллизийный тип движения в субширотном направлении (восток—запад) по данным GPS [16]. Однако “чистая” коллизия характерна только для верхних частей этих плит (земная кора и прилегающая зона верхней мантии, глубины до 50 км). Более глубинная часть мантии Тайваня постепенно вовлекается в субдукцию Филиппинской плиты под Евразийскую в северо-западном направлении [24]. Сложное взаимодействие этих плит обуславливает высокую сейсмическую активность района. Согласно данным Геологической службы США (USGS) за период 1900–2002 гг. в районе Тайваня возникло более 80 землетрясений с  $M \geq 6.5$ , из которых 30 — в окрестностях эпицентра мартовского землетрясения (рис. 1). Большинство сильных и более слабых землетрясений возникает под острым углом склоном Тайваня и дном Филиппинского моря, внутренняя область острова менее сейсмична. Чаще всего землетрясения происходят на глубинах до 50 км и только вблизи границы с дугой Рюкю и в ее задуговой части глубины очагов достигают 80–200 км.

Эпицентр мартовского землетрясения 2002 г. ( $M_w = 7.4$ ) расположен под подводным хребтом Яеяма (Yaeyama, дуга Рюкю), механизм очага аналогичен механизму землетрясения Чи-Чи (взбросо-сдвиг субширотной ориентировки). На основе анализа данных о скоростях и плотностях в среде для юго-западного фланга дуги Рюкю, а также механизмов очагов землетрясений этого района, в работе [22] сделан вывод о том, что мартовское землетрясение 2002 г. могло быть вызвано либо изгибом погружающейся Филиппинской плиты, либо продольным сжатием дуги, превышающим уровень ее сжатия, обусловленного субдукцией сейсмоактивной зоны Рюкю в СЗ направлении.



**Рис. 1.** Сильные землетрясения района Тайваня с глубинами очагов 0–70 км за 1900–2002 гг. по данным службы USGS (сайт <http://earthquake.usgs.gov>).

Малые кружки (1) – эпицентры землетрясений с  $M_w = 6.5–7.5$ , большие (2) с  $M_w = 7.6–8.1$ . Цифрами обозначены эпицентры сильнейших землетрясений начала XX в., а также землетрясений Чи-Чи (1999 г.) и мартовского (2002 г.). Жирные линии с зубцами (3) – зоны субдукции Лусонская и Рюкю. Жирный прямоугольник – район ретроспективного изучения сейсмического режима перед мартовским землетрясением 31 марта 2002 г. ( $M_w = 7.4$ ).

**Исходные материалы.** В качестве исходного материала для ретроспективного исследования сейсмического режима перед землетрясением Чи-Чи использовались каталоги землетрясений с

$M_L = 2.5–5.5$  Центрального метеорологического бюро (CWB) Тайваня за 1990–1999 гг. Принципы выбора пространственно-временных параметров этих исследований исследуемого района описаны

ниже, в разделе Метод. Объем выборки землетрясений упомянутого диапазона магнитуд составил 3300 событий. При этом наблюдалось преобладание микро- и слабых землетрясений с магнитудами 2.5–3.5, на долю которых пришлось 97% объема выборки. Ввиду малочисленности более сильных землетрясений ( $M_L = 4.0–5.5$ ), их афтершоки не учитывались.

Ретроспективные исследования сейсмического режима перед мартовским землетрясением 2002 г. проводились по совместному каталогу CWB с  $M_L = 3.0–6.8$  за 1994–2002 гг. и каталогу Института наук о Земле (IES) Академии наук Тайваня с  $M_w = 3.0–7.0$  за 1995–2002 гг. Для унификации исходной сейсмической информации по обоим каталогам была выполнена линейная корреляция магнитуд  $M_L$  и  $M_w$ , в результате которой было получено следующее соотношение:

$$M_L = 1.86(\pm 0.01) - 0.66(\pm 0.02)M_w \quad (2)$$

или  $M_w = 1.5M_L - 2.8.$

На основе этого соотношения магнитуда мартовского землетрясения 2002 г. составляет 7.4. Общий объем выборки землетрясений перед ним составил 572 события, что примерно в 6 раз меньше выборки перед землетрясением Чи-Чи.

Принимая во внимание, что в совместном каталоге CWB и ISE содержится 15 событий с  $M_w > 5.5$ , возникает проблема учета их афтершоков. Как известно, при выявлении афтершоков более часто используется магнитудная ступень  $\Delta M = M_0 - M_i = 1.0$ , т.е. афтершок должен иметь магнитуду, на единицу меньшую магнитуды главного толчка [13, 21]. Иногда используется ступень  $\Delta M = 2$  [7], однако в этом случае возрастает степень “засорения” выборки афтершоками. При выделении афтершоков применялся так называемый оконный способ с использованием разных сроков поисков и размером площадей вокруг эпицентра сильного толчка [17]. Размеры радиусов областей для выделения афтершоков землетрясений с  $M_w = 5.0–6.5$  колебались от 0.1 до 0.22° дуги большого круга вокруг эпицентров этих землетрясений, периоды — от 155 до 790 суток. Для землетрясений с  $M > 6.5$  площадки имели вид эллипсов с большими осями 0.6°–0.9° по простиранию структур и 0.25°–0.40° вкрест простирания структур, периоды поисков — от 815 до 915 суток.

Всего за период исследований было выявлено 60 афтершоков, и объем выборки сократился до 512 событий.

## МЕТОД

Ретроспективные исследования сейсмического режима проводились на основе анализа вариаций следующих параметров: а) суммарного годового числа землетрясений  $N_\Sigma$ ; б) суммарного го-

дового количества высвобожденной энергии  $\Sigma E$  в Джоулях; г) угловых коэффициентов графиков повторяемости землетрясений  $b$  [6]. Важную роль при этом играет рациональный выбор пространственно-временных параметров исследуемого района.

Если следовать рекомендациям документа [2], то максимальная длительность периода ретроспективных исследований перед землетрясением Чи-Чи 1999 г. и мартовским землетрясением 2002 г. должна быть 17 лет, т.е. начало исследований в первом случае придется на 1982 г., а во втором — на 1985 г. Однако по имеющимся данным Центрального бюро погоды (CWB) Тайваня землетрясения с магнитудами  $M_L \geq 2.5$  стали регистрироваться сетью этой службы без пропусков только с 1990 г. [19], а по информации с сайта Института наук о Земле АН Тайваня сеть широкополосных станций этого института (BATS IES) вступила в действие с середины 1995 г. Поэтому в экспериментальном порядке выбор длительности периода ретроспективных исследований был сделан на основе анализа многочисленных данных по предвестникам сильных землетрясений из работ [8, 9]. По сути такие предвестники являются форшоками сильных землетрясений. Было использовано соотношение вида:

$$\log T = 0.74M - 4.6, \quad (3)$$

где  $M$  — магнитуда землетрясения,  $T$  — период в годах. Согласно этому соотношению для землетрясения Чи-Чи с  $M_w = 7.6$  длительность периода исследований составляет 10 лет, т.е. с 1990 по 1999 гг., для мартовского землетрясения 2002 г. с  $M_w = 7.4$  период исследований равен 8 годам, с 1994 по 2002 гг.

Наряду с периодом исследований потребовалось также преобразование соотношения для размеров исследуемого района, поскольку его линейные размеры в 6° по формуле (1) из документа [2] (см. выше) примерно в 2 раза превышают протяженность о-ва Тайвань с присоединенными к нему участками дуг: Лусонской с юга и Рюкю с северо-востока. Принимая во внимание неопределенность ситуации, мы в данном случае решили привязать оценку линейных размеров района к длине очагового разрыва для землетрясений с  $M_{LH} > 6.5$ . Согласно работе [12] соотношение длины разрыва с магнитудой имеет вид:

$$\log L = 0.6M - 2.5, \quad (4)$$

где величина  $L$  дана в километрах. Для землетрясения Чи-Чи величина  $L$  равна 1° длины большого круга или 111 км. Откладывая  $L$  от эпицентра землетрясения по широте к северу и югу, а по долготе к западу и востоку, получаем площадь исследуемого района примерно в два квадратных градуса или 42 200 км<sup>2</sup>. Для мартовского землетрясения 2002 г. вследствие меньшей магнитуды

( $M_w = 7.4$ ) площадь исследуемого района составляет  $1.6^\circ \times 1.6^\circ$  или  $\sim 31500 \text{ км}^2$ . Приведенные выше объемы выборки землетрясений перед главными событиями получены по землетрясениям, сосредоточенным в пределах исследуемых районов.

При изучении сейсмичности перед землетрясением Чи-Чи было обнаружено тяготение микро- и слабых землетрясений ( $M_L = 1.5-2.5$ ) к эпицентру при рассредоточении более сильных толчков по площади выделенного района на удалении от него. Это явление напоминает ситуацию с сейсмической брешью 2-го рода по [20], когда перед сильным землетрясением вблизи его будущего эпицентра наблюдается концентрация слабых землетрясений и миграция более сильных на периферию изучаемого района (рис. 2). В Японском регионе признаки сейсмической брешии 2-го рода определялись по отмеченной особенности пространственного распределения слабых и более сильных землетрясений соответственно в окружностях малого и большого радиуса. С учетом этого наряду с большим прямоугольным районом  $2^\circ \times 2^\circ$  вокруг эпицентра Чи-Чи был выделен малый прямоугольник размером  $1^\circ \times 1^\circ$ . В дальнейшем особенности вариаций  $N_\Sigma$  и  $\Sigma E$  рассматривались в этих районах отдельно.

Перед мартовским землетрясением 2002 г. малый район не выделялся ввиду отсутствия признаков существования сейсмической брешии 2-го рода в этом случае (рис. 3). При сопоставлении этих рисунков, скопированных с сайта Института наук о Земле (IES) Тайваньской Национальной академии, не видно резких отличий в распределении землетрясений в начале и конце исследуемого периода. Поле землетрясений в исследуемом районе четко структурировано. В западной части выделяется полоса землетрясений северо-восточной ориентировки вдоль побережья Тайваня, в восточной части – вдоль структур дуги Рюкю перпендикулярно тайваньской группе толчков к юго-востоку от эпицентра будущего мартовского землетрясения. Обе группы разделены асейсмичным пространством, сохраняющимся в течение всего изучаемого периода. Различие в распределении землетрясений в начале исследований и непосредственно перед ожидаемым главным землетрясением (рис. 3б) состоит в увеличении их числа, в особенности в ЮВ углу района. При этом, как отмечено выше, в начале периода исследований (1994–1996 гг.) вблизи эпицентра основного землетрясения возникли сильнейшие землетрясения с магнитудами, близкими к его магнитуде ( $M_w = 6.8 - 7.0$ ). Это свидетельствует о существенном различии не только тектонической, но и сейсмологической ситуации перед двумя сильнейшими землетрясениями Тайваня.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

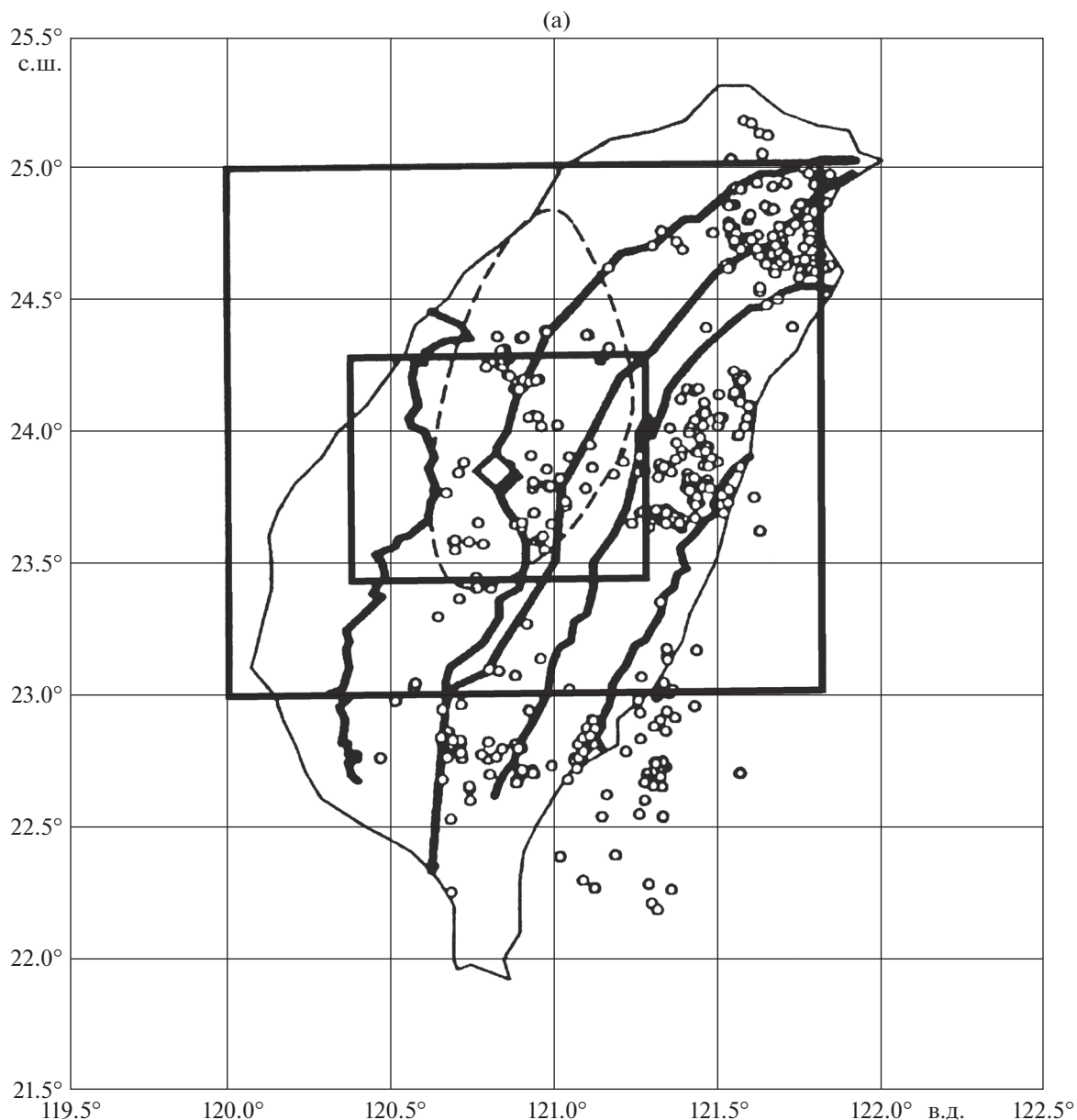
Результаты изучения вариаций параметров сейсмического режима  $N_\Sigma$  и  $\Sigma E$  в пределах выбранных пространственно-временных рамок, обоснование которых приведено выше, для землетрясений Чи-Чи 1999 г. и мартовского 2002 г. излагаются отдельно.

Землетрясение Чи-Чи. На рис. 4 показано изменение  $N_\Sigma(T)$  в пределах большого (а) и малого (б) районов вокруг эпицентра Чи-Чи. Первый график характеризуется плавным уменьшением  $N_\Sigma$  (снижение скорости потока сейсмических событий) в 1990–1994 гг. Однако в 1995–1996 гг. произошло резкое изменение хода графика. Сначала в 1995 г. число землетрясений возросло на 16% по отношению к их числу в 1994 г., а в 1996 г. – произошел резкий спад  $N_\Sigma$  на 42% по сравнению с 1995 г. В результате в 1996 г. образовался минимум  $N_\Sigma$ , в котором общее число землетрясений уменьшилось по сравнению с 1990 г. в 1.9 раза. Это снижение  $N_\Sigma$  в течение 1990–1996 гг. соответствует сейсмическому затишью, осложненному знакопеременным выбросом 1995–1996 гг. После затишья наблюдается плавный и достаточно быстрый рост величины  $N_\Sigma$  в 1997–1999 гг., что соответствует активизации сейсмичности перед землетрясением Чи-Чи. В результате ее увеличение в 1999 г. составило 40% (1.4 раза). Однако этот максимум во столько же раз ниже первоначального значения в 1990 г.

Таким образом, на основе анализа вариаций суммарного числа землетрясений в 1990–1999 гг. выявилось два подпериода – затишье в 1990–1996 гг. и активизация в 1997–1999 гг. Землетрясение Чи-Чи возникло на фоне увеличения  $N_\Sigma$  на стадии активизации.

График  $N_\Sigma(T)$  для малого района (рис. 4б) в целом подобен таковому для большого района и не содержит нарушения 1995–1996 гг. Несмотря на кажущееся более медленное убывание числа землетрясений от 1990–1991 до 1996 гг. их количество в течение подпериода затишья уменьшилось примерно в 4.5 раза, а на стадии активизации увеличилось в 3.8 раза. В то же время различие первоначального и последнего максимумов чисел землетрясений в этом случае менее существенное, чем для большого района ( $\sim 1.2$  раза). При сопоставимости чисел  $N_\Sigma$  в 1990 и 1999 гг. более высокие скорости снижения на стадии затишья и возрастания при активизации свидетельствуют о повышенной динамичности изменения сейсмической активности в пределах малого района.

На рис. 5 показан ход графика высвобождения количества сейсмической энергии при землетрясениях большого и малого районов. График  $\Sigma E(T)$  для большого района (рис. 5а) характеризуется неравномерным ходом с быстрым спадом между



**Рис. 2.** Сейсмичность Центрального Тайваня перед землетрясением Чи-Чи 1999 г. ( $M_w = 7.6$ ): (а) – в начале периода исследований (1990 г.); (б) – непосредственно перед землетрясением Чи-Чи (1999 г.). Жирные прямоугольники – большой и малый районы ретроспективного изучения сейсмического режима.

1991 и 1992 гг. (почти 2 порядка), локальным максимумом в 1993 г. и более медленным последующим снижением уровня до минимума в 1996 г. (затишье). Активизация также проходит в два этапа – более медленно с 1996 по 1998 гг. и с резким подъемом в 1999 г. Максимум 1999 г. сопоставим с максимумом 1990–1991 гг. При этом отсутствует скачок в 1995–1996 гг., отмечаемый на графике  $N_{\Sigma}(T)$ , что свидетельствует о его обусловленности случайным выбросом числа слабых землетрясений типа роя.

График  $\Sigma E(T)$  для малого района (рис. 5б) аналогичен таковому для большого района с един-

ственным отличием – “раскачкой” в 1995–1997 гг. Кроме того, уровень графика для 1999 г. более, чем в 2.5 раза превышает максимум 1991 г. Это свидетельствует о возникновении относительно более сильных землетрясений непосредственно перед главным толчком.

Графики повторяемости землетрясений по годам были построены методом суммирования только для большого района, для малого района данных было недостаточно. Значения коэффициента  $b$  варьировали от  $-0.75...-0.84$  для 1999 и 1991 гг. до  $-1.12...-1.4$  в 1998 и 1992 гг., составляя

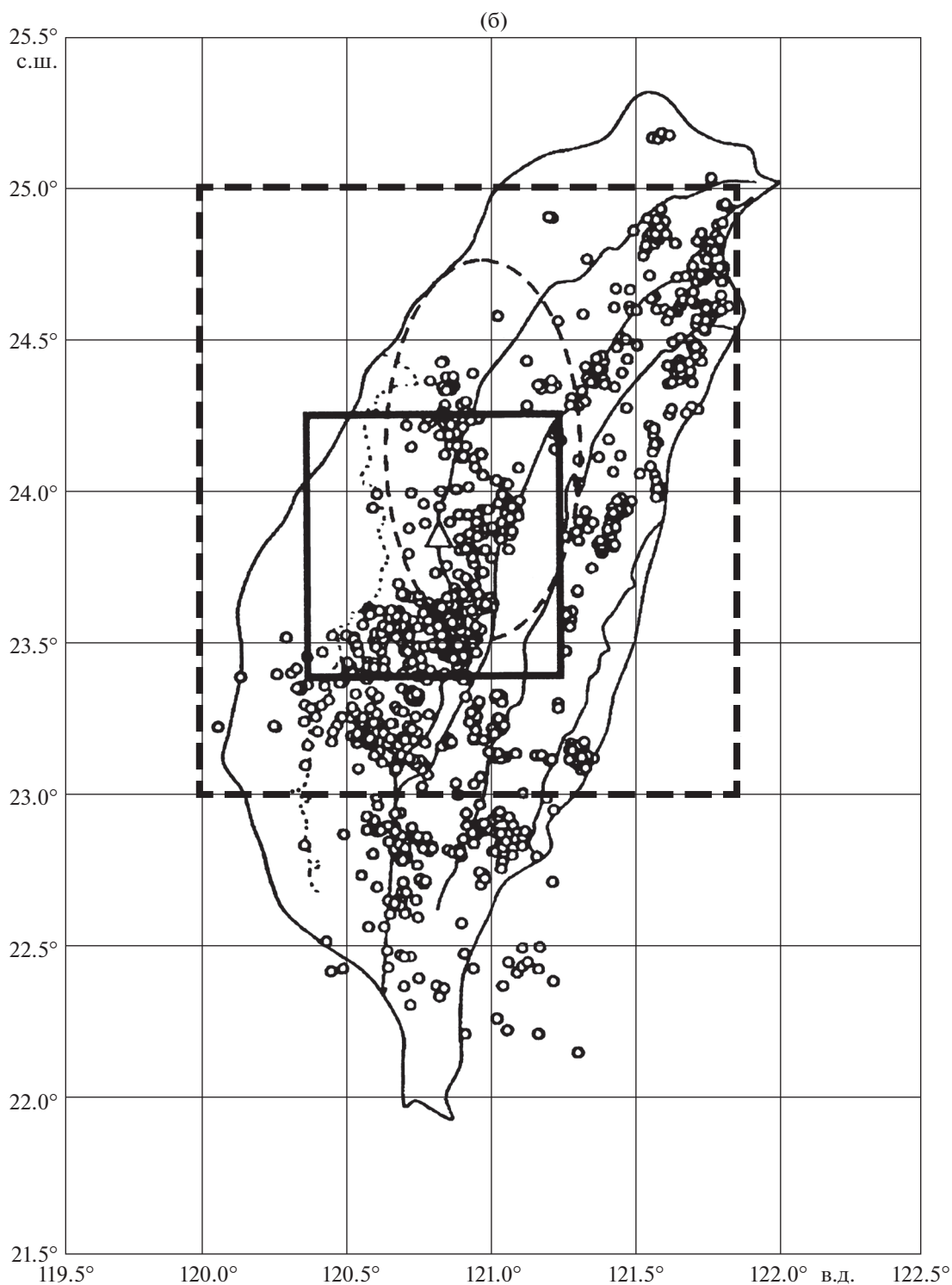


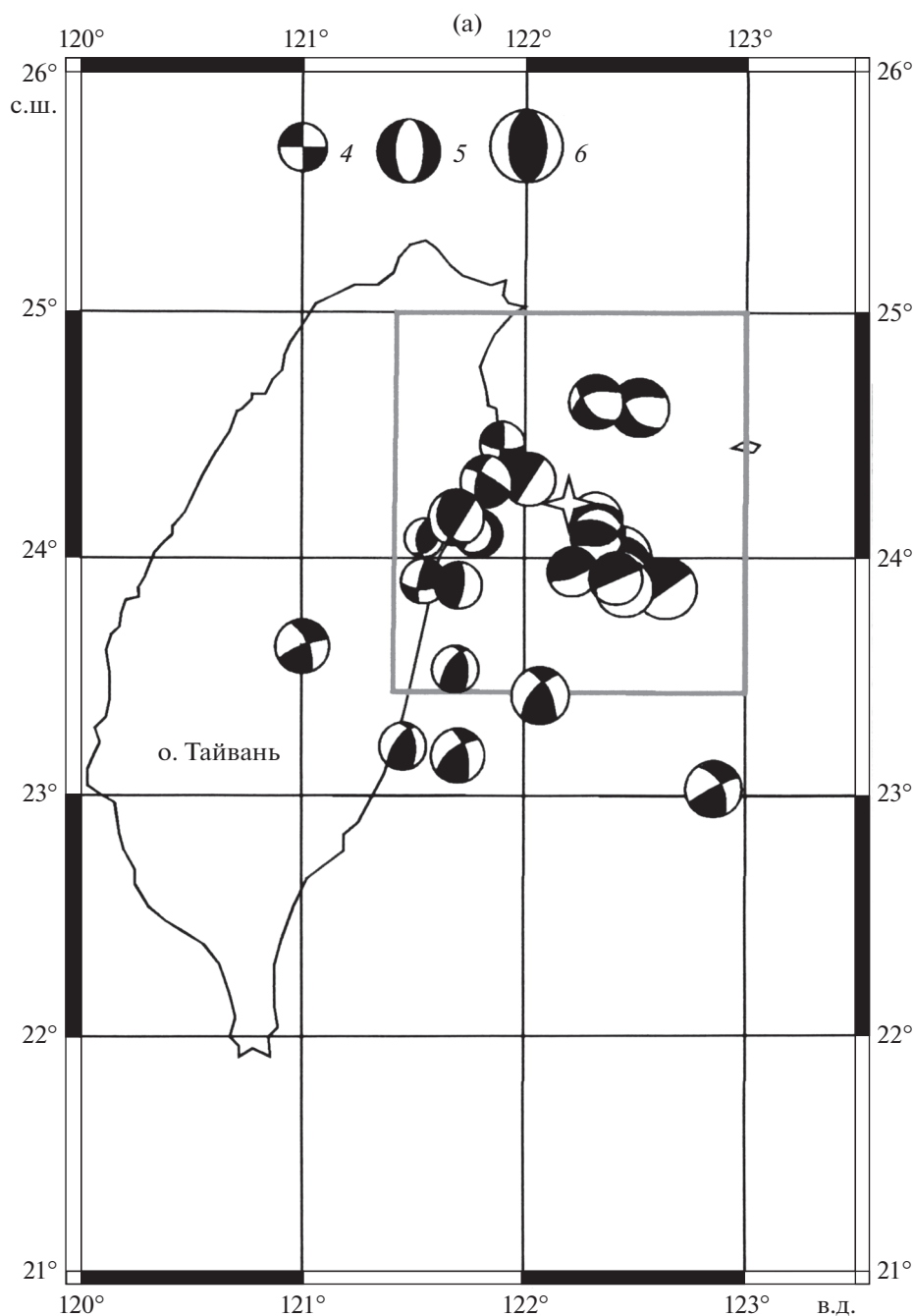
Рис. 2. Окончание.

в среднем за 1990–1999 гг. –1.16 за счет преобладания землетрясений с  $M_L = 2.5–3.5$ .

В целом при сопоставлении графиков  $N_{\Sigma}(T)$  и  $\Sigma E(T)$  для большого и малого районов выявляется достаточно неожиданная особенность – их согла-

сованность как внутри каждого района, так и между районами. Как будет показано ниже, такая особенность не отмечена в ходе графиков перед землетрясением в конце марта 2002 г.

**Мартовское землетрясение 2002 г.** В связи с тем, что перед землетрясением 31 марта 2002 г.



**Рис. 3.** Сейсмичность Северо-Восточного Тайваня и ЮЗ части дуги Рюкю перед мартовским землетрясением 2002 г. ( $M_w = 7.4$ ): (а) – в начале периода исследований (1995–1996 гг.); (б) – непосредственно перед землетрясением в конце марта 2002 г. Закрашенные кружки обозначают схемы очагов землетрясений с  $M_w = 4.0–6.0$  по данным сейсмологической службы Института наук о Земле АН Тайваня (сайт <http://bats.earth.sinica>). В левом верхнем углу приведены изображения основных типов механизма очага, слева направо: сдвиг, сброс, взброс (надвиг). Звездочкой обозначен эпицентр мартовского землетрясения 2002 г.

( $M_w = 7.4$ ) был выделен только большой район для изучения вариаций параметров сейсмического режима (см. выше), на рис. 6 приведены графики вариаций  $N_{\Sigma}$  и  $\Sigma E$  без дублирования их на малой площадке. Верхний график (рис. 6а) иллюстрирует убывание числа землетрясений, соответствующее

затишью, в 1994–1996 гг. Оно происходит неравномерно: в 1995 г. в 1.5 раза по отношению к 1994 г. и в 1996 г. в 1.1 раза по отношению к 1995 г. Возрастание числа землетрясений, соответствующее активизации, также имеет неравномерный характер. В 1998 г. оно составляет всего 1.2 раза по от-



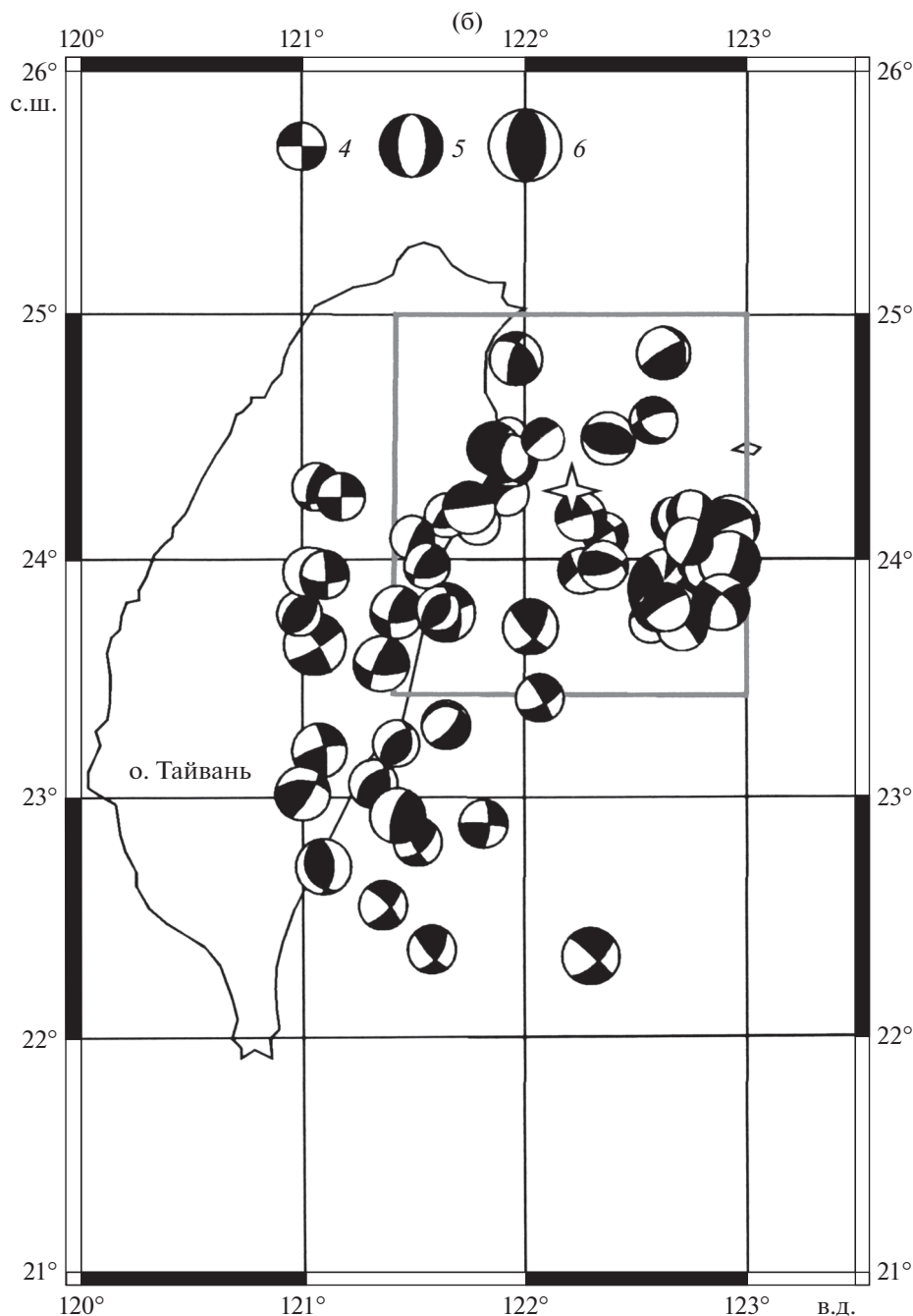


Рис. 3. Окончание.

ношению к 1997 г., а в 2000 г. — 1.7 раза по отношению к 1998 г. Однако после спада на заключительной стадии в 2001–2002 гг. уровень сейсмической активности на момент возникновения землетрясения сопоставим с первоначальным (1994 г.). В случае землетрясения Чи-Чи локального спада графика  $N_{\Sigma}$  не наблюдалось, однако при этом максимум 1999 г. составил 70% от максимума 1990 г.

На нижнем графике (рис. 6б) показано изменение количества высвобожденной энергии во

времени перед мартовским землетрясением 2002 г. Уменьшение величины  $\Sigma E$  (затишье) наблюдается в 1994–1997 гг., т.е. со смещением на год позже, чем отмеченное уменьшение  $N_{\Sigma}$ . Смещение минимума по энергии может быть обусловлено возрастанием в 1997 г. числа слабых землетрясений по сравнению с 1996 г. Изменение количества высвобожденной энергии имеет неравномерный характер. В начале, между 1994 и 1995 гг. происходит медленное снижение  $\Sigma E$ , всего в

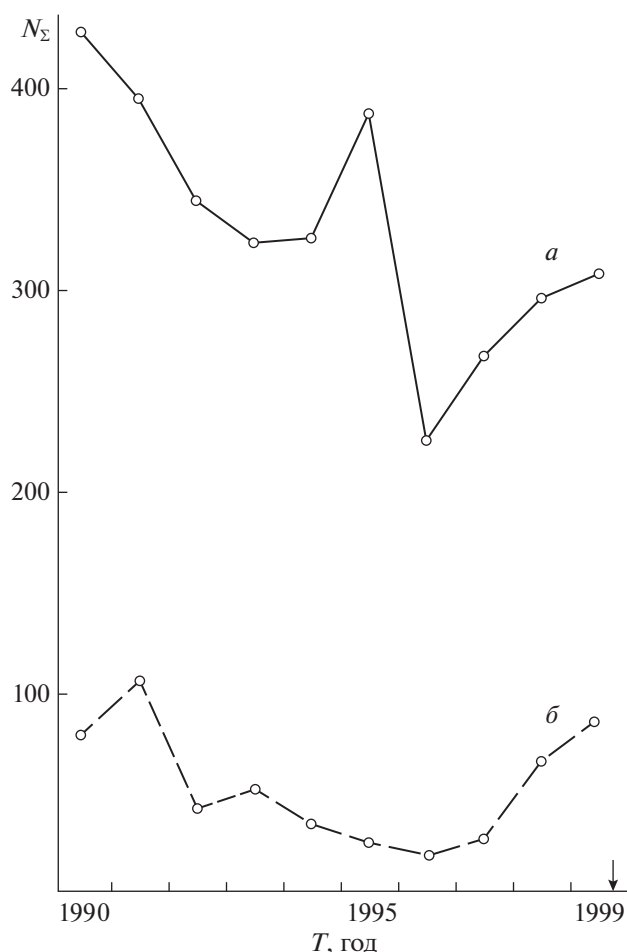


Рис. 4. Вариации суммарных годовых чисел землетрясений  $N_{\Sigma}$  с магнитудами  $M_L = 2.5-5.5$  перед землетрясением Чи-Чи:  $a$  – для большого и  $b$  – для малого районов вокруг эпицентра Чи-Чи.

1.2 раза. Аналогичное снижение происходит и между 1996–1997 гг. Однако в промежутке между 1995 и 1996 гг. наблюдается резкий спад графика на 2 порядка, что обусловлено прекращением серии сильнейших землетрясений с  $M_w = 6.8-7.0$  в 1995 г. На стадии активизации в 1998–2002 гг. происходит плавное возрастание количества высвобожденной энергии от  $24 \times 10^{12}$  Дж в 1997 до  $249 \times 10^{12}$  Дж в 2002 гг., обусловленное землетрясениями с  $M_w < 6.5$ . Этот максимум является абсолютным вторичным максимумом, подобно наблюдаемому для землетрясения Чи-Чи. Однако в отличие от графика на рис. 4б, на котором значения  $\Sigma E$  в начале и конце периода исследований совпадают, для мартовского землетрясения 2002 г. уровень  $\Sigma E$ , на фоне которого оно возникло, составляет всего 6% от первоначального. При этом суммарная высвобожденная энергия составляет около 97% от энергии главного толчка вместо 5% для землетрясения Чи-Чи.

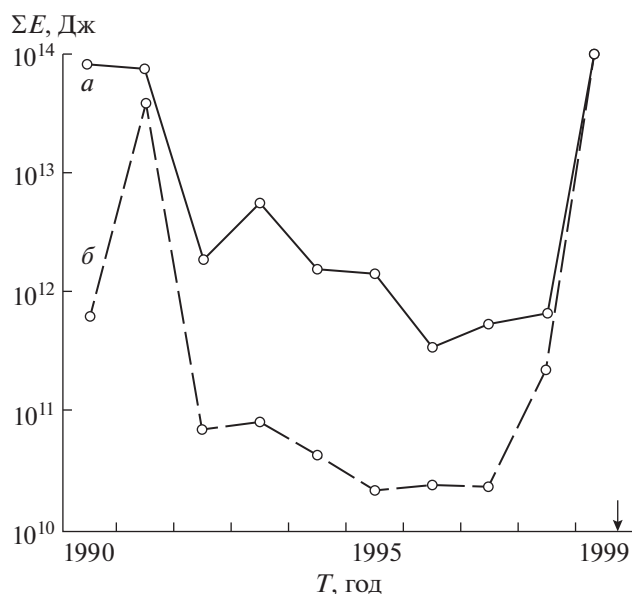


Рис. 5. Вариации годового количества высвобожденной сейсмической энергии  $\Delta E$ , Дж для землетрясений рис. 4 в большом ( $a$ ) и малом ( $b$ ) районах.

Графики повторяемости землетрясений по годам невозможно было построить ввиду малого объема выборки. Поэтому они построены методом суммирования для подпериодов затишья – 1994–1997 гг. и активизации – 1998–2002 гг. Присутствие сильнейших землетрясений с  $M_w$  до 7 в течение подпериода затишья обусловило пониженное значение углового коэффициента:  $b = -0.55 \pm 0.01$ . За счет снижения магнитуды наиболее крупных землетрясений в подпериод активизации до 6.5 величина  $b$  повысилась до  $-0.74 \pm 0.04$ . В обоих случаях представительными оказались землетрясения с  $M_w \geq 3.8$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В заключительной части статьи необходимо обсудить некоторые детали, которые были опущены в ходе рассмотрения данных в предыдущих разделах. Прежде всего, это касается ситуации с выбором пространственно-временных рамок ретроспективного анализа параметров сейсмического режима перед каждым сильным землетрясением. При отсутствии четкой регламентации длительности периода исследований возможны ошибки как в сторону ее увеличения, так и занижения. В первом случае негативным последствием могут быть неоправданные затраты времени на обработку избыточных данных, появлению случайных флуктуаций, не имеющих отношения к характеру изучаемого процесса и, в конечном счете, отсутствие полезной информации. Примером ошибки такого рода является публикация,

посвященная ретроспективному анализу сейсмического режима перед Кроноцким землетрясением 1997 г. ( $M_w = 7.9$ ) [6]. В этой работе длительность периода исследований была принята равной 36 годам (1962–1997 гг.), однако только через 24 года, в 1986 г., выявились признаки сейсмического затишья по данным  $N_{\Sigma}$  и  $\Sigma E$ , а данные за 1962–1985 гг. оказались не информативными. Оценки длительности как по рекомендации документа [2], так и по соотношению (2), приведенному выше, совпали, но оказались завышенными на 5 лет (1980 г.). Существует надежда, что при накоплении данных эта погрешность может быть устранена.

В случае ошибки с занижением длительности периода исследований возникает риск пропуска границы затишья и активизации и искажения результатов исследований. Ошибка такого рода была допущена в работе [25], в которой наряду с необоснованным укорочением периода исследований перед землетрясением Чи-Чи (1999 г.,  $M_w = 7.6$ ) на 4 года (1994–1999 гг. вместо 1990–1999 гг., см. выше), и, наоборот, были завышены также размеры исследуемого района. Вместо локального района  $2^\circ \times 2^\circ$  вокруг эпицентра Чи-Чи (см. выше) был выбран район в  $4^\circ$  по широте на  $3^\circ$  по долготе, площадь которого в 3.5 раза больше. В состав этого района кроме собственно Тайваня вошли дуга Рюкю на северо-востоке и Лусонская на юге. Как видно из рис. 2, основная часть землетрясений сосредоточена у восточного побережья Тайваня и в зонах островных дуг Рюкю и Лусонской. Объем выборки землетрясений с  $M_L > 2$  составил 66000 событий.

Исследования в работе [25] проводились с использованием формализованного метода Z-картирования [23] на основе анализа изменений скорости потока сейсмических событий в течение определенного отрезка времени на площадках  $20 \times 20$  км<sup>2</sup>. Затишью соответствовало положительное значение величины Z, активизации — отрицательное.

Принимая во внимание, что объем выборки землетрясений с  $M_L > 2$  в локальном районе вокруг эпицентра Чи-Чи (7200 событий) составляет всего 10% от объема для всего района Тайваня в целом (66000 событий), вариации параметров сейсмического режима в пределах локального района не могут оказать заметного влияния на их изменение во всем районе. В результате в работе [25] начало затишья перед землетрясением Чи-Чи было установлено только за 9 месяцев до его возникновения (сентябрь 1999 г.), а признаки активизации вообще не были обнаружены [19]. Отсюда следует, что рациональный выбор пространственно-временных рамок имеет большое значение при ретроспективном исследовании сейсмического режима, что подтверждается результата-

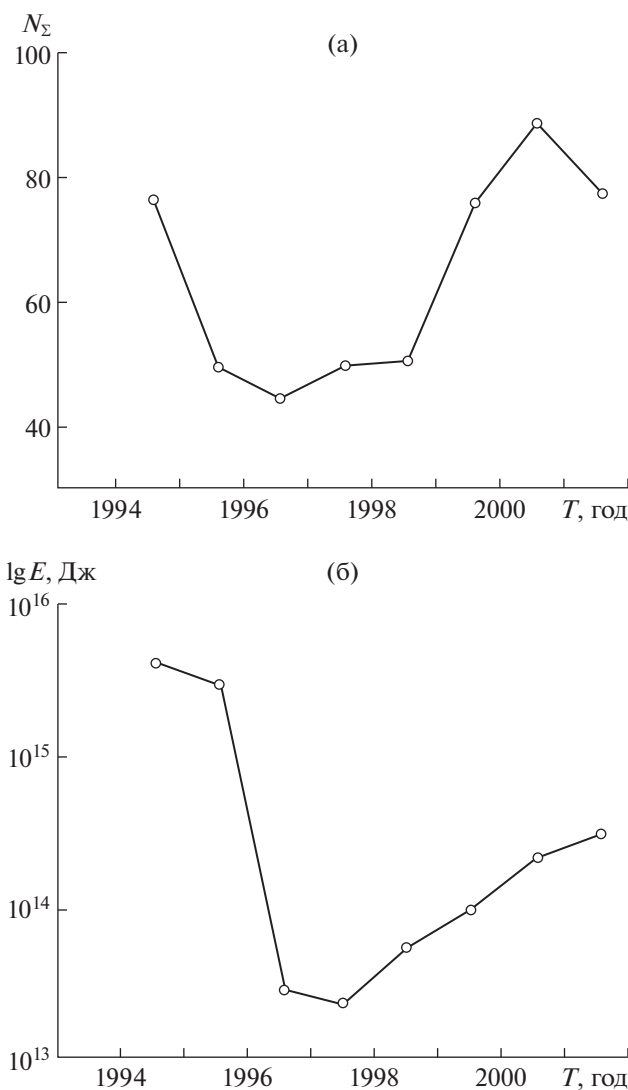


Рис. 6. Вариации суммарных годовых чисел землетрясений  $N_{\Sigma}$  с магнитудами  $M_w = 3.0$ – $7.0$  перед мартовским землетрясением 2002 г. (а) и годового количества высвобожденной сейсмической энергии для тех же землетрясений (б).

ми упомянутой статьи. С этой точки зрения конкретный выбор таких рамок перед двумя сильными землетрясениями Тайваня на основе соотношения (3) для определения длительности периода исследований и (4) для размеров изучаемого района представляется приемлемым. Однако эти соотношения не применимы для землетрясений с магнитудами менее 7.5. Так, при  $M_w = 6.5$  величина  $T = 1.6$  года, а  $L = 25$  км, при  $M_w = 7.0$  оценка периода исследований составляет 3.8 года при размерах района 50 км. Очевидно, что эти оценки не имеют практического значения.

Еще один момент, на который необходимо обратить внимание, — это взаимоотношение между числом землетрясений  $N_{\Sigma}$  и количеством высво-

божденной сейсмической энергии  $\Sigma E$ . Первый параметр представляет одну сторону сейсмического режима — сейсмическую активность, в то время как второй — его энергетический уровень. При этом число землетрясений характеризует кинетические свойства сейсмического режима, а высвобожденная энергия — его динамическую природу. Наконец, параметр  $N_{\Sigma}$  меняется по линейному закону и только при случайных вариациях типа сейсмических роев или афтершоков относительно сильных землетрясений возможно возрастание числа толчков в десятки раз и более. Однако такие изменения исключаются посредством устранения афтершоков и роев при ретроспективном анализе сейсмического режима. В то же время уровень высвобожденной энергии меняется по логарифмическому закону и составляет 1.5 порядка (31.6 раза) при различии магнитуды двух землетрясений на одну единицу магнитуды. По этой причине даже в случае подобия формы графиков  $N_{\Sigma}$  и  $\Sigma E$  их интерпретация различается. Например, на стадии активизации перед землетрясением Чи-Чи (1996—1999 гг.) в большом районе число землетрясений возрастает плавно от 224 до 302 (на 35%), что составляет около 70% от первоначального значения в 1990 г. (428 событий). Однако ход графика  $\Sigma E$  в тот промежуток времени имеет двухступенчатый характер с возрастанием сначала в 1.9 раза (от  $3.5 \times 10^{12}$  до  $6.7 \times 10^{12}$  Дж) в 1996—1998 гг. и последующим резким скачком в 15 раз (до  $1.0 \times 10^{14}$  Дж) в 1999 г. с достижением исходного уровня для 1990 г. Это свидетельствует о возникновении преимущественно слабых землетрясений на первом этапе и более сильных — на втором.

В случае мартовского землетрясения 2002 г. также наблюдаются две особенности в соотношении величин  $N_{\Sigma}$  и  $\Sigma E$ . Первая — это сдвиг на год начала затишья по энергии с 1996 на 1997 гг., обусловленное возрастанием числа землетрясений с малой энергией в последнем из этих годов. Вторая особенность по соотношению числа землетрясений и количества высвобожденной энергии на стадии активизации в отличие от землетрясения Чи-Чи имеет обратный характер. Ход графика  $N_{\Sigma}$  в этом случае неравномерный: медленное возрастание между 1996—1998 гг., последующий скачок в 2000 г. и возврат к уровню 1994 г. в 2001—2002 гг. В то же время ход графика  $\Sigma E$  с 1997 по 2001—2002 гг. равномерный, с максимумом перед главным землетрясением (рис. 6), однако данный максимум ( $3.4 \times 10^{14}$  Дж) на порядок ниже, чем в 1994 г. ( $\sim 4.0 \times 10^{15}$  Дж). Это означает, что сильные землетрясения в подпериод активизации имели меньшие магнитуды, т.е. ситуация противоположная отмеченной выше для случая землетрясения Чи-Чи. Принимая во внимание, что параметр  $\Sigma E$  более однозначно, чем  $N_{\Sigma}$ , определяет ход сей-

смического процесса, более целесообразно привязывать к нему характеристики хода этого процесса.

Различие характеристик сейсмичности и хода сейсмического режима перед землетрясениями Чи-Чи и мартовским 2002 г. обусловлено сильным различием в тектонической позиции этих землетрясений. Первое землетрясение возникло на периферии сейсмоактивной области с достаточно простой тектоникой (ориентация всех структур по простиранию Тайваня, отсутствие поперечных осложнений) и однозначным характером сейсмотектонического процесса, а именно, коллизией Евразийской и Филиппинской плит. Этот фактор определяет стиль сейсмичности с преобладанием слабых землетрясений и достаточно однородным их распределением в пределах области (рис. 2). Землетрясение 2002 г. возникло во фронтальной части сейсмоактивной области Тайваня с разной ориентацией структур — от северо-восточной до субширотной и разнонаправленными процессами от коллизии до субдукции. В такой ситуации возникает большое количество сильных землетрясений региона (рис. 1), и их пространственное распределение четко структурировано, с изменением ориентации групп эпицентров от СВ у побережья Тайваня до ЮВ в прилегающей части дуги Рюкю (рис. 3). Несмотря на это принципиальное отличие наблюдается сходство как механизмов очага обоих землетрясений (взбросо-сдвиг с субширотной ориентацией подвижки), так и вариаций параметров сейсмического режима  $N_{\Sigma}$  и  $\Sigma E$ . Это сходство состоит в следующем: а) первая часть периода исследований характеризуется сейсмическим затишьем (7 лет для Чи-Чи и 4 года для мартовского землетрясения); б) во второй части начинается активизация, продолжающаяся вплоть до возникновения главного землетрясения (3 года для Чи-Чи и 4 для мартовского землетрясения). Сходство результатов при разных начальных условиях следует рассматривать, с одной стороны, как подтверждение достаточной эффективности предложенной методики исследований, с другой, из-за отсутствия статистики этот вывод пока можно рассматривать как совпадение итогов выполненных исследований.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен достаточно эффективный подход к ретроспективному исследованию сейсмического режима перед сильными землетрясениями Тайваня — Чи-Чи 1999 г.,  $M_w = 7.6$  и мартовским 2002 г.,  $M_w = 7.4$ . Он основан на изучении вариаций двух основных параметров сейсмического режима — суммарного годового числа землетрясений разных магнитуд, отражающего изменение сейсмической активности  $N_{\Sigma}$ , и суммарного годо-

вого количества высвобожденной сейсмической энергии  $\Sigma E$ , отражающего энергетическую сторону сейсмического процесса. Значение углового коэффициента графиков повторяемости землетрясений  $b$  оказалось завышенным перед землетрясением Чи-Чи вследствие преобладания слабых землетрясений и заниженным перед мартовским землетрясением 2002 г. из-за преобладания сильных землетрясений.

2. Показана существенная роль выбора пространственно-временных рамок при ретроспективном изучении сейсмического режима. Сформулированы принципы определения длительности периода исследований и размеров района, которые применимы для землетрясений с магнитудами от 7.5–8.0 и формально даже до 8.5. Однако увеличение сроков изучения и размеров исследуемого района при магнитудах землетрясений более 8 может повлечь нежелательные последствия с возникновением в пределах данного района нескольких землетрясений – форшоков с  $M_w = 7.5–8.0$  и дроблением единого сейсмического процесса на ряд локальных составляющих.

3. На примере двух сильных землетрясений Тайваня – Чи-Чи 1999 г. и мартовского 2002 г., четко выделены подпериоды сейсмического затихья (соответственно 7 лет в первом случае и 3 года во втором) и активизации сейсмического режима перед их возникновением (3 года в первом случае и 4 во втором). При этом наблюдается аналогия в ходе графиков  $N_{\Sigma}$  и  $\Sigma E$  во времени, а именно, максимумы параметров в начале и конце периода исследований и минимум между ними.

4. Сходство результатов ретроспективного изучения сейсмического режима перед помянутыми землетрясениями, возникшими в существенно различной сеймотектонической обстановке, можно рассматривать как обнадеживающий признак для успешного применения описанной методике в перспективе. Однако отсутствие статистики позволяет говорить пока что только о совпадении результатов двух независимых экспериментов, что требует продолжения исследований.

Авторы благодарят К.С. Chen, ассистентку профессора Национального университета Тайваня, за предоставление важной информации по тектонике и сейсмичности региона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К., Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Хаттон К. Комплекс долгосрочных сейсмических предвестников: Калифорния и некоторые другие регионы // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 19. С. 23–27.
2. Долгосрочный прогноз землетрясений. (Методические рекомендации) / Ред. Садовский М.А. М.: ИФЗ АН СССР, 1986. 128 с.
3. Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Ротвайн И.М. Долгосрочные предвестники сильных землетрясений в Калифорнии, Сьерра-Неваде, Новой Зеландии, Японии и Аляске // Методы и алгоритмы для интерпретации сейсмологических данных. М.: Наука, 1980. С. 3–11.
4. Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышения вероятности возникновения сильных землетрясений мира // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 19. С. 48–58.
5. Кособоков В.Г., Хохлов А.В. Экспериментальный среднесрочный прогноз землетрясений в реальном времени. Проверка алгоритма М 8 // ГНТП “Глобальные изменения природной среды и климата”. Проблема 2.1. М.: МИТП РАН, 1993. Вып. 1. С. 53–60.
6. Кузин И.П., Левина В.И., Фленов А.Б. О влиянии энергетического диапазона землетрясений на оценку параметров сейсмичности перед Кроноцким землетрясением 1997 г. с магнитудой 7.9 // Вулканология и сейсмология. 2011. № 3. С. 46–64.
7. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Целевой подход к проблеме идентификации афтершоков // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 62–69.
8. Мячкин В.И., Зубков С.И. Сводный график предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1973. № 6. С. 28–32.
9. Риктаке Е. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
10. Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. Пространственно-стабилизированная схема применения алгоритма М 8: Италия и Калифорния // Проблемы теоретической сейсмологии и сейсмичности. М.: ГЕОС, 2002. С. 162–185.
11. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
12. Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 99–108.
13. Bath M. Introduction to seismology. Basel: Birkhauser Verlag, 1973. 428 p.
14. Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm М 8 // US Geol. Survey. 1992. P. 1–23.
15. Ho C.S. An introduction to the geology of Taiwan: explanatory text of the geologic map of Taiwan. Centr. Geol. Surv. Taipei, Taiwan, 1988. 192 p.
16. Hsu Y.J., Liu C.T., Shyu S.Y. Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms // Tectonophysics. 2009. V. 479. № 1–2. P. 4–18.
17. Keilis-Borok V.I., Knopov L., Rotwain I.M. Bursts of aftershocks long-term precursors of strong earthquakes // Nature. 1980. № 283. P. 259–263.
18. Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. Localization intermediate-term earthquake prediction // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. № 12. P. 259–263.
19. Kuzin I.P., Levchenko D.G., Flyonov A.B. et al. Some characteristics of seismicity before strong earthquake

- Chi-Chi ( $M_w = 7.6$ ), 1999, Taiwan // Earth Science Research. 2013. V. 2. № 2. P. 143–152.
20. *Mogi K.* Two kinds of seismic gaps // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117(6). P. 1172–1186.
21. *Papazachos B., Papazachou C.* The earthquake of Greece. Thessaloniki: Ziti, 1997. 304 p.
22. *Wang T.K., Lin S.-F., Liy C.-S., Wang C.-S.* Crustal structure of the southernmost Ryukyu subduction zone: OBS, MCS, and gravity modeling // Geophys. J. Int. 2004. V. 157. P. 147–163.
23. *Wiemer S., Wyss M.* Seismic quiescence before the Landers ( $M = 7.5$ ) and Big BEAR ( $M = 6.5$ ) earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am. 1994. V. 84. P. 900–916.
24. *Wu F.T., Liang W.-T., Lee J.C., Benz H.* A model for the termination of the subduction zone against Taiwan: A junction of collision, subduction/separation, and subduction boundaries // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. 1–16.
25. *Wu Y.M., Chiao L.Y.* Seismic quiescence before the 1999 Chi-Chi, Taiwan,  $M_w = 7.6$  earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. 2006. V. 96. P. 321–327.
26. *Zavyalov A.D.* Testing the MEE prediction algorithm in various seismically active regions in the 1985–2000 periods: Results and analysis // Izvestia Phys. Solid Earth. 2002. V. 38(4). P. 262–275.

## Retrospective Study of the Seismic Regime Peculiarities before the Earthquakes in Taiwan in 1999 and 2002

I. P. Kuzin, A. B. Flyonov

This paper analyses the seismic regime before the strongest Taiwan earthquakes in the end of 20th (Chi-Chi, 21.09.1999,  $M_w = 7.6$ ) and in the beginning of 21st century (31.03.2002,  $M_w = 7.4$ ). Using data of 1990–1999 and 1994–2002 we retrospectively studied the variations of three parameter of the seismic regime: the total annual number of earthquakes  $N_\Sigma$  in the range of  $M_L = 2.5–5.5$  and  $M_w = 3.0–7.0$ , the total annual quantity of released seismic energy  $\Sigma E$ ,  $J$  and the angle coefficient  $b$ . We identified two distinct sub-periods in course of the seismic regime: a quiescence in 1990–1996 before the Chi-Chi earthquake and in 1994–1997 before the March 2002 earthquake, respectively. In 1997–1999 in the first case and in 1997–2002 in the second case we observed seismic activation. Due to prevalence of small earthquakes during preparation of the Chi-Chi earthquake coefficient  $b$  increased (to  $-1.16$  on average) and before the March 2002 earthquake due to occurrence earthquakes with  $M_w = 6.8–7.0$  coefficient  $b$  decreased, namely to  $-0.55$  in the quiet period and to  $-0.74$  in period of activation. Despite the significant difference in the seismotectonic conditions in the areas, where earthquakes are originated, and energy ranges of seismic events the results of our research turned to be similar. In both cases a major earthquake occurred at the maximum of released energy that can be considered as a coincidence. One should accumulate a confident statistic to confirm this positive trend in the data.