

ОЦЕНКА СЕЙСМОГЕННОЙ ШИРИНЫ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ

Г.Г. Кочарян, С.Б. Кишкина, А.А. Остапчук

Выполнена обработка высокоточных данных о пространственном расположении очагов землетрясений, приуроченных к крупной разломной зоне длиной около 40 км. Проведенный анализ показывает высокую степень пространственной локализации сейсмичности. Большая часть событий наблюдается в узкой зоне с характерной шириной порядка 100 м. Эта величина примерно соответствует верхней границе оценок эффективной ширины разломной зоны, выполненных на основе данных о параметрах шероховатости и волнистости нарушений сплошности массивов скальных пород.

Введение

Крупные разломные зоны представляют собой сложные механические системы, интегральные характеристики которых зависят от многих факторов и могут существенно отличаться от свойств слагающих их геоматериалов. Существенной особенностью является то обстоятельство, что большинство разломов представляют собой узкие зоны пониженной жесткости. При этом размер нарушения сплошности в направлении поперек простирания является весьма неопределенной величиной. Различия в данных, полученных по визуальным наблюдениям и по результатам геофизических исследований, часто весьма велики и могут достигать десятков раз. Не до конца определены и различия в терминологии («ширина зоны разлома», «зона влияния», «зона динамического влияния» и т.д.). Между тем, эффективная толщина (или ширина, или мощность) разломной зоны является важным параметром, входящим во многие сейсмологические модели.

При рассмотрении разломных зон часто выделяют одну или несколько главных зон сместителя (в англоязычной литературе *principal slip zones (PSZ)*), находящихся внутри магистральной части разломной зоны (*fault core (FC)*) в которой локализуется большая часть смещения. На периферии находится зона влияния (*damage zone (DZ)*) ассоциирующаяся обычно с зоной повышенной, по сравнению с вмещающим массивом, плотности трещин [Кочарян, Спивак, 2003; Chester et al., 2004].

Совершенно ясно, что бессмысленно обсуждать характерные значения структурных параметров разломов разного ранга без привязки к конкретному классу механических, гидрогеологических или сейсмологических задач. Так, если речь идет о распространении разрыва при землетрясении, то обычно полагают, что косейсмическое скольжение происходит в весьма узкой (до нескольких сантиметров) зоне сместителя [Shipton, Evans et al., 2006], хотя иногда смещение может происходить и внутри более широкой зоны влияния разлома. Радикальное изменение жесткости среды локализуется в магистральной части разломной зоны, а такие параметры как проницаемость, электропроводность, степень трещиноватости и так далее могут меняться на значительно больших базах [Shipton, Soden et al., 2006], определяя зону влияния разлома.

Тектонические землетрясения в подавляющем большинстве случаев приурочены к разломам. Расположение гипоцентров именно в разломных зонах и тектонических узлах проявляется тем очевиднее, чем лучше точность определения положения гипоцентров событий [Waldhauser, Richards P., 2004]. При этом сложная, разветвленная структура крупных разломных зон предполагает, что часть событий происходит на оперяющих разломах более мелкого масштаба. Тем самым, формируется «сейсмологический» критерий определения зоны «динамического», по определению С.И. Шермана с соавторами [Шерман и др., 1983], влияния разлома – зоны, в которой сосредоточена основная часть землетрясений, приуроченных к рассматриваемой разломной зоне.

В настоящей работе мы использовали совершенные сейсмические каталоги, полученные разветвленной сетью сейсмических станций Калифорнии для количественного исследования закономерностей локализации очагов внутри крупной разломной зоны.

Используемые данные

Сейсмический каталог, используемый в данной работе, составлен по базе данных Сейсмической Системы Северной Калифорнии. Сейсмическая Система Северной Калифорнии (Northern California Seismic System, NCSS) включает в себя 13 сейсмических сетей, что составляет 1200 цифровых каналов. Система фиксирует около 20 000 событий в год. В основной массе это события, происходящие в зоне ответственности одного из самых протяженных и активных геологических образований – системы разломов Сан Андреас (San Andreas Fault system, SAF), располагающейся между тихоокеанской и североамериканской плитами вдоль побережья, в основном, на территории штата Калифорния (США).

Анализируемый каталог включает события, которые произошли в районе Северной Калифорнии и были зарегистрированы в интервале времени между январем 1984 и маем 2003 гг. Особенность каталога состоит в том, что зарегистрирована масса событий, происходящих в одних и тех же местах (повторяющихся событий). Этот факт вкупе с большим числом регистрирующих станций и хорошей изученностью района позволил существенно улучшить точность определения эпицентра события: в каталог попали только события, сигналы от которых были зарегистрированы шестью или большим количеством станций и прошли процедуру уточнения местоположения источника [Waldhauser et al., 2008]. Уровень ошибки определения эпицентра события оценивается авторами как первые метры в горизонтальной плоскости и не хуже ста метров по глубине.

По каталогу была сформирована база данных, позволяющая оперативно работать с достаточно большим объемом материала (301 888 записей, содержащих дату, время, координаты и магнитуду события). Параллельно обработка велась с помощью специально созданного (на языке Фортран) программного обеспечения.

Методика обработки и ее результаты

На рис. 1 приведено распределение событий, содержащихся в каталоге, в координатной плоскости: хорошо видны протяженные структуры разной ширины, в которых сконцентрировано наибольшее число точек-очагов. Для детального анализа распределения очагов в области динамического влияния были выбраны несколь-

ко локальных областей, содержащих разломные зоны, которые идентифицируются как самостоятельные активные разломы.

Рассмотрим область, ограниченную координатами $(37,4N, -121,8E)$ и $(37,1N, -121,5E)$. В нее попадает 11634 события. Местоположение очагов землетрясений, координаты которых попадают в выбранную область, показано на рис. 2; распреде-

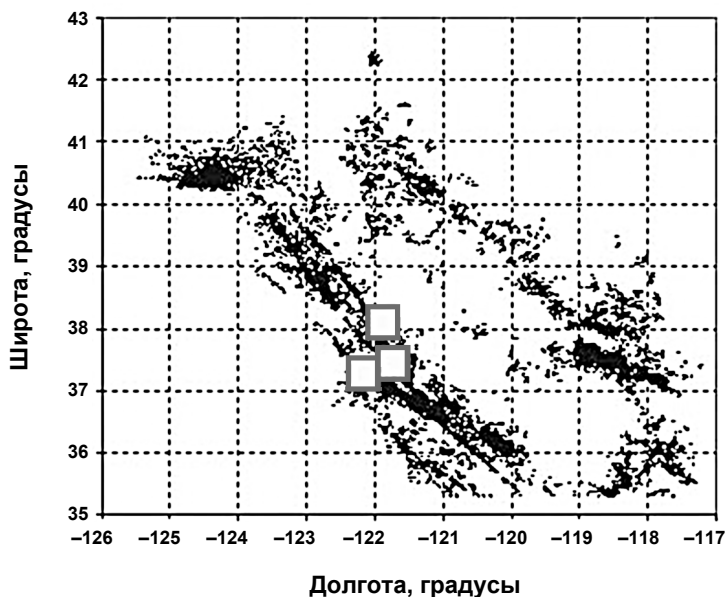
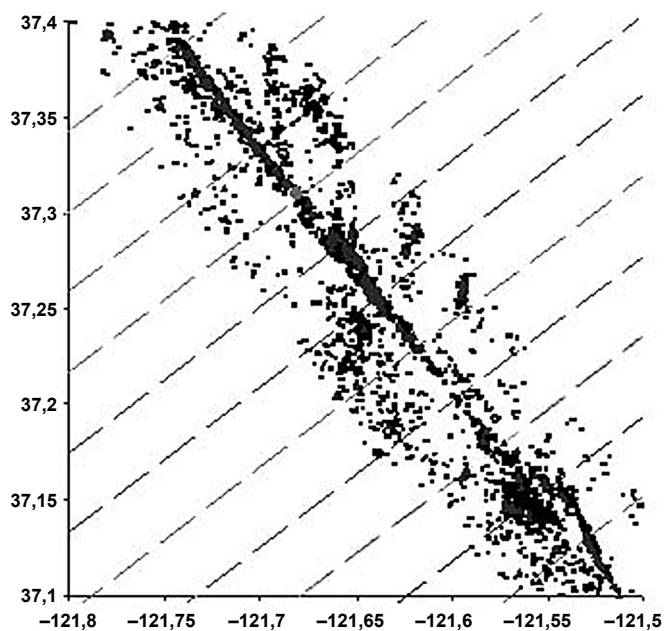


Рис. 1. Распределение событий, содержащихся в каталоге, в координатной плоскости

Рис. 2. Месторасположение очагов землетрясений, попавших в область, ограниченную координатами $(37,4N, -121,8E)$ и $(37,1N, -121,5E)$.

Пунктирные линии — границы интервалов обработки. Кругок — эпицентр события «Морган Хилл» (24.04.1984; $37,30986N, -121,68126W$; $M = 6,2$; $h = 8,04$ км). Треугольники — события с магнитудами 2,5 и больше



ление соответствующих им магнитуд событий приведено на рис. 3. Основную массу событий составляют землетрясения с магнитудами около 1 (0,8–1,2). Для всего каталога это значение несколько выше: основную массу событий составляют землетрясения с магнитудами 1–1,5.

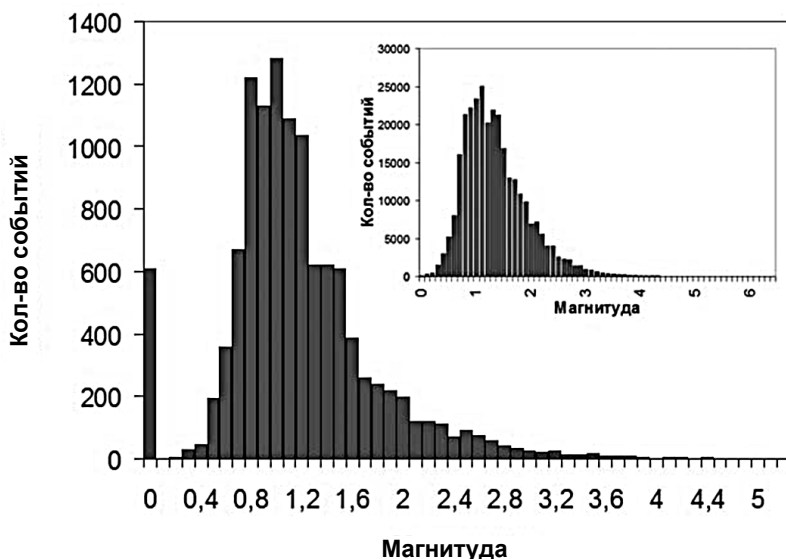


Рис. 3. Распределение магнитуд событий, попавших в область, ограниченную координатами (37,4N, –121,8E) и (37,1N, –121,5E).

В маленьком окне приведено распределение магнитуд событий для всего каталога

Заметим, что на новом масштабном уровне также визуально выделяются структурные формы, в пределах которых сконцентрировано наибольшее количество точек. Отметим, что основная масса «рассеянных» точек, не попадающих в области концентрации, – это эпицентры небольших событий с магнитудами меньше 2,5.

Явно выделяющаяся линия наибольшей концентрации очагов событий совпадает с местоположением (простираением) разлома Калаверас (Calaveras). Достаточно уверенную привязку к местности в данном случае можно провести по самому сильному событию, попавшему в анализируемую выборку. А именно – зафиксированному во многих сейсмических каталогах землетрясению «Морган Хилл» (Morgan Hill) с магнитудой 6,2 (24.04.1984; координаты: 37,30986N; –121,68126W, глубина – 8,04 км). Условную линию наибольшей концентрации очагов событий, проходящую через точку, соответствующую эпицентру землетрясения «Морган Хилл», для краткости будем далее называть «осью разлома».

Максимальная концентрация очагов наблюдается в непосредственной близости от основной оси разлома, в связи с чем, для дальнейшего анализа были выбраны события, удаленные от оси не более чем на 6 км.

Для удобства расчетов начало координат было перенесено в точку, соответствующую эпицентру события «Морган Хилл», а ось ОХ направлена вдоль оси разлома.

Выбранные данные были разбиты на интервалы шириной четыре километра по оси абсцисс; для каждого интервала строились гистограммы распределения расстояний эпицентров землетрясений (в координатной плоскости) до условной оси разлома.

Наиболее типичные примеры гистограмм приведены на рис. 4. Более 75% событий располагаются в зоне шириной от 120 до 300 метров. При этом в некоторых интервалах возникает две области, каждая из которых содержит 30–40% всех событий. Визуально таким интервалам соответствуют области «раздвоения» линии разлома.

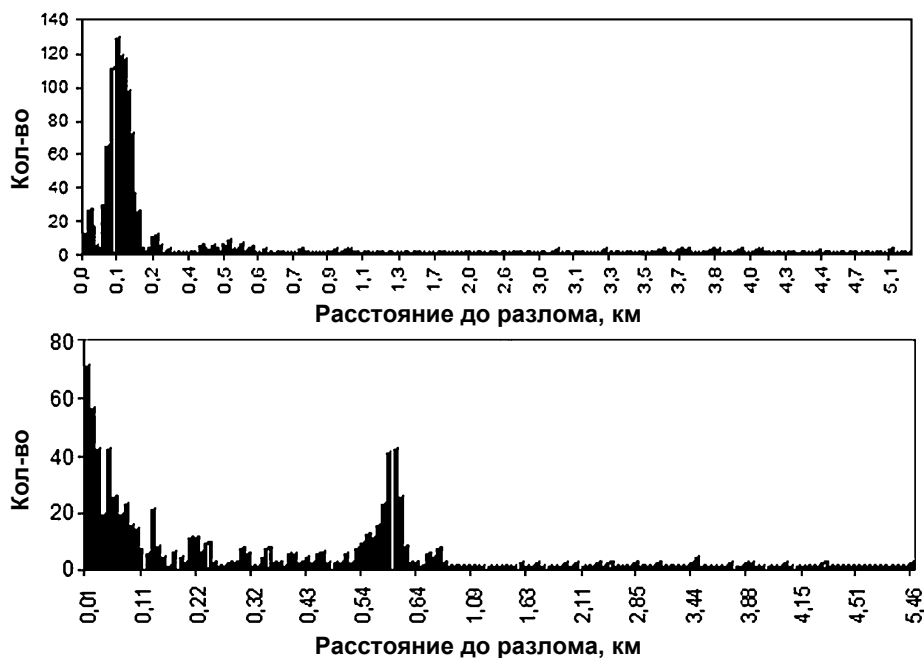
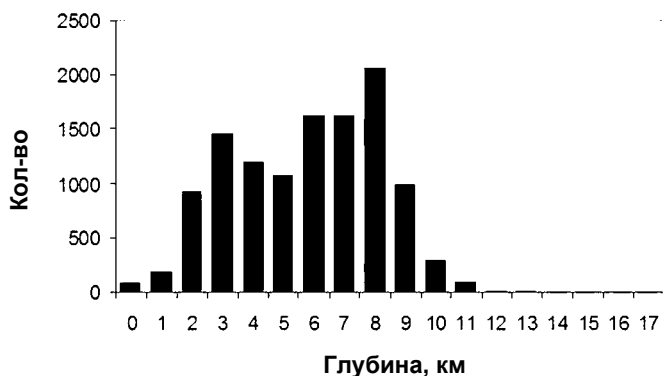


Рис. 4. Гистограммы распределения расстояний эпицентров землетрясений (в координатной плоскости) до условной оси разлома для двух интервалов обработки.

Рис. 5. Распределение глубин очагов событий, попавших в область, ограниченную координатами (37,4N, -121,8E) и (37,1N, -121,5E).



Имеющиеся в каталоге сведения дают возможность проанализировать не только расположение эпицентров, но и пространственное распределение событий. Известно, что в районе Калифорнии подавляющее большинство землетрясений происходит на небольших глубинах. В используемом нами каталоге самое глубокое события соответствует отметке 45,808 км. В более крупномасштабную анализируемую область попали события, произошедшие на глубинах до 17 км (рис. 5). Одна-

ко событий, глубина которых превышает 12 км, только 20 (из 11634). Для каждого выбранного ранее интервала (рис. 2) были построены пространственные распределения очагов в системе координат глубина – расстояние до разлома (рис. 6). При таком построении можно отчетливо видеть, что события локализируются в окрестности плоскости с почти постоянным углом падения.

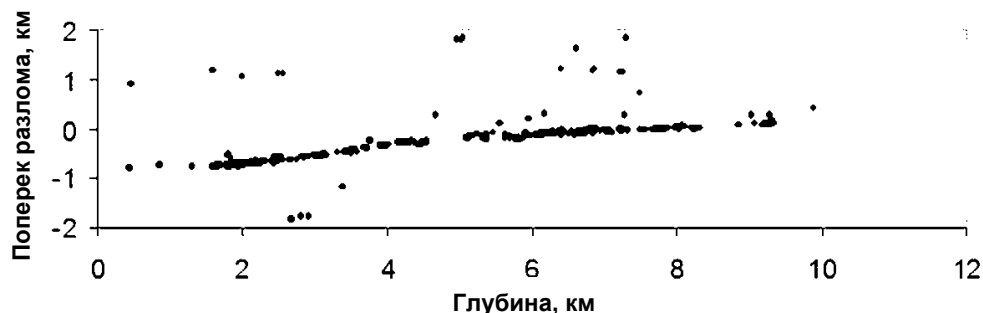


Рис. 6. Распределение очагов событий по глубине для одного из интервалов обработки

Учет распределения очагов по глубине, то есть расчет расстояний от гипоцентров событий до условной «плоскости разлома» (выше расчеты проводились от эпицентров до условной прямой – оси разлома) показывает, что средняя ширина области, в которой группируется основная масса очагов событий, окажется заметно меньше по сравнению с данными, приведенными выше (рис. 7). Кроме того, анализ показал, что значительная часть событий, эпицентры которых расположены в стороне от линии разлома, находятся на небольших глубинах менее 4–5 км. Локализация же событий, расположенных на основных сейсмогенных глубинах 5–8 км, существенно выше. Это связано, вероятно, с повышенной дифференциацией массива вблизи поверхности.

Осреднение данных по всем интервалам обработки дает значение ширины области, в которой расположены гипоцентры 75% событий с глубиной очага более 5 км $\bar{W} = 110 \pm 10$ м.

Результаты измерений на других участках Северной Калифорнии дали близкие результаты, которые будут изложены в последующих публикациях.

Обсуждение и выводы

Как отмечалось выше, при анализе характерных значений эффективной ширины разломной зоны разные авторы, в зависимости от направленности исследования, используют разные величины – от относительно небольшой магистральной части разломной зоны, до довольно обширной зоны динамического влияния. При этом для связи между линейными параметрами – длиной разлома L , шириной W и смещением по разлому D чаще всего используют степенные соотношения типа:

$$W = \alpha \cdot D^a, \quad (1)$$

$$D = \beta \cdot L^b, \quad (2)$$

$$W = \chi \cdot L^c. \quad (3)$$

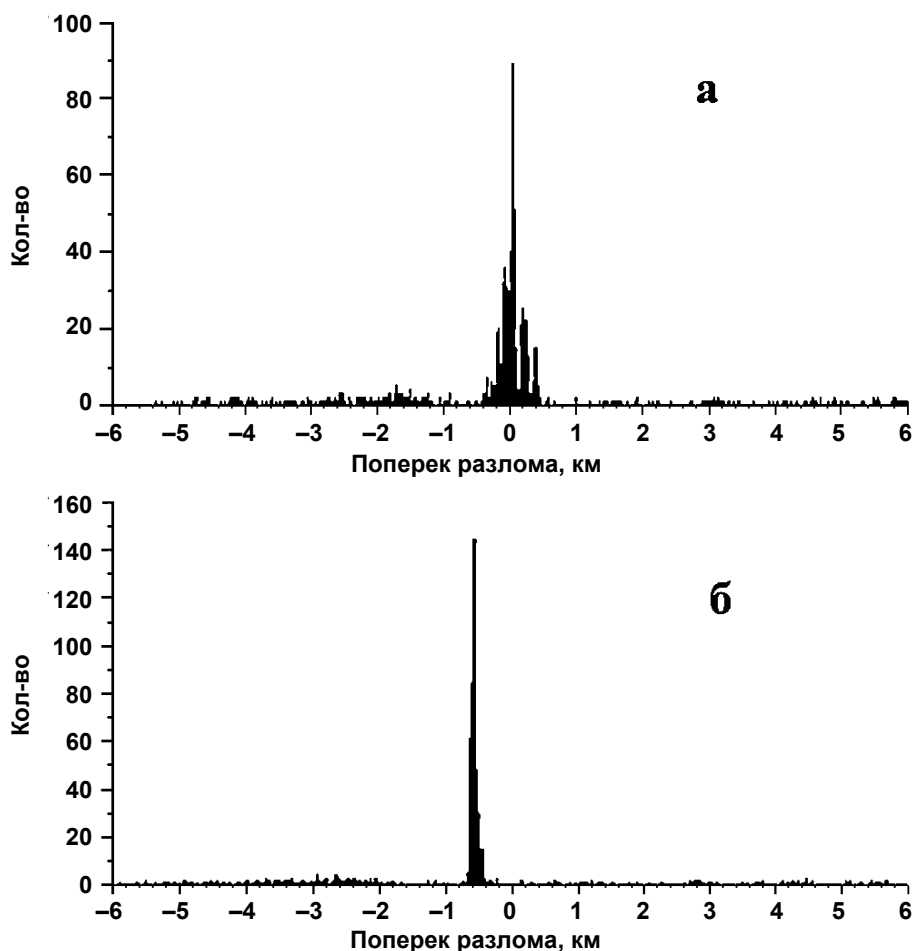


Рис. 7. Гистограммы распределения расстояний эпицентров землетрясений до условной оси разлома (а) и до условной плоскости разлома (б) для одного и того же интервала обработки

Показатели степени в соотношениях (1)–(3) чаще всего близки к 1, а коэффициенты α , β и χ изменяются в широких пределах.

Так, по данным [Шерман и др., 1983] χ изменяется в диапазоне от 0,02 до 0,1, соответственно, для трансрегиональных и локальных разломов, а β от 0,01 до 0,08 при вероятном значении $\beta = 0,03$.

По данным [Hull et al., 1988] $\alpha \cong 0,016$ для магистральных зон катакластического типа и $\alpha \cong 0,48$ для милонитов.

В работе [Кочарян, Спивак, 2003] на основе обработки данных о параметрах шероховатости нарушений сплошности массивов скальных пород, предложена зависимость, связывающая длину блока и характерную ширину межблоковой зоны в виде:

$$W = (0,01 \div 0,03) \cdot L^{0,8} (1 - \exp(-0,25 \cdot L^{0,2})), \quad (4)$$

где L и W измеряются в метрах.

Сведения о ширине более чем 30 разломных зон разного масштаба, полученные по большей части путем подсчета плотности трещин и деформационных полос, собраны в работе [Savage, Brodsky, 2010] вместе с оценками относительного перемещения берегов этих разломных зон.

Таблица

Данные о характеристиках разломных зон

Смещение, D (м)	Ширина зоны, W (м)	Длина разлома, L (км)
38	70	~1,5
80	23,6	~3
100	20	~3,5
140	300	~4,5
150	100	~5
170	66	~5,5
170	25	~5,7
300	88	~10
700	60	~23
800	80	~27
900	100	~30

Примечание: первые два столбца по [Savage, Brodsky, 2010], третий – оценка по (2).

Чтобы сопоставить все эти данные и результаты наших исследований «сейсмогенной ширины разломной зоны», удобно представить все соотношения и результаты измерений в виде (3), то есть в виде зависимости ширины разломной зоны от масштаба (длины разлома).

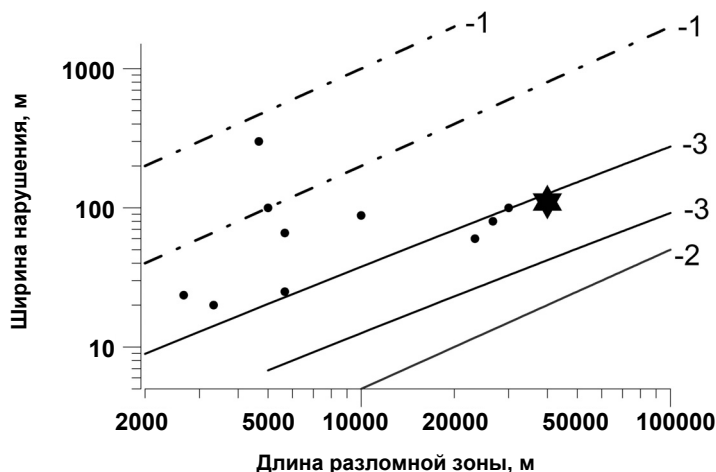


Рис. 8. Зависимость ширины разломной зоны от масштаба.

Линии 1 – соотношение (6); 2 – (5); 3 – (4); кружки – данные таблицы; звездочка – ширина сейсмогенной зоны разлома Calaveras

Тогда для ширины магистральной зоны катакластического типа имеем:

$$W \cong 5 \cdot 10^{-4} \cdot L, \quad (5)$$

для зон динамического влияния:

$$W \cong (0,02 \div 0,1) \cdot L, \quad (6)$$

а данные [Savage, Brodsky, 2010], совместно с рассчитанной по (2) длиной разлома L , приведены в Таблице. Мы использовали данные лишь по тем разломам, интегральное смещение по которым не превышает 1000 м. На рис. 8. приведены расчетные зависимости (по данным таблицы).

Таким образом, проведенный анализ закономерностей расположения очагов землетрясений, приуроченных к крупной разломной зоне, показывает высокую степень пространственной локализации сейсмичности. Большая часть событий наблюдается в узкой зоне с характерной шириной порядка 100 м. Эта величина примерно соответствует верхней границе оценок эффективной ширины разломной зоны, выполненных на основе данных о характерных параметрах шероховатости и волнистости нарушений сплошности скальных пород [Кочарян, Спивак, 2003].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 09-05-12023 офи-м и 10-05-01064-а).

Литература

Кочарян Г.Г., Спивак А.А. (2003) Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. (1983) Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск, Наука, СО АН СССР, 1983. 110 с.

Chester, F.M., J.S. Chester, D.L. Kirschner, S.E. Schulz, and J.P. Evans (2004), Structure of large displacement strike-slip fault zones in the brittle continental crust. In: Rheology and Deformation in the Lithosphere at Continental Margins, edited by Karner, G. D., B. Taylor, N. W. Driscoll, and D. L. Kohlstedt, Columbia University Press, New York.

Hull J. Thickness-displacement relationships for deformation zones// J. Struct. Geology. 1988. Vol. 10. P.4 31-435.

Savage H.M., Brodsky E.E. (2010) Collateral Damage: The Evolution of Fracture Distribution in Fault Damage Zones // J. Geophys. Res., в печати.

Shipton, Z.K and Evans, J.P. and Abercrombie, R.E. and Brodsky, E.E. (2006a) The missing sinks: slip localization in faults, damage zones, and the seismic energy budget. In Abercrombie, R. (Eds) Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting, pages pp. 217-222. Washington, DC.: AGU.

Shipton, Z.K. and Soden, A.M. and Kirkpatrick, J.D. and Bright, A.M. and Lunn, R.J. (2006b) How thick is a fault? Fault displacement-thickness scaling revisited. In Abercrombie, R. (Eds) Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting, pages pp. 193-198. AGU

Waldhauser F., Paul G., Richards P.G. (2004) Reference Events for Regional Seismic Phases at IMS Stations in China// BSSA, Vol. 94, No. 6, pp. 2265–2279.

Waldhauser, F. and D.P. Schaff (2008), Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods, J. Geophys. Res., 113, B08311, doi:10.1029/2007JB005479.