

УДК 550.34

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЕНЬЧУАНЬСКОГО КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2008 г. ($M_S = 8.0$) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМОДИСЛОКАЦИЙ

© 2017 г. Цзяо Лю¹, Е.А. Рогожин²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

12.05.2008 г. в уезде Веньчуань китайской провинции Сычуань произошло катастрофическое землетрясение магнитудой 8.0. Эпицентр находился в подвижном тектоническом поясе Лунмэньшань, глубина гипоцентра составляла 14 км. При главном толчке землетрясения на поверхности возникла система первичных сейсмодислокаций: сейсморазрыв Бэйчуань–Инсю протяженностью выше 240 км; сейсморазрыв Гуаньсянь–Аньсянь длиной около 70 км и сейсморазрыв Сяюйдон длиной 7 км. Образование сейсморазрывов и последовавшие за этим десятки тысяч оползней, обвалов и оспей вызвали крупные разрушения ряда населенных пунктов и дорог и привели к огромным человеческим жертвам. Амплитуды вертикальных взбросовых смещений достигали 10 м, горизонтальных – 4.8 м. Распределение макросейсмических эффектов землетрясения позволило оконтурить зоны 9-, 10- и 11-балльных разрушений, однако интенсивность сейсмических сотрясений на поверхности оказалась аномально низкой даже вблизи системы сейсморазрывов. Авторами статьи проведено детальное сеймотектоническое изучение очаговой зоны Веньчуаньского землетрясения. Полученные данные о распределении первичных и вторичных эффектов землетрясения позволили оконтурить зоны максимальных (10 и 11 баллов) нарушений поверхности. При оценке интенсивности сотрясений авторы руководствовались шкалой ЕЕЕ (Earthquake environmental effects), разработанной в рамках одного из проектов INQUA (2004–2016 гг.). Сопоставление системы изосейст, выделенных по макросейсмическим данным о повреждениях зданий и сооружений, с положением зон разных проявлений по шкале ЕЕЕ показало их полное соответствие.

Ключевые слова: Веньчуаньское землетрясение, сейсмодислокация, сейсморазрыв, разлом, разрушение, макросейсмический эффект, интенсивность, изосейсты, эффекты, окружающая среда.

Введение

12.05.2008 г. в 14 ч 28 мин по пекинскому времени в уезде Веньчуань провинции Сычуань на юго-западе Китая произошло катастрофическое Веньчуаньское землетрясение магнитудой 8.0. Эпицентр находился в точке с координатами 30.95° с.ш., 103.40° в.д. и был приурочен к подвижному тектоническому поясу Лунмэньшань, расположенному между восточной окраиной Цинхай-Тибетского нагорья и западной частью Сычуаньской впадины. Гипоцентр залегал на глубине 14 км. При главном толчке землетрясения на поверхности возникла система первичных сейсмодислокаций: сейсморазрыв Бэйчуань–Инсю протяженностью более 240 км; сейсморазрыв Гуаньсянь–Аньсянь длиной около 70 км и сейсморазрыв Сяюйдон длиной 7 км [Xu et al., 2008; Chen et al., 2013] (рис. 1). По официальной статистике на 25.09.2008 г. погибли или пропали без вести 87 150 человек и 374 643 человек были ранены. На карте общего сейсмического районирования Китая 2001 г. эпицентральная область Веньчуаньского землетрясения была отнесена к зоне с ожидаемой интенсивностью 7 баллов (по китайской макросейсмической шкале). Веньчуаньское землетрясение оказалось наиболее сильным и катастрофическим событием после знаменитого Тяньшаньского землетрясения 1976 г. магнитудой 7.8 в континентальном Китае.

В статье изложены результаты проведенного авторами детального сеймотектонического изучения очаговой зоны Веньчуаньского землетрясения. Исследование проводилось с целью уточнения границ зон разных проявлений поверхностных нарушений и их соответствия с положением зон, выделенных по шкале ЕЕЕ.

Сеймотектонические и макросейсмические проявления Веньчуаньского землетрясения

Масштабы стихийного бедствия и разрушения зданий и сооружений в результате сейсмического толчка 12.05.2008 г. были столь велики, что не оставили равнодушными практически все население планеты [Huang et al., 2008]. При Веньчуаньском землетрясении на поверхности возникла система первичных сейсмодислокаций, которая вызвала крупные разрушения строений в населенных пунктах, повреждения линий электропередач, дорог и промышленных объектов. Весьма серьезными были последствия проявления сейсморазрывов и в рельефе, особенно в центральной и северной частях сеймотектонической зоны Лунмэньшань. Сейсмодислокации в рельефе хорошо изучены. Сейсморазрывы разделены на три основных сегмента с разной внутренней структурой, морфотектонической позицией и кинематикой смещений – две наиболее протяженные субпараллельные ветви северо-восточного простирания (сейсморазрывы Бэйчуань–Инсю и Гуаньсянь–Аньсянь) и одна ветвь поперечного северо-западного простирания (сейсморазрыв Сяюйдон). Система сейсморазрывов имеет в основном взбросовые смещения в комбинации с правосторонними (для первых двух ветвей) амплитудами смещений в несколько метров. Так, вертикальная амплитуда взброса достигала в пос. Шаба уезда Бэйчуань 9 м, а амплитуда сдвига в пос. Пинтон уезда Пинву – 4.8 м (см. рис. 1) [Xu et al., 2009].

В регионе наблюдались десятки тысяч оползней, обвалов, осыпей, образовались подпруженные обвалами и оползнями озера. Площадь пострадавшей от них территории достигла 632 км². Количество выявленных проявлений опасных процессов, представлявших явную или косвенную угрозу поселениям провинции Сычуань, составило 12 000 (рис. 2) [Хуан, Ли, 2010]. Объем крупнейшего оползня Дагуанбао (Daguangbao landslide) в г. Аньсянь – 1.15·10⁶ м³.

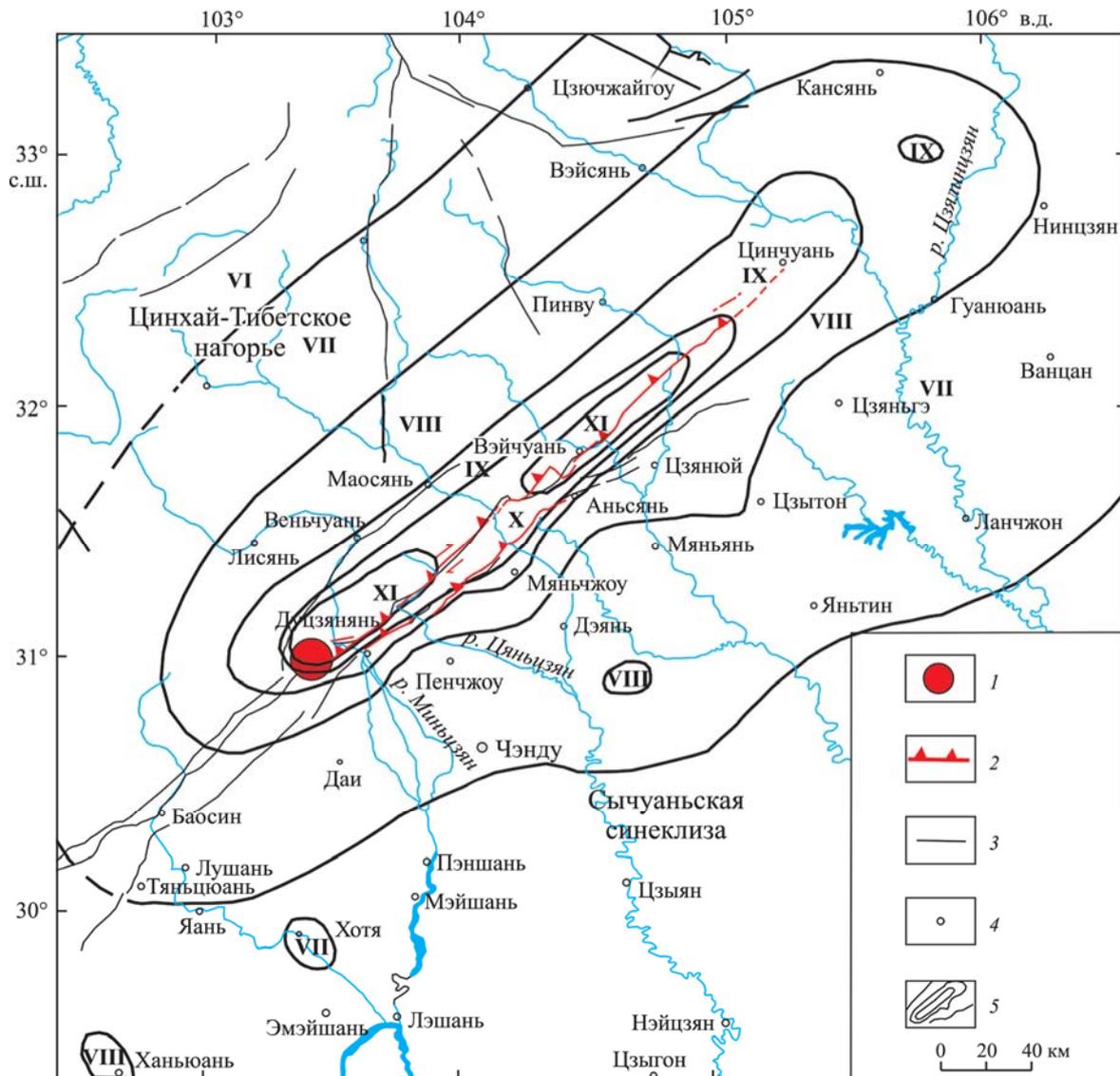


Рис. 1. Карта системы сейсморазрывов Веньчуаньского землетрясения 2008 г. в зоне активных разломов (взбросо-сдвигов) Лунмэньшань и изосейст в баллах китайской макросейсмической шкалы (по данным Китайской сейсмологической администрации с доп. Лю Цзяо)

1 – эпицентр Веньчуаньского землетрясения 12.05.2008 г.; 2 – сейсморазрывы; 3 – активные в голоцене разломы; 4 – города и уезды; 5 – изосейсты

На карте общего сейсмического районирования Китая 2001 г. (ОСР), построенной по модели расчетных акселерограмм сейсмических воздействий ускорение в эпицентральной области считалось 0.1–0.15 g (по используемой в Китае инструментальной шкале интенсивности – 7 баллов) (рис. 3), а на карте изосейст Веньчуаньского землетрясения (см. рис. 1) максимальная интенсивность сотрясений составила XI баллов по китайской макросейсмической шкале, что говорит об ошибочности оценки сейсмической интенсивности на карте ОСР.

По данным макросейсмического обследования эпицентральной области, эффекты с интенсивностью XI баллов сконцентрированы в пос. Инсю (уезд Веньчуань) и пос. Цюшань (уезд Бэйчуань). Изосейсты такой интенсивности протягиваются в виде

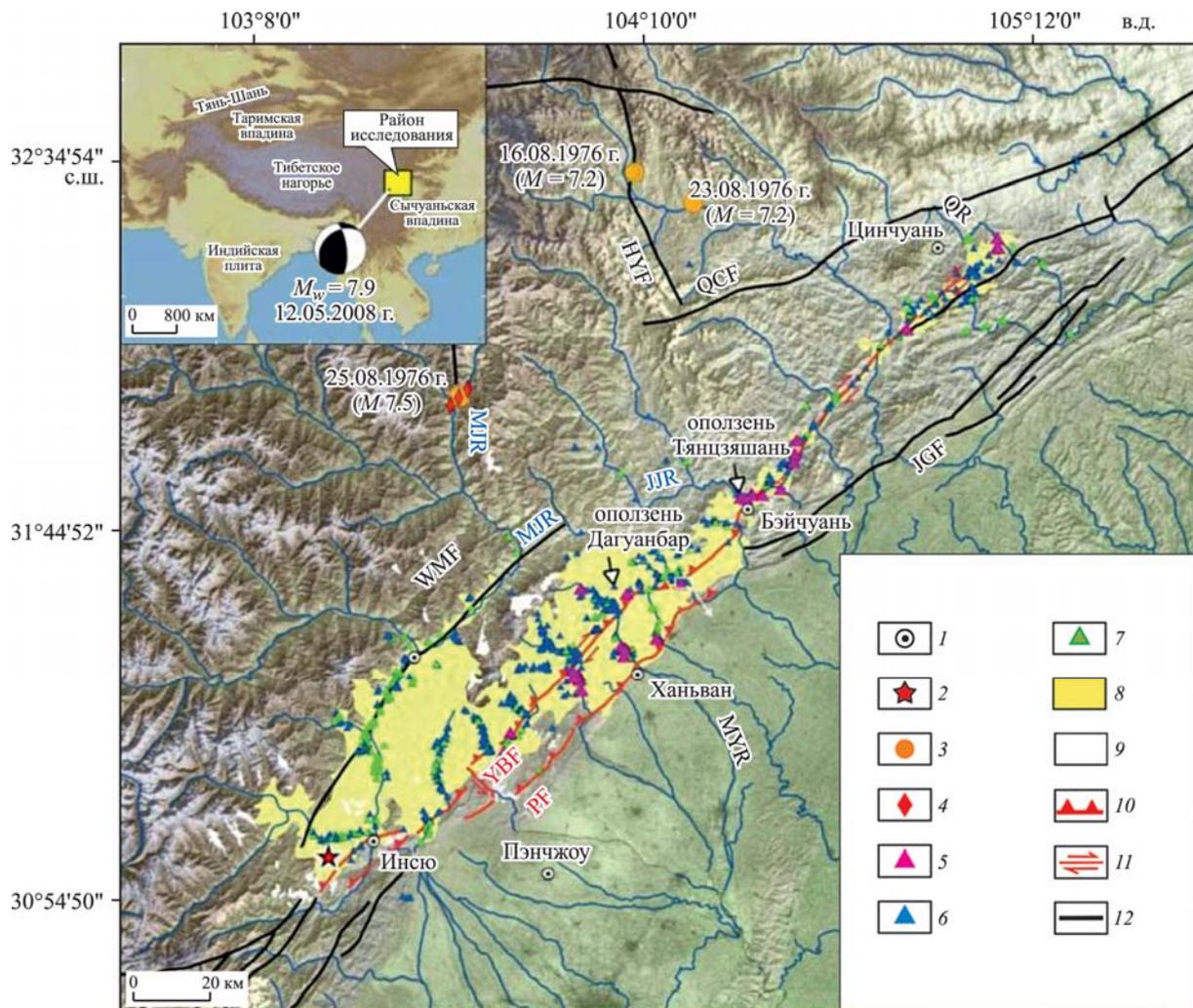


Рис. 2. Схема распространения сейсмодислокаций Веньчуаньского землетрясения 2008 г. (по данным Государственной главной лаборатории по предотвращению геокатастроф и защите геосреды Технологического университета г. Чэнду, Китай)

1 – населенные пункты; 2 – эпицентр Веньчуаньского землетрясения 12.05.2008 г.; 3 – сейсмические события; 4 – исторический оползень Дэси; 5 – дамбы с водостоками; 6 – участки полного подпруживания реки; 7 – участки частичного подпруживания реки; 8 – зона оползней с высокой плотностью; 9 – облака и тени; 10–12 – поверхностные разломы: 10 – взросы; 11 – сдвиги; 12 – активные разломы. Аббревиатуры образованы от названий соответствующих разломов на английском языке

двух длинных узких неправильных овалов вдоль зоны сейсморазрывов Бэйчуань–Инсю в северо-восточном направлении от инструментального эпицентра и имеют площадь 2580 км². Юго-западная изосейстовая зона с интенсивностью XI баллов имела длину большой оси 97 км и длину малой оси 17 км. Протяженность большой оси северо-восточной изосейстовой зоны с интенсивностью XI баллов – 71 км, малой оси – 15 км. В пределах этих одиннадцатибалльных изосейстовых зон полностью разрушены все здания, сельские дома, мосты, дороги и другие поверхностные конструкции, а тоннели в целом хорошо сохранились. Нередко видны проявления разжижения песка и грифоны.

Макросейсмическая область с интенсивностью X баллов имела узкую неправильно-овальную форму с длиной большой оси 224 км, малой оси – 23 км; площадь – 3650 км².

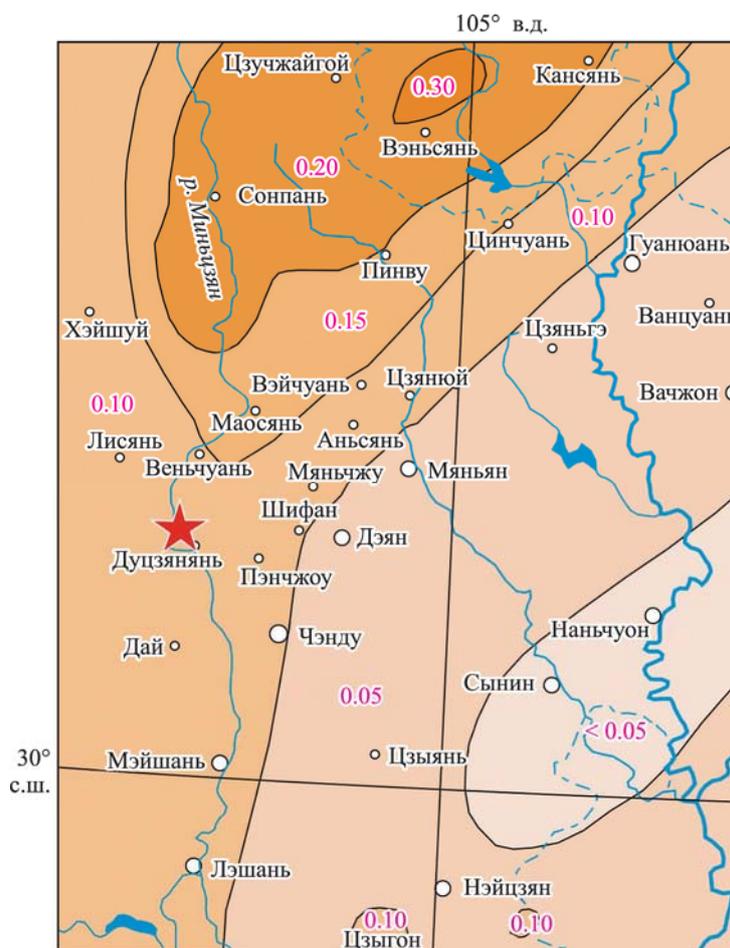


Рис. 3. Фрагмент карты общего сейсмического районирования в терминах пиковых ускорений грунта, составленной в 2001 г. в Китае по модели расчетных акселерограмм сейсмических воздействий, включающий эпицентральную область Веньчуаньского землетрясения 2008 г.

«Звездочка» – эпицентр Веньчуаньского землетрясения

В этой области поверхностные конструкции относительно хорошо сохранились только в местах, располагавшихся на удалении от сейсморазрывов и зон действия разрушительных склоновых процессов. Например, в пос. Ханьван (г. Мяньюн) сооружения были сильно повреждены в радиусе 1 км от поверхностных сейсморазрывов, но ущерб для построек по мере удаления от разрывов резко уменьшался.

Девятибалльная зона сотрясений, полностью охватывающая области распространения первичных и вторичных сейсмодислокаций, вытянута в северо-восточном направлении. Ее длина – около 350 км при ширине ~50 км. Зоны восьми- и семибалльных воздействий в плане также выглядят как овалы несколько неправильной формы, длинные оси которых ориентированы в северо-восточном направлении. Однако эти «овалы» уже не столь узкие, как это характерно для зон изосейст более высоких баллов.

Авторы настоящей статьи в разное время посетили ключевые участки эпицентральной области землетрясения [Рогожин, Шень, 2010]. В 2016 г. Лю Цзяо принимала участие в работе полевого отряда Института геологии Китайской сейсмологической администрации, г. Пекин, Китай (см. рис. 1). Ниже приводятся описания и фотографии сейсмодислокаций и поврежденных конструкций.

Сейсморазрыв Бэйчуань–Инсю

Пос. Инсю уезда Веньчуань (31.061° с.ш., 103.333° в.д., высота над ур. моря 900 м). Через пос. Инсю после землетрясения прошли две ветви сейсморазрывов, имеющих азимут простирания $60\text{--}70^\circ$ СВ. Они развились вдоль разлома Бэйчуань–Инсю, который приурочен к центральной части зоны разломов Лунмэньшань. На поверхности сформировался уступ, который сместил русло р. Миньцзян, оказавшуюся на пути зоны разрыва сельскую бетонную дорогу и речные террасы (рис. 4). Сейсморазрыв проявился в виде взброса и приразломной антиклинальной складки с амплитудой смещения 2.4 м. Ширина зоны эскарпа сейсморазрыва местами достигала 34 м. На рис. 4 видно, что в поднятом крыле приразломного уступа появились трещины растяжения, а в опущенном крыле конструктивно повреждено шестиэтажное здание: второй этаж этого здания «сложился» и полностью исчез. Известно, что любое, даже самое сейсмостойкое здание, попавшее в зону сейсморазрыва (X–XI баллов), полностью или в значительной мере разрушается (рис. 5, 6). Здание общежития средней школы пос. Инсю нарушено трещинами по типу сдвигов. Первый этаж этого здания исчез, а стекла были полностью выбиты (рис. 7). На сейсмической станции Инсю, расположенной непосредственно у сейсморазрыва, и вокруг нее наблюдалось полное разрушение зданий, а зарегистрированное ускорение составило всего 205 см/с^2 (по используемой в Китае инструментальной шкале – 7–8 баллов) [Рогожин, Шень, 2010].



Рис. 4. Эскарп возникшего при Веньчуаньском землетрясении сейсморазрыва Бэйчуань–Инсю и геоморфология речных террас в пос. Инсю уезда Веньчуань (вид на запад). Фото Чэн Личунь

Стрелки показывают положение сейсморазрыва; T1–T4 – поверхности надпойменных террас р. Миньцзян



Рис. 5. Полностью разрушенные при Веньчуаньском землетрясении здания в зоне сейсморазрыва в пос. Инсю. Фото Чэн Личунь



Рис. 6. Разрушенное при Веньчуаньском землетрясении учебное здание средней школы в пос. Инсю (вид на север)



Рис. 7. Разрушенное при Веньчуаньском землетрясении здание общежития средней школы в пос. Инсю

Вкрест сегмента эскарпа сейсморазрыва Бэйчуань–Инсю на террасе Т2 (см. рис. 4) на берегу р. Миньцзян в пос. Инсю специалистами Института геологии Китайской сейсмологической администрации пройдена траншея. В стенках траншеи аллювиальные и коллювиальные отложения были разделены на 7 слоев. Анализ разреза стенки траншеи показывает наличие двух палеосейсмических событий кроме Веньчуаньского землетрясения 2008 г. Палеособытия имели место примерно 3300–2300 лет т.н. и 5920–5730 лет т.н. Средний период повторяемости сильных землетрясений, таким образом, – около 3000 лет [Ran *et al.*, 2013].

Пос. Хонкоу возле г. Дуцзянянь ($31^{\circ} 03.8'$ с.ш., $103^{\circ} 36' 56.9''$ в.д., высота над ур. моря – 983 м). Сейсморазрыв в этом месте имеет азимут простирания $55\text{--}65^{\circ}$ СВ и длину около 39 км, представлен взбросом с правосдвиговой составляющей. Амплитуда вертикального смещения около электрической станции Фэйшуйвань (дер. Шеньсигоу, пос. Хонкоу, г. Дуцзянянь) – до 6 м, горизонтального – 4.5 м.

В дер. **Бацзяомяо (пос. Хонкоу, г. Дуцзянянь)** (31.14522° с.ш., 103.69189° в.д.) наблюдается редко встречающийся крутой эскарп сейсморазрыва (рис. 8, а). Амплитуда взбросового смещения при землетрясении 2008 г. составила около 4 м. Азимут простирания разрыва здесь – 40° СВ, азимут падения – 310° СЗ, угол падения – 76° . В плоскости разлома висячего блока развиты две группы следов сейсмогенных подвижек (зеркал скольжения), наклоненных к западу. Угол падения более поздней группы подвижек в нижней части – 75° , в верхней части – до 80° . Угол падения более ранней группы борозд скольжения составляет только $32\text{--}46^{\circ}$ (рис. 8, б).

Интерпретация следов сейсмогенных подвижек в плоскости сейсморазрыва позволяет заключить, что подвижка на первом этапе вспарывания при Веньчуаньском землетрясении является правосторонним взбросо-сдвигом, а на втором этапе – правосторонним сдвиго-взбросом.



Рис. 8. Редко встречающийся крутой эскарп сейсморазрыва (а) и зеркала скольжения в плоскости разлома его висячего блока (б). Деревня Бацзямяо, пос. Хонкоу, г. Дуцзянянь. Фото Чэн Личунь

Здания, попавшие в зону сейсморазрывов, полностью разрушены или наклонены. Макросейсмический эффект собственно от сотрясений поверхности при землетрясении, за исключением самой зоны сейсморазрыва, аномально низкий – примерно 7 или 8 баллов. Двухэтажное здание санатория, находящееся в зоне уступа сейсморазрыва, полностью разрушено, а вблизи уступа здание сохранилось хорошо, видны только небольшие трещины в стенах и штукатурке (рис. 9, а).



Рис. 9. Примеры разрушения зданий при Веньчуаньском землетрясении. Фото Сюй Сивэй
а – дер. Бацзямяо, пос. Хонкоу, г. Дуцзянянь; б – деревянный дом в дер. Шеньсигоу, пос. Хонкоу, г. Дуцзянянь

В дер. **Шеньсигоу (пос. Хонкоу, г. Дуцзянь)** деревянный дом, попавший в зону эскарпа разрыва, наклонен. В поднятом крыле часть этого деревянного дома полого наклонена (рис. 9, б). В этой деревне один из двухэтажных домов, расположенный на поднятом крыле примерно в 36 м от эскарпа сейсморазрыва (взброс с амплитудой вертикального смещения 4 м), совершенно не разрушен и никаких трещин не наблюдается.

Сам древний **город Дуцзянянь**, расположенный в 2–3 км к юго-западу от юго-западного окончания сейсморазрыва Бэйчуань–Инсю, испытал умеренные разрушения отдельных зданий интенсивностью не более 7 баллов [Рогожин, Шень, 2010].

Пос. Лэйгу, г. Бэйчуань. В этом месте развиты сейсморазрывы в виде взбросов амплитудой вертикального смещения около 2.5–3.5 м (максимум – до 4.5–5 м), а горизонтального праводвигового – 1–2.5 м. В зоне сейсморазрыва, трассирующегося на первой (Т1) надпойменной террасе р. Лаочжанкоу в пос. Лэйгу и второй (Т2) подпойменной террасе той же реки в дер. Шиянь, есть два эскарпа сейсморазрыва. Высота главного эскарпа составляет 2.1 м (рис. 10). Также в окрестностях пос. Лэйгу при Веньчуаньском землетрясении произошло большое количество оползней (рис. 11).



Рис. 10. Эскарп сейсморазрыва на поверхности террасы Т1 р. Лаочжанкоу возле пос. Лэйгу (вид на юго-запад). Фото Чэн Личунь



Рис. 11. Крупный сейсмогенный оползень, возникший при Веньчуаньском землетрясении, в пос. Лэйгу

Пос. Цюшань в уезде Бэйчуань. На этот поселок пришлось наиболее сильные разрушения и наибольшее количество жертв. В центре поселка (31.82894° с.ш., 104.45689° в.д.) на речной террасе трассируется сейсморазрыв землетрясения – правый взбросо-сдвиг в виде уступа с вертикальной амплитудой смещения 3.1 м, а горизонтальной правосдвиговой – 2.4 м. Азимут простирания сейсморазрыва – 35° СВ [Xu et al., 2008]. В зоне разрыва отмечается массовое разрушение зданий, соответствующее интенсивности 9–10 баллов. В то же время даже на небольшом удалении от зоны разрыва макросейсмический эффект резко падает, а многоэтажные здания не разрушены. Возникшие в результате землетрясения сейсмогенные склоновые процессы породили в окрестностях поселка обширные оползни и обвалы, вызвавшие сильные повреждения, полное разрушение и погребение под горными массами большого количества зданий и сооружений. Например, оползень Ванцзянь, расположенный в южной части поселка, накрыл четыре улицы, что привело к гибели 1000 человек (рис. 12). На восточном крутом склоне долины (уклон 50°) произошел значительный по объему каменный обвал. Глыбы палеозойских известняков размерами от $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ до $2.0 \times 2.0 \times 2.0$ м³ разрушили окраину города, полностью уничтожили или вызвали наклон (частично деформировали) многоэтажных зданий, завалили площадку стадиона.



Рис. 12. Огромный сейсмогенный оползень Ванцзянь, возникший в южной части пос. Лэйгу при Веньчуаньском землетрясении (вид на юго-запад)

Самое большое вертикального смещение с поднятием висячего крыла на 10 ± 0.5 м обнаружено в дер. Шабай, расположенной в 2–3 км к северо-востоку от пос. Цюшань ($31^\circ 50' 17.1''$ с.ш., $104^\circ 28' 05.6''$ в.д.; высота над ур. моря 696 м, рис. 13). Большинство домов, которые находились в зоне разрыва на поднятом северо-западном крыле, были сильно повреждены. Однако бетонное трехэтажное здание, расположенное в непосредственной близости от зоны разрыва на опущенном крыле, в основном сохранилось. Длина вскрывшегося участка сейсморазрыва здесь – 100–150 м. В данной точке наблюдается продолжение сейсмогенного эскарпа в северо-восточном направлении.



Рис. 13. Эскарп сейсморазрыва с поднятием 10 ± 0.5 м, возникшего при Веньчуаньском землетрясении в дер. Шаба, расположенной в 2 км к северо-востоку от пос. Цюшань. Фото Чэн Личунь

Установлено, что сейсморазрыв приурочен к уже существующей линии обратного уступа на горном склоне. То есть сейсморазрыв Веньчуаньского землетрясения возник в зоне ранее существовавшего активного разлома, по которому и ранее происходили сейсмогенные подвижки [Рогожин, Шень, 2010].

Пос. Гуэйси. В дер. Фэнхуань вблизи пос. Гуэйси сейсморазрыв землетрясения (азимут простирания – 40° СВ, угол падения – 20°) почти перпендикулярно сместил сельскую бетонную дорогу (правосторонний взбросо-сдвиг); вертикальная амплитуда смещений – 2.4 м, горизонтальная – 3 м, поднято северо-западное крыло. На сельскохозяйственном поле трассируется сейсморазрыв; высота эскарпа сейсморазрыва – около 2.3 м, угол падения – 25° . Стволы деревьев наклонены («пьяный лес», (рис. 14). Кроме того, здесь произошел большой оползень, под которым была погребена вся деревня (рис. 15).



Рис. 14. Эскарп сейсморазрыва, возникшего при Веньчуаньском землетрясении на сельскохозяйственном поле в дер. Фэнхуань, пос. Гуэйси. Фото Чэн Личунь



Рис. 15. Большой оползень, возникший в результате Веньчуаньского землетрясения в дер. Фэнхуан, пос. Гуэйси. Фото Чэн Личунь

Дер. Донхэкоу, уезд Цинчуань. В уезде Цинчуань, находящемся на северо-восточном окончании сейсморазрыва Бэйчуань–Инсю, при землетрясении 2008 г. первичные сейсмодислокации наблюдались редко; только в пос. Шиба отмечен правосторонний сдвиг с амплитудой смещения 3.4 м со сбросовой составляющей. Вторичные сейсмогравитационные явления (огромные оползни, обвалы, подпруживание озер) широко развиты, например большой оползень Донхэкоу объемом $30 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ (расстояние движения оползня – 3.5 км) (рис. 16).



Рис. 16. Большой оползень Донхэкоу, возникший в результате Веньчуаньского землетрясения в уезде Цинчуань (из архива Государственной главной лаборатории по предотвращению геокатастроф и защите геосреды Технологического университета г. Чэнду, Китай)

Предгорный сейсморазрыв Гуаньсянь–Аньсянь

Сейсморазрыв Гуаньсянь–Аньсянь имеет азимут простирания $40\text{--}50^\circ$ СВ и длину до 90 км. Он образовался вдоль предгорного разлома Цзяню–Гуаньсянь и расположен в 12–15 км к юго-востоку от сейсморазрыва Бэйчуань–Инсю. В г. Мянчжоу наблюдается сейсморазрыв с азимутом простирания 15° СВ и амплитудой вертикального смещения до 3.5 м. Сейсморазрыв также трассируется во дворе средней школы между двумя учебными зданиями в виде взброса. Эскарп сейсморазрыва имеет азимут простирания 30° СВ, его высота – 1.8–2.0 м, ширина зоны сейсморазрыва – 13 м. На опущенном крыле сейсморазрыва четырехэтажное кирпичное здание школы постройки 1998 г., находящееся в 5 м от эскарпа, устояло, но было существенно повреждено; видны трещины в штукатурке в углах помещений и межэтажных перекрытий. С другой стороны от уступа сейсморазрыва, на его поднятом крыле, кирпичное здание постройки 2005 г. повреждено очень слабо; трещин в штукатурке не видно (рис. 17). Однако здания сельскохозяйственного назначения, попавшие в зону эскарпа, оказались полностью разрушены или сильно повреждены; впрочем одно такое здание только наклонено в сторону опущенного крыла разрыва.

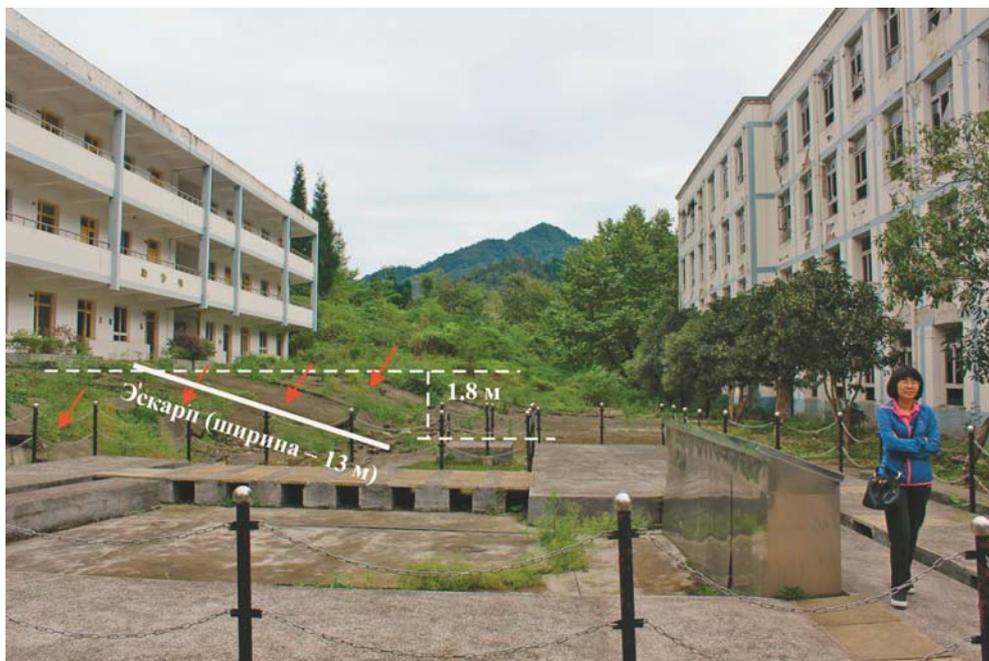


Рис. 17. Пологий эскарп возникшего при Веньчуаньском землетрясении сейсморазрыва, трассируемый во дворе китайско-французской школы, г. Байлу

Вкрест пологого сегмента эскарпа в 10 м к востоку от зданий школы специалистами Института геологии Китайской сейсмологической администрации пройдена траншея глубиной около 8 м и длиной 15 м. Здесь высота старого эскарпа сейсморазрыва – 1.7 ± 0.2 м, а высота нового, Веньчуаньского, – 1.8 ± 0.3 м. Результаты палеосейсмологических исследований позволили установить, что вдоль сейсморазрыва Гуаньсянь–Аньсянь ранее неоднократно возникали такие же сильные землетрясения, как Веньчуаньское. Сейсмические события с магнитудой, близкой к магнитуде главного толчка, происходили 3 раза в течение последних 7700 лет [Ran et al., 2010]

На ул. Байлу одноэтажный дом, построенный в 2005 г. и расположенный примерно в 35 м к северо-западу от сейсморазрыва на его поднятом крыле, совершенно не поврежден, видны только трещины в штукатурке.

Сейсморазрыв Сяюйдон

Сейсморазрыв Сяюйдон, расположенный между сейсморазрывами Бэйчуань–Инсю и Гуаньсянь–Аньсянь, представляет собой левый сдвиг со взбросом длиной около 7 км и простираем 340° СЗ [Chen et al., 2013]. В дер. Луоянь (пос. Сяюйдон, г. Пенчжоу) на второй надпойменной террасе (Т2) р. Байшуйхэ наблюдается эскарп в виде взброса с левым сдвигом; амплитуда вертикального смещения – 1.9 м, горизонтального – 3.4 м (рис. 18).



Рис. 18. Эскарп сейсморазрыва, возникшего при Веньчуаньском землетрясении на второй надпойменной террасе р. Байшуйхэ в виде взброса с левым сдвигом, пос. Сяюйдон (вид на северо-запад)

Сейсморазрыв Сяюйдон сместил русло р. Байшуйхэ, восточную часть моста Сяюйдон над р. Байшуйхэ и высокую пойму (рис. 19). Деформация этого участка моста чрезвычайно велика: мост разрушен с разделением на несколько сегментов, при этом одна секция выброшена на другую. Если представить, что один фрагмент моста был подброшен и на 2–3 м надвинут на другой фрагмент (см. рис. 19, б), то ускорение смещения поверхности во время главного толчка в данном месте могло превышать $1g$.

Зона уступа сейсморазрыва и деформационная зона имеют ширину от 5 до 20 м. Юго-западное крыло поднято относительно юго-восточного. Угол уступа разрыва составляет $30\text{--}35^\circ$. Сейсморазрыв сместил пересекающие его автодороги, земельные участки, русло р. Байшуйхэ, высокую пойму и террасы реки в виде уступов. В русле реки уступ выражался в виде порогов, или водопадов. Конструкции, находящиеся в зоне уступа сейсморазрыва, сильно повреждены, деревья наклонены в форме «пьяный лес».



Рис. 19. Эскарп сейсморазрыва Сяюйдон, возникшего при Веньчуаньском землетрясении в русле и на высокой пойме р. Байшуйхэ в виде левостороннего сдвига-взброса, (а) и сильно разрушенный мост над р. Байшуйхэ (б)

Следует отметить, что ориентировка сейсморазрыва на этом сегменте – поперечная относительно основной системы первичных сейсмодислокаций Веньчуаньского землетрясения. Вероятно, этот смыкающий две основные ветви сейсморазрыва дизъюнктив в обстановке правостороннего сдвига испытал моментальное поперечное близгоризонтальное сжатие и надвиговое смещение поверхности в северо-восточном направлении [Рогожин, Шень, 2010].

Вкрест эскарпа сейсморазрыва на речных террасах было пройдено несколько траншей. Результаты палеосейсмологических исследований показали, что в данном районе в прошлом имели место два сильных сейсмических события. Предшествующее Веньчуаньскому землетрясению произошло 3200–2300 л. н. [Chen et al., 2013].

Обсуждение результатов

Результаты проведенного авторами изучения макросейсмических проявлений Веньчуаньского землетрясения показали, что при главном толчке на поверхности возникла сложная система первичных сейсмодислокаций – сейсморазрывы. Ширина эскарпа сейсморазрывов достигает 10 м, а смещения по ним – нескольких метров. Сейсморазрывы Веньчуаньского землетрясения возникли в зоне активных разломов Лунмэньшань (взбросо-сдвигов), по которым и ранее происходили сейсмогенные подвижки. Результаты палеосейсмологических исследований методом тренчинга позволили установить, что в очаговой области Веньчуаньского землетрясения ранее неоднократно (примерно 1 раз в 3000 лет) возникали такие же сильные землетрясения, как и Веньчуаньское [Chen et al., 2013; Ran et al., 2010, 2013]. Кроме того, в процессе Веньчуаньского землетрясения возникло множество вторичных (склоновых гравитационных и вибрационных) сейсмодислокаций.

Объекты инфраструктуры, непосредственно попавшие в зоны эскарпа сейсморазрыва и распространения вторичных нарушений поверхности, были полностью разрушены или сильно повреждены. При этом макросейсмическая интенсивность сотрясений была аномально низкой для магнитуды 8.0. Характер колебаний поверхности даже в непосредственной близости от системы сейсморазрывов при главном толчке отличался аномально низкими значениями и обычно не превышал 7–8 баллов. Высокие оценки балльности (X–XI баллов) приурочены к узкой полосе вдоль зоны сейсморазрывов (см. рис. 1). Распределение склоновых нарушений также имеет явно линейный характер и приурочено к сейсмогенному Инсю-Бэйчуаньскому разлому и долинам крупных рек.

При этом переход от зон очень сильного эффекта к зонам с меньшими (VIII–IX баллов) воздействиями выглядит несколько необычно. Области смены зон необычайно узки, а изосейсты в этих местах аномально сближены. Последнее свидетельствует о доминировании разрушений, связанных с геологическими эффектами. На практике это означает, что при оценке сейсмического риска в горной области необходимо учитывать наличие и распространение новых и старых обвалов и оползней и не возводить сооружения на дне каньонообразных долин рек со склонами большой крутизны.

На карте общего сейсмического районирования Китая, составленной по модели расчетных акселерограмм сейсмических воздействий в 2001 г. область, затронутая Веньчуаньским землетрясением, была отнесена к зоне с ожидаемой интенсивностью 7 баллов. Именно из-за низкой оценки возможных сейсмических проявлений возникшее здесь землетрясение привело к столь катастрофическим последствиям.

Заключение

Распределение первичных и вторичных эффектов Веньчуаньского катастрофического землетрясения 12.05.2008 г. на юго-западе Китая позволило оконтурить зоны максимальных (X–XI баллов) нарушений поверхности. Руководством по оценке интенсивности сотрясений послужила шкала EEE (Earthquake environmental effects), разработанная в рамках одного из проектов INQUA (2004–2016 гг.) [Michetti et al., 2004; Tatevossian et al., 2009]. В целом зона интенсивных поверхностных деформаций образует узкую протяженную овальную область, вытянутую в северо-восточном направлении и совпадающую с простиранием системы сейсморазрывов. Сопоставление системы изосейст, выделенных по макросейсмическим данным о повреждениях зданий и сооружений, с положением зон разных проявлений по шкале EEE показало их полное соответствие (см. рис. 1, 2).

Значительная часть разрушений инфраструктуры и большинство человеческих жертв при Веньчуаньском землетрясении были связаны в основном не с сотрясениями, вызвавшими обрушение зданий и сооружений, а с широким проявлением первичных и вторичных геологических процессов, спровоцированных толчками. Этот макросейсмический феномен может оказаться достаточно типичным для многих сильнейших землетрясений, а геологические эффекты среды, возникающие в этих случаях, могут существенно усиливать уровень сейсмического риска для заселенных и освоенных территорий [Michetti et al., 2004; Tatevossian et al., 2009].

Существенные изменения рельефа на огромных площадях, образование многочисленных запрудных озер и практически полное разрушение некоторых населенных пунктов вызвали в зоне Веньчуаньского землетрясения экологическую катастрофу. В связи с этим значительная часть уцелевшего местного населения была вынуждена навсегда покинуть места своего обитания.

Литература

- Рогожин Е.А., Шень К. Сейсмотектонические и макросейсмические особенности Веньчуаньского землетрясения 12 мая 2008 г. ($M_S = 8.0$) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37, № 2. С. 5–19.
- Хуан Ж.Ц., Лу В.Л. Анализ опасных геологических процессов, вызванных Веньчуаньским землетрясением 12 мая 2008 года в Китае // Геориск. 2010. № 1. С. 14–20.
- Chen Li-chun, Ran Yong-kang, Wang Hu et al. Paleoseismology and kinematic characteristics of the Xiaoyudong rupture, a short but significant strange segment characterized by the May 12, 2008, M_w 7.9 earthquake in Sichuan, China // Tectonophysics. 2013. V. 584. P. 91–101.

- Huang R.Q., Pei X.J., Li T.B.* Analysis of general characteristic and formation mechanism of the Da-guangbao giant landslide triggered by the Wenchuan earthquake // *J. Eng. Geol.* 2008. V. 16, N 6 (in Chin. with Engl. abstr.).
- Michetti A.M., Esposito E., Gürpinar A., Mohammadioun B., Porfido S., Rogozhin E., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Comerci V., Marco S., McCalpin J., Morner N.A.* The INQUA scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment // *Memorie descrittive della Carta geologica d'Italia.* 2004. V. LXVII.
- Ran Y.K., Chen W.S., Xu X.W. et al.* Paleoseismic events and recurrence interval along the Beichuan–Yingxiu fault of Longmenshan fault zone, Yingxiu, Sichuan, China // *Tectonophysics.* 2013. V. 584. P. 81–90.
- Ran Yongkang, Chen Lichun, Chen Jie et al.* Paleoseismic evidence and repeat time of large earthquakes at three sites along the Longmenshan fault zone // *Tectonophysics.* 2010. V. 491. P. 141–153.
- Tatevossian R.E., Rogozhin E.A., Arefiev S.S., Ovsyuchenko A.N.* Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies. London: Geol. Soc., 2009. Spec. Publ. V. 316. P. 73–91.
- Xu X., Wen X., Yu G. et al.* Coseismic reverse and oblique slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China // *Geology.* 2009. V. 37, N 6. P. 515–518.
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing et al.* The M_S 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure // *Seismol. and Geol.* 2008. V. 30, N 3. P. 597–629 (in Chin. with Engl. abstr.).

Сведения об авторах

ЛЮ ЦЗЯО – аспирантка, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (968) 353-89-11. E-mail: liujiao8926@mail.ru

LIU JIAO – PhD student, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia. Tel.: +7 (968) 353-89-11. E-mail: liujiao8926@mail.ru

РОГОЖИН Евгений Александрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-87-15. E-mail: eurog@ifz.ru

POGOZHIN E.A. – dr in geol.-min. sci., professor, deputy director, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (499) 254-87-15. E-mail: eurog@ifz.ru

THE MACROSEISMIC MANIFESTATIONS OF THE 2008 WENCHUAN DISASTROUS EARTHQUAKE ($M_S = 8.0$) ACCORDING TO THE STUDY OF SURFACE SEISMODISLOCATIONS

Jiao Liu¹, E.A. Rogozhin²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. On May 12, 2008, in Wenchuan, in the Sichuan province of China, a large intraplate $M_S = 8.0$ earthquake occurred along the Longmen Shan thrust fault zone. The hypocenter depth is 14 km. The mainshock of the Wenchuan earthquake ruptured the ground surface and formed primary

seismic faults system: Beichuan–Yingxiu Fault up to 240 km long; Guanxian–Anxian Fault about 70 km long and Xiaoyudong Fault 7 km long. On the map of the general seismic zoning in China in 2001, the epicentral region of the Wenchuan earthquake fell into the zone with an expected intensity of 7 degree. The maximum measured vertical and dextral displacements along the faults are up to 10 m and 4.8 m, respectively. Moreover, the earthquake generated tens thousands of landslides and rock avalanches. Much of the destruction of infrastructure and human casualties are mainly associated with the extensive development of activation of geological processes. The seismic intensity of surface shaking was anomaly low even also to the seismic faults system. The collected data on the distribution of primary and secondary effects of earthquakes has helped to delineate the zones 8, 9 and 10 quakes. Guidance on the assessment of the intensity of the shock was the scale of EEE (Earthquake environmental effects) developed in one project INQUA (2004–2016). In general, the zone of intense surface deformation forms a long, narrow oval, elongated in a north-east direction, corresponding with the strike system seismic faults.

Keywords: Wenchuan earthquake, rupture, faults, disaster, macroseismic effect, intensity, isoseismic line, environmental effects.