

УДК 550.34+551.242.1(513.1)

Цзяо Лю¹, Н.В. Короновский²

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РАЙОНА ВЭНЬЧУАНЬСКОГО КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 12 мая 2008 г. (ЛУНМЭНЬШАНЬ, ЗАПАДНЫЙ КИТАЙ)

Зона разломов Лунмэньшань расположена на границе высокогорной триасовой складчатой области Сунпань-Ганьцзы Цинхай — Тибетского нагорья и стабильной Сычуаньской синеклизы на платформе Янцзы. В этой области находятся четыре основных активных разлома и три покровные зоны. По данным анализа неотектоники и исторических землетрясений эта зона весьма сейсмоопасна. Система сейсморазрывов во время Вэньчуаньского землетрясения продемонстрировала праводвиговые смещения в комбинации со взбросовыми.

Ключевые слова: Вэньчуаньское землетрясение, Лунмэньшаньская зона разломов, Цинхай-Тибетское нагорье, Сычуаньская впадина, геологическое строение, неотектоника, сейсморазрывы.

Longmen Shan fault zone is located in the special joint between the Triassic Songpan-Ganzi orogen of the Qinghai-Tibetan Plateau and the stable Sichuan basin of the Yangtze platform. In this region there are four major active faults and three tectonic nappes. According to the analysis of neotectonics and historical earthquakes the Longmen Shan fault zone is a dangerous earthquake belt. The rupture system of the Wenchuan earthquake is characterized by thrust and dextral strike-slip movement.

Key words: Wenchuan earthquake, Longmen Shan fault zone, Qinghai-Tibetan plateau, Sichuan basin, geological structure, neotectonics, seismic ruptures.

Введение. В китайской провинции Сычуань на границе Синийских горных цепей Тибетского плато и Сычуаньской синеклизы 12 мая 2008 г. произошло катастрофическое Вэньчуаньское землетрясение. Координаты эпицентра 30,95° с.ш., 103,40° в.д. [CENC, 2008] в юго-восточной части округа Вэньчуань, а глубина гипоцентра главного толчка составила 14 км при магнитуде $M_w=7,9$ [Harvard Global, 2008] и $M_s=8,0$ [CENC, 2008] (рис. 1). Максимальная интенсивность сотрясений была оценена в XI баллов по китайской макросейсмической шкале [Fu et al., 2009]. Это одно из самых сильных и разрушительных землетрясений на территории континентального Китая после Таньшаньского землетрясения (1976). В пределах Лунмэньшаньской горной системы возникли многочисленные деформации в рельефе, многие населенные пункты, инфраструктура и жилые постройки были разрушены. По официальным сообщениям на 25 сентября 2008 г. погибли 69 227 человек, 374 643 были ранены, 17 923 человека считались пропавшими без вести. Прямой финансовый ущерб исчисляется суммой, превышающей 133 млрд долл. США. При этом существенным фактором, определившим людские и материальные потери, было широкое развитие катастрофических вторичных процессов: десятки

тысяч оползней, обвалов, осыпей, а также озер, подпруженных обвалами и оползнями. Через 5 лет 20 апреля 2013 г. в уезде Лушань городского округа Янь в 100 км от г. Чэнду произошло новое катастрофическое землетрясение с магнитудой $M_w=6,6$ ($M_s=7,0$). Очаг землетрясения залегал на такой же глубине 13 км. Отметим, что эпицентр этого сейсмического события находился на 80 км на юго-юго-запад от центральной зоны катастрофического Вэньчуаньского землетрясения 2008 г.

Район сочленения Лунмэньшаньской горной системы, возвышающейся над Сычуаньской синеклизой Южно-Китайской платформы, характеризуется очень высокой сейсмичностью. Геологические особенности этого региона, определяющие очень частые и сильные землетрясения, рассмотрены в статье.

Геологическое строение Цинхай-Тибетского нагорья. Цинхай-Тибетское нагорье представляет собой огромное возвышенное плато в Центральной и Восточной Азии, которое окружают массивные горные хребты. С юга оно ограничено хребтом молодых Гималаев, с севера — хребтом Куньлунь, за которым лежат равнины Средней Азии, с запада — Каракорумом и с востока — хребтом Лунмэньшань. Главное событие в геологической истории этого региона — коллизия Индостанского

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; e-mail: liujiao8926@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, зав. кафедрой, проф., докт. геол.-минерал. н.; e-mail: koronovsky@rambler.ru

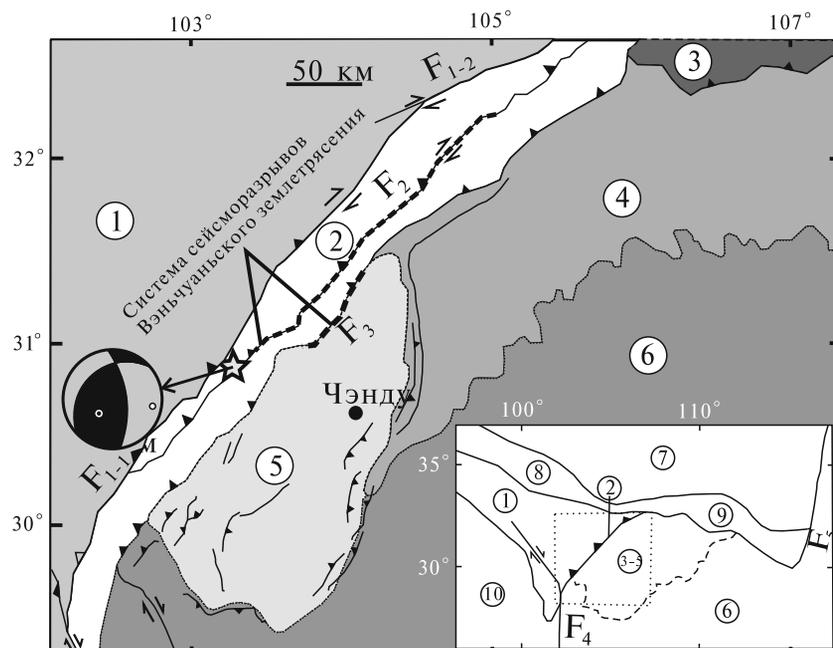


Рис. 1. Упрощенная тектоническая карта горной системы Лунмэншань. Звездочка — эпицентр Вэньчуаньского землетрясения 2008 г.: F_{1-1} — разлом Вэньчуань-Маовэнь, F_{1-2} — разлом Цинчуань, F_2 — разлом Бэйчуань-Инсю, F_3 — разлом Гуаньсянь-Аньсянь, F_4 — разлом Сяньшуйхэ, F_5 — разлом Таньлу. Цифрами в кружках обозначены: 1 — террейн Сунпань-Ганьцзы, 2 — складчато-надвиговая зона Лунмэншань, 3 — мезозойская покровная зона Мисаншань, 4 — мезозойский предгорный прогиб, 5 — кайнозойский Чэндуский бассейн, 6 — Южно-Китайский блок, 7 — Северо-Китайский блок, 8 — террейн Куньлунь-Цайдам, 9 — орогенный пояс Циньлин-Дабе, 10 — террейн Цзянтан, по [Yin, 2010] с дополнениями автора

континента с Евразией в эоцене, которая произошла при закрытии океана Неотетис. В результате коллизии сформировалась складчато-надвиговая система Гималаев.

В Цинхай-Тибетском нагорье с севера на юг развиты три сутурные зоны субширотного простирания: сутуры Циньшацзян, Баньгонцо-Луцзян и Индия-Брахмапутра. Современное Плато Тибета состоит из нескольких сиалических блоков — блока Цайдам вместе со складчатыми системами Куньлуня и Циляншаня, блоков Сунпань, Цянтан и Лхаса. Эти блоки в прошлом были разделены океаническими бассейнами. Террейн Сунпань-Ганьцзы представляет собой триасовый складчатый пояс, связанный с закрытием океанических бассейнов — на севере Куньлунь-Анимаци, на юго-западе — Циньшацзян, а также со столкновениями террейнов Восточного Куньлуня, Сунпань-Ганьцзы, Цянтан в позднем триасе. Складчатая область Сунпань-Ганьцзы занимает большую область в северо-восточной части Цинхай-Тибетского нагорья. Она является внутриконтинентальным орогенным поясом с длительным развитием с мезозоя и в основном состоит из триасового флиша — Сиканской серии с пассивной окраиной и обломочного материала флишевого типа. Интенсивный орогенез происходил с начала раннекеммерийской (индосинийской) складчатости [Li et al., 2009b].

Цинхай-Тибетское нагорье является одним из основных районов сейсмической активности с высокой частотой и высокой интенсивностью землетрясений. В XX в. землетрясения с $M \geq 8$ происходили 10 раз, что составляет половину таких событий в мире. В последние годы произошло несколько катастрофических событий, например, таких, как Вэньчуаньское (2008), Юйшуское (2010), Яньское (2013), Кандинское (2014)

землетрясения и другие, которые имеют прямое или косвенное отношение к Цинхай-Тибетскому нагорью. Эти землетрясения соответствуют восточной окраине Цинхай-Тибетского нагорья, для которой существуют две модели развития. Первая из них предусматривает энергичное надвижение масс на восток, которое выражается в системе надвигов, выположивающихся к западу. Именно с ними связаны гипоцентры землетрясений, расположенных относительно неглубоко [Avouac, Tarronnie, 1993]. Вторая модель предполагает утолщение земной коры в Лунмэншаньской горно-складчатой системе и связанную с этим процессом праводвиговую деформацию [England, Molnar, 1990].

Геологическое строение горной системы Лунмэншань. Рельеф Лунмэншаньской горной системы. Лунмэншаньская горная система простирается с северо-востока на юго-запад приблизительно на 500 км, обладает шириной до 50 км на юге от уездов Лудин, Тяньцюань, и протягивается через уезды Ваосин, Гуаньсянь, Цзяню на север до уездов Цинчуань, Гуанюань. На востоке она граничит с Западно-Сычуаньским передовым прогибом по предгорным скрытым разломам и на западе — со складчатой областью Сунпань-Ганьцзы по тыловым разломам (рис. 1). Весь этот горный пояс простирается на 20000 км² и в целом очень активен в тектоническом отношении.

В северо-западной части горной системы Лунмэншань рельеф выше, чем в юго-восточной, и высота горных цепей неравномерна — от 700 м до 5000 м, при этом разница высот составляет 1000–3000 м (рис. 2). Таким образом, Лунмэншаньская горная система — средневысокие горы с глубокими врезами, здесь находятся истоки основных притоков верхнего течения р. Янцзы. Система Лунмэншань — один из самых крутых

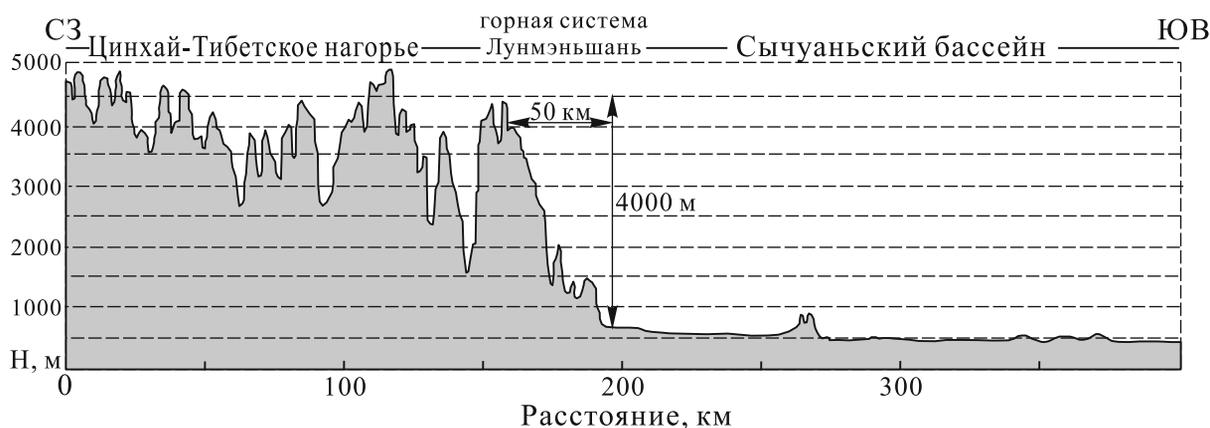


Рис. 2. Топографический профиль через Цинхай-Тибетское нагорье, горную систему Лунмэньшань и Сычуаньский бассейн

фронтов горных систем вдоль любого края Тибетского нагорья.

Стратиграфические и литологические особенности сейсмической горной системы Лунмэньшань. Зона Лунмэньшань представляет собой относительно самостоятельный стратиграфический комплекс. По характеристике тектонических деформаций, метаморфизму и типу разломов горную систему Лунмэньшань можно разделить на три основные стратиграфические зоны (А, Б, В).

Зона А — деформационно-метаморфическая тектоническая зона, состоящая из силурийских и девонских слабометаморфизованных пород и докембрийских граувакков, это западная часть горной системы Лунмэньшань между разломами Вэньчуань-Маовэнь и Бэйчуань-Инсю. Эта зона характеризуется в основном опрокинутыми подобными складками, в ее досинийском комплексе была развита хрупко-вязкая сдвиговая зона со сланцеватостью.

Зона Б сложена осадочными породами позднепалеозойско-триасового возраста, с палеозойскими известняками и угленосными толщами. Зона Б — центральная в горной системе Лунмэньшань, находится между разломом Бэйчуань-Инсю и разломом Гуаньсянь-Аньсянь. В ней хорошо развиты чешуйчатая структура в центрально-северном сегменте и останец тектонического покрова в центрально-южном сегменте. Зона В расположена между разломами Гуаньсянь-Аньсянь и Гуанюань-Даи, это деформационная зона, состоящая из красноцветных толщ, начиная с юрских до неогеновых включительно, а также из рыхлых четвертичных аллювиальных отложений. В ней хорошо развит ряд антиклиналей и синклиналей, являющихся асимметричными кулисообразно расположенными концентрическими складками [Li et al., 2009b].

Региональные разломы горной системы Лунмэньшань. Зона активных разломов системы Лунмэньшань имеет северо-восточное простирание и северо-западное направление наклонов сместителей. С северо-запада на юго-восток она состоит из четырех параллельно ориентированных основ-

ных активных и нескольких вторичных разломов (рис. 3) [Deng et al., 1994].

Тыловые разломы горной системы Лунмэньшань с севера на юг разделяются на 3 основные ветви: разлом Вэньчуань-Маовэнь в центральной части, разлом Цинчуань в северной и разлом Гэнда-Лундун в южной части. Установлено, что разлом Цинчуань был активен в раннем и среднем плейстоцене. Хотя в рельефе и выражено линейное распределение гребней, разлом не активен в позднечетвертичное время. Разлом Вэньчуань-Маовэнь расположен между палеозойскими отложениями и гранитами тектонической фазы Циньнин (комплекс Пэнгуань) и имеет северо-восточное простирание (40°). Наклон разлома увеличен вблизи поверхности. Разлом характеризуется взбросо-сдвиговой кинематикой. С позднего плейстоцена скорость правого сдвига этого разлома составила 0,8–1,4 мм/год, в голоцене скорость надвига составляла 0,5 мм/год [Ma et al., 2005].

Центральные разломы Лунмэньшаньской системы включают в себя разлом Яньцин-Вулун в южной части, разлом Бэйчуань-Инсю в центральной и разлом Бэйчуань-Линьаньсы в северной.

Разломы Бэйчуань-Инсю развиты в основном между палеозойско-мезозойскими отложениями и гранитами Циньнин (комплекс Пэнгуань), их длина составляет 300 км, простирание северо-восточное (35–45°), падение северо-западное, состоят из нескольких вторичных разломов, образуя дислоцированную структуру. Протерозойский комплекс Пэнгуань и верхнепалеозойские отложения вплоть до средне-нижнетриасовых надвигались в юго-восточном направлении. Эти разломы представляют собой надвиг со сдвиговой составляющей. Они были активны в голоцене, они также с плейстоцена воздымаются со скоростью 0,6–1 мм/год и горизонтальной скоростью правого сдвига 1 мм/год [Deng et al., 1994; Ma et al., 2005; Li et al., 2006]. С этими разломами много раз были связаны средние и сильные землетрясения, среди которых самое сильное землетрясение с М 6,2 произошло в 1958 г. около г. Бэйчуань.



Рис. 3. Положение зоны разломов Лунмэньшань и эпицентров сильных землетрясений с $M \geq 6,0$, зарегистрированных в окрестностях Вэньчуаньского землетрясения и в восточной части Баянькалаского блока за 400 лет, по [Wen et al., 2009] с дополнениями авторов

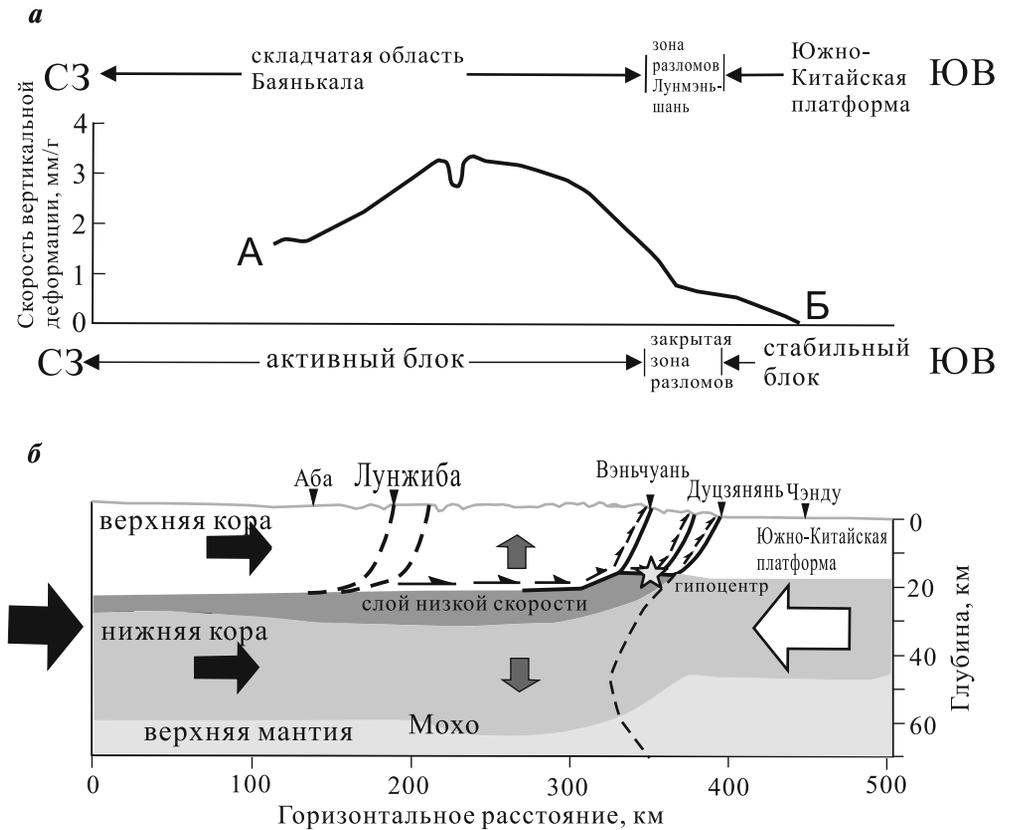
Звездочка — эпицентры Вэньчуаньского землетрясения 2008 г. с $M_s=8,0$, Яньского землетрясения 2013 г. с $M_s=7,0$ и Кандинского землетрясения 2014 г. с $M_s=6,3$; 1 — взбросы; 2 — сдвиги; 3 — четвертичный передовой прогиб; 4 — эпицентральные области исторических событий; 5 — предполагаемые эпицентральные области исторических событий; 6 — эпицентр землетрясений; F_1 — тыловые разломы: F_{1-1} — разлом Гэнда-Лундун; F_{1-2} — разлом Вэньчуань-Маовэнь; F_{1-3} — разлом Цинчуань; F_2 — центральные разломы: F_{2-1} — разлом Яньшин-Вулун; F_{2-2} — разлом Бэйчуань-Инсю; F_{2-3} — разлом Бэйчуань-Линьяньсы; F_3 — предгорные разломы: F_{3-1} — разлом Дачуань-Шуаньши; F_{3-2} — разлом Гуаньсянь-Аньсянь; F_{3-3} — разлом Цзянью; F_4 — предгорные скрытые разломы; F_5 — разлом Хуя; F_6 — разлом Миньцзян; F_7 — разлом Сяньшуйхэ

Разломы Бэйчуань-Линьяньсы имеют северо-восточное простирание (40°) с северо-западным падением, развиты в ордовикских, силурийских и девонских отложениях. Зоны разрывов шириной около 100 км состоят из милонита, глин и линз других пород. Эти разломы относятся к зонам с активностью в среднем плейстоцене [Li et al., 2004]. Вдоль них не происходило разрушительных событий в историческое время, и сейсмическая активность также очень слабая.

Предгорные разломы Лунмэньшаньской системы включают в себя разлом Дачуань-Шуаньши в южной части, разлом Гуаньсянь-Аньсянь в центральной части, разлом Цзянью в северной. Эти разломы имеют северо-восточное

простирание ($35-45^\circ$) с падением на северо-запад (углы падения $50-70^\circ$). Разлом Цзянью-Гуанюань развит в кембрийских и силурийских отложениях, перекрыт позднеплейстоценовыми и голоценовыми толщами, что свидетельствует о том, что он был активен до четвертичного периода [Li et al., 2004]. Вдоль разломов не происходило землетрясений с магнитудой более 4 и частота активности слабых событий невелика. Разлом Гуаньсянь-Аньсянь выражен в рельефе в виде уступа, грабенных долин рек, связанных с разрывами, разномасштабных подпруженных озер и других форм рельефа. Эти разломы контролировали развитие четвертичной впадины Чэнду, что указывает на относительно сильную

Рис. 4. Модель зарождения Вэньчуаньского землетрясения через промежуточный участок зоны разломов Лунмэньшань: *a* — скорость вертикальной деформации; *б* — глубинная структура и геодинамическая модель. Звездочка — гипоцентр Вэньчуаньского землетрясения ($M_s=8,0$)



тектоническую активность с позднего плейстоцена [Deng et al., 1994].

В 2005 г. вдоль разлома выявлена траншея, относящаяся к двум палеосейсмическим событиям. Время самого последнего из них по данным датирования радиоуглеродным методом произошло $3,83 \pm 0,22 - 1,17 \pm 0,10$ тыс. лет назад.

Предгорные скрытые разломы развиты под поверхностью в предгорной части горной системы Лунмэньшань и на северо-западной окраине равнины Чэнду, они состоят из вторичных разрывных структур с северо-восточным простиранием. На равнине Чэнду это разломы Даи, Мянчжу и др.

Глубинная геодинамика горной системы Лунмэньшань. Зона разломов Лунмэньшань служит границей блоков. На северо-западном крыле мощность земной коры составляет 52 км, здесь присутствуют система сложных складок вблизи поверхности и высокоскоростные структуры на глубине 14–20 км. В более низких частях коры (на глубине 26–38 км) среда ослаблена, достаточно деформируема и может служить зоной срыва. На юго-восточном крыле, под Сычуаньской синеклизой, где земная кора обладает относительно простой трехслойной структурой, граница Мохо на глубине 46 км наклонена на запад, здесь на глубине не обнаружен низкоскоростной слой, что свидетельствует об относительно жестком субстрате. Такая структурная картина, а именно низкие значения скорости сейсмических волн в северо-западном крыле и высокие — в юго-восточном сохраняются до глубины 100–150 км

[Ma, 2009]. В тектоническом отношении северо-западное крыло разлома соответствует складчатой области Сунпань-Ганьцзы в северо-западной части Цинхай-Тибетского нагорья, а юго-восточное крыло находится в пределах Южно-Китайской платформы (рис. 4). Эта зона разломов состоит из серии надвигов, осложненных складками. Вблизи эпицентров землетрясения в висячем крыле породы представлены метаморфическими комплексами Пэнгуань и Баосин протерозойского и палеозойского возраста, а в лежачем крыле появляются осадочные триасовые отложения.

Геологическое строение Сычуаньской синеклизы. Горная система Лунмэньшань расположена на западной границе Южно-Китайской (Янцзы) платформы, находящейся в южной части Китая и отделенной от оси Китайско-Корейской древней платформы раннекиммерийским (средний триас–ранняя юра) или индосинийским орогенным поясом Циньлинь [Хаин, 2001] (рис. 1). К центральной части древней платформы Янцзы приурочена крупная Сычуаньская синеклиза. Она включает в себя центральную и восточную области провинции Сычуань, а также г. Чунцин.

Сычуаньская синеклиза имеет сложное строение и выполнена отложениями от палеозойских до кайнозойских общей мощностью от 6 до 12 км. В позднем триасе море окончательно покинуло область платформы, осадконакопление продолжалось в континентальных условиях лишь в ее северо-западной части — в Сычуаньской синеклизе. Верхнетриасовые–антропогеновые толщи

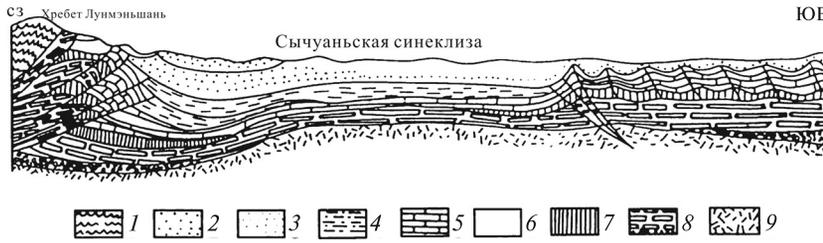


Рис. 5. Тектонический профиль через Сычуаньскую синеклизу [Хаин, 2001]: 1 — метаморфиты; 2 — мел; 3 — юра; 4 — верхний триас; 5 — средний триас-пермь; 6 — карбон-девон; 7 — силур; 8 — ордовик-синий (верхи верхнего рифея-венд); 9 — досиний

континентальных отложений имеют мощность 1,5–3 км (верхний триас). Обломочные породы Сычуаньской синеклизы включают конгломераты, а также угольные толщи общей мощностью несколько тысяч метров, сформировавшиеся в конце позднего триаса. Учитывая, что в краевой части синеклизы толщи несогласно перекрываются ниже-среднеюрскими отложениями, можно предположить, что молассы формировались с конца позднего триаса до юры, в результате чего образовался передовой прогиб перед складчатой областью Сунпань-Ганьцзы.

Отложения позднего мезозоя—эоцена имеют мощность 3,4 км, представлены несколькими молассовых толщами. Складки и надвиговые структуры кайнозойского возраста сформировались в передовом прогибе в связи со сжатием, ориентированным с северо-запада на юго-восток. Они связаны с боковой экстррузией корового материала от восточной части Тибетского нагорья. Фундамент Сычуаньского передового прогиба состоит из позднепротерозойских гранитов и делленитов, их возраст совпадает с возрастом кристаллического комплекса Лунмэньшаньской зоны.

Сычуаньская синеклиза с запада ограничена мощным поднятием хр. Лунмэньшань с почти отвесным восточным склоном. Докембрийские и палеозойские отложения Лунмэньшаня надвинуты на Сычуаньскую впадину по системе надвигов, образуют сложную складчато-покровную структуру, которая сформировалась в раннекиммерийскую фазу складчатости — в среднем триасе и ранней юре, в результате чего синеклиза приобрела асимметричный широтный профиль с крутым западным и пологим восточным склонами (рис. 5) [Хаин, 2001].

Неотектоника горной системы Лунмэньшань.

В районе преобладают в основном поднятие на западе и опускание на востоке. Тектоническая зона Лунмэньшань представляет собой складчато-надвиговые структуры северо-восточного простирания. С запада на восток прослеживается ряд взбросов и надвиговых систем, главные из которых — Вэньчуань-Маовэнь, Бэйчуань-Инсю и Гуаньсянь-Цзянюй. С начала четвертичного периода кинематически зона разломов Лунмэньшань представляет собой надвиг с правосдвиговой составляющей, однако в пространстве она имеет явное сегментное строение — главные тектонические деформации зоны сосредоточены в тыловых, центральных, предгорных и предгорных скрытых

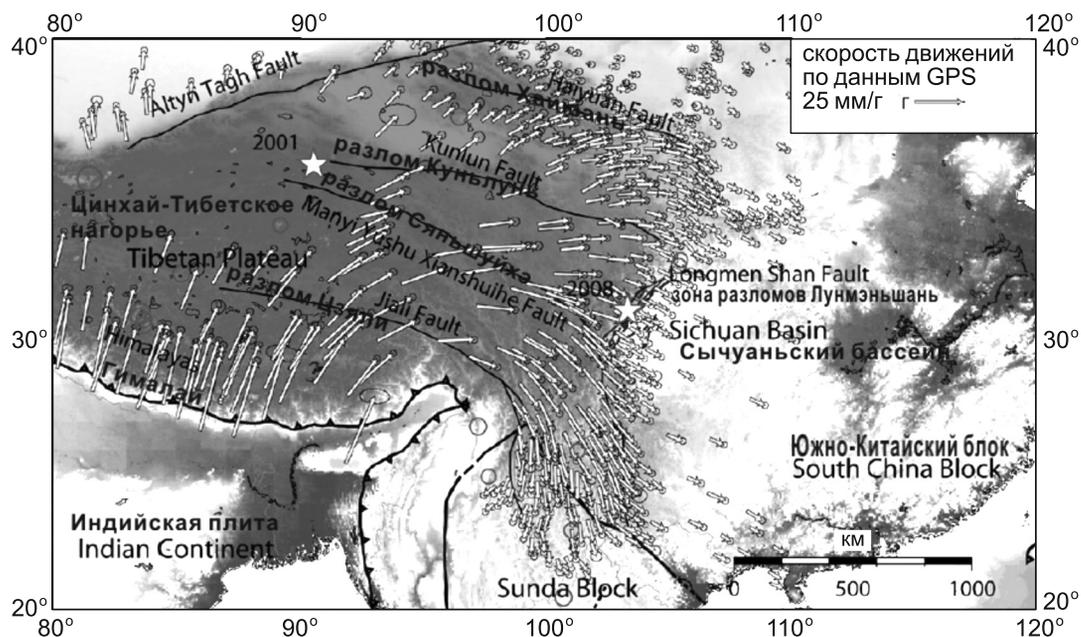
разломах и образуют фронтальный чешуйчатый веер [Deng et al., 1994].

В центральной и юго-западной частях тектонической зоны Лунмэньшань разломы Вэньчуань-Маовэнь, Бэйчуань-Инсю, Гуаньсянь-Аньсянь и скрытые предгорные разломы Лунмэньшань представляют собой взбросо-надвиги с правым сдвигом и характеризуются относительно очевидными геоморфологическими доказательствами позднечетвертичной активности [Deng et al., 1994; Yang et al., 1999; Li et al., 2006b]. По новейшим данным в южной части зоны только разлом Гуаньсянь-Аньсянь проявлял активность с голоцена, а в центральной и тыловой частях активность этих разломов проявлялась с позднего плейстоцена [Yang et al., 1999]. В центральной части зоны у разломов Вэньчуань-Маовэнь, Бэйчуань-Инсю и Гуаньсянь-Аньсянь в течение голоцена активность проявилась в деформациях ландшафта [Ma et al., 2005]. Эти разломы представлены надвигом с элементами правого сдвига. Вертикальная скорость деформации ≤ 1 мм/год, а скорость скольжения может достигать 1–10 мм/год [Ma et al., 2005; Li et al., 2006]. По данным GPS скорость деформации разлома Лунмэньшань до землетрясения была очень мала (скорость горизонтального сжатия ≤ 3 мм/год) [Shen et al., 2005]. Северная часть разлома Лунмэньшань, который расположен на север от г. Бэйчуань, включает разломы Цинчуань, Бэньчуань-Линьяньсы и Цзяню-Гуанюань. Их активность на поверхности не проявлена с конца плейстоцена [Li et al., 2004].

По данным исторических сейсмических записей (с 638 г. н.э.) на восточном краю Цинхай-Тибетского нагорья произошло 66 землетрясений с $M_s \geq 4,7$ и 57 землетрясений с $M_s \geq 5$. Эти разрушительные землетрясения сосредоточены в южной части тектонической зоны Лунмэньшань и блока Миньшань, а в северной части тектонического пояса Лунмэньшань разрушительные землетрясения не зарегистрированы (рис. 3).

В средней и южной частях тектонической зоны Лунмэньшань в 1657 г. в уезде Вэньчуань провинции Сычуань произошло землетрясение с магнитудой 6,5, в 1958 г. — в уезде Бэйчуань с $M=6,2$ и в 1970 г. в уезде Даи — с $M=6,2$ (рис. 3). Магнитуда этих трех землетрясений была выше 6,0, кроме того, еще было 19 землетрясений с $M=4,7-5,9$. Кроме того, небольшие землетрясения с $M=2,0-4,6$ распределены вдоль южной части тектонического пояса Лунмэньшань, они

Рис. 6. Тектоническая обстановка в районе Сычуаньской зоны с сейсмичностью в 1999 г. и скорость горизонтальных движений по данным GPS-наблюдений. Круги указывают эпицентры землетрясений с $M > 6,0$. Звездочки — эпицентры Вэньчуаньского землетрясения 2008 г. и Куньлуньского землетрясения 2001 г., по [Manabu et al., 2010] с дополнениями авторов



образуют небольшую сейсмоактивную полосу северо-восточного простирания. В северной части тектонического пояса Лунмэньшань сейсмическая активность наблюдается относительно редко.

На рис. 3 показаны исторические сильные землетрясения, зарегистрированные в горной системе Лунмэньшань до Вэньчуаньского землетрясения 2008 г. В районе Вэньчуаньского землетрясения существует серия активных разломов, но в историческое время сильные землетрясения не происходили вдоль разлома Лунмэньшань, а были связаны с другими разломами меридиональной сейсмогенной зоны. До 2008 г. в северном и центральном сегментах землетрясения с $M \geq 7$ не происходили по крайней мере 1700 лет, а в южном сегменте — около 1100 лет. Таким образом, Вэньчуаньское землетрясение 2008 г. относится к области, в которой землетрясений с $M \geq 7$ не было 1700 лет [Wen et al., 2009].

Механизм очага исторических землетрясений в тектонической зоне Лунмэньшань в основном характеризуется горизонтальным сжатием в направлении северо-запад–северо-северо-запад, основная ось сжатия почти горизонтальна, как и ось растяжения. Установлено, что тектонические деформации в тектонической зоне Лунмэньшань выражены в виде надвига с правосторонней составляющей, погружающийся на северо-запад под Синийские горы [Li et al., 2006].

Данные GPS-наблюдений показывают, что пояс Лунмэньшань связан с тектоническими движениями, ориентированными на восток, в которых есть сдвиговая составляющая, но скорость деформации не достоверна. В результате изучения горизонтальных деформаций поверхности методом GPS установлено, что перед землетрясением в период 1999–2007 гг. очаговая область характеризовалась аномально низкими значениями скорости

движения (рис. 6). По-видимому, это было связано с накоплением напряжений в земной коре. Накануне главного толчка китайскими специалистами зафиксированы ионосферные и магнитные аномалии, которые можно считать краткосрочными предвестниками землетрясения [Li et al., 2009a].

Основные параметры и механизм главного толчка Вэньчуаньского землетрясения. Координаты эпицентра Вэньчуаньского землетрясения $30,95^\circ$ с.ш., $103,40^\circ$ в.д. в горной местности провинции Сычуань, в юго-восточной части округа Вэньчуань. Глубина очага главного толчка по разным данным варьирует от 12 до 19 км, а его магнитуда $M_w=7.9$ [Global..., 2008] и $M_s=8.0$ [CENC, 2008] (рис. 1). Его очаг расположен в центральной части зоны активных разломов (взбросо-сдвигов) Лунмэньшань. Решение механизма очага землетрясения показано на рис. 1 [Global..., 2008]. Землетрясение возникло под действием преобладающих по величине сжимающих напряжений, ориентированных на восток–юго-восток. Одна нодальная плоскость (NP1) — пологая ($DP=33^\circ$) северо-восточного простирания, другая (NP2) — крутая залегания ($DP=70^\circ$) с близмеридиональным простиранием. Движение по пологой плоскости — правосторонний сдвиг с компонентами взброса, по крутопадающей плоскости — взброс с компонентами левостороннего сдвига.

При главном толчке Вэньчуаньского землетрясения 2008 г. на поверхности возникла система первичных сейсмодислокаций — сейсморазрывов общей протяженностью около 240 км в пределах Лунмэньшаньской системы разломов северо-восточного простирания. В сейсморазрывах выделяются две наиболее протяженные субпараллельные ветви: северо-западная длиной 240 км вдоль разлома Инсю-Бэйчуань и юго-восточная — 70 км по разлому Гуансянь-Аньсянь. Расстояние между

ними составляет 5–11 км. Возникли также дополнительные не столь протяженные разрывы, как северо-восточного, так и поперечного северо-западного простирания (рис. 1) [Рогожин, 2010]. Например, сейсморазрывы Сяюйдон длиной 7 км с простиранием северо-запад (340°) имеют деформацию взброса с левым сдвигом [Chen et al., 2013]. На основе результатов макросейсмического обследования интенсивность сотрясений Вэньчуаньского землетрясения оценивается в 11 баллов по китайской макросейсмической школе [Fu et al., 2009]. Существенно, что эти максимальные воздействия в виде узкой полосы следуют вдоль зоны сейсморазрывов, где разрушительные явления связаны в основном не с сотрясениями, а с широким проявлением геологических процессов: сейсморазрывов, оползней, обвалов. Максимальная интенсивность сотрясений проявилась в селениях Инсюй, Чэньцзяба и других в уезде Бэйчуань.

Заключение. На основании исследования геологического строения, неотектонических и сеймотектонических характеристик, а также данных GPS наиболее сильного землетрясения 2008 г. в инструментально зарегистрированных сейсмически активных зонах Лунмэньшань можно сделать ряд выводов.

Эпицентральная область землетрясения находится на границе Синийских гор Тибета и Сычуаньской впадины, его очаг — в центральной части зоны активных разломов (взбросо-сдвигов) Лунмэньшань. Эта зона разломов расположена на границе высокогорной складчатой области Сунпань-Ганьцзы Цинхай-Тибетского нагорья, сложенной триасовыми образованиями, и стабильной Сычуаньской синеклизой Южно-Китайской платформы. В эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения реконструировано горизонтальное сжатие земной коры, связанное с надвигами и

формированием складок, которое началось с позднего триаса в эпоху раннекиммерийской складчатости. Докембрийские и палеозойские отложения Лунмэньшаня надвинуты на Сычуаньскую впадину по ряду надвигов и образуют сложную складчато-покровную структуру.

На основе анализа проявлений новейшей тектоники и исторических записей тектонических событий в этом районе считается, что зона разрывов Лунмэньшань сейсмоопасна, 3 главных разлома в ее пределах способны вызвать землетрясения с магнитудой около 7, из них разлом Бэйчуань-Инсю — главная сейсмогенерирующая структура. Период повторяемости сильнейших землетрясений составляет как минимум около 1000 лет. Таким образом, тектоническая зона Лунмэньшань и система ее разрывов относятся не только к зоне низкочастотной сейсмической активности, но и представляет собой сейсмогенерирующую структуру с возможностью мощных землетрясений в этом районе. Система сейсморазрывов при Вэньчуаньском землетрясении продемонстрировала проводимые смещения в комбинации со взбросовыми с амплитудой смещений в несколько метров (до 9 м по вертикали и до 4,7 — по горизонтали).

Сеймотектоническая модель возникновения Вэньчуаньского землетрясения состоит в том, что Лунмэньшаньская зона разломов служит границей блоков, в пределах которых структура литосферы различна. Такая структурная картина, а именно низкие значения скорости сейсмических волн под северо-западным крылом зоны разломов и высокие — под юго-восточным, сохраняется до глубины 100–150 км. Таким образом, Лунмэньшаньская зона представляет собой результат надвигания восточной части Тибетского нагорья на Сычуаньскую синеклизу, что вызвало поднятие Лунмэньшаньской зоны почти на 4 км, чем обусловлены постоянные землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ма Цзинь. Вэньчуаньское землетрясение в мае 2008 г. в Китае // Природа. 2009. № 5 (1125). С. 39–47.

Рогожин Е.А., Шен К. Сеймотектонические и макросейсмические особенности Венчуанского землетрясения 12 мая 2008 г. ($M_s=8.0$) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37, № 2. С. 5–19.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 604 с.

Avouac J.P., Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia // Geophys. Res. Lett. 1993. Vol. 20, N 10. P. 895–898.

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. Vol. 584. P. 91–101.

CENC, 2008. China Earthquake Networks Center. Rupture Process of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan Earthquake. URL: <http://www.cenc.ac.cn> (accessed: 13.01.2010).

Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin et al. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions // Seismology and Geology. 1994. Vol. 16, N 4. P. 389–403.

England P.C., Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet // Nature. 1990. Vol. 344, N 6262. P. 140–142.

Fu Bihong, Wang Ping, Kong Ping et al. Atlas of seismological and geological disasters associated with the 12 May 2008, M_s 8.0 Wenchuan great earthquake, Sichuan, China. Beijing: Seismological Press, 2009. 127 p.

Global CMT Catalog, 200805120628A Sichuan, China. Harvard University, 2008. URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (accessed: 03.02.2010).

Li Chuanyou, Song Fangmin, Ran Yongkang. Late Quaternary activity and age constraint of the northern Longmenshan fault zone // Seismology and Geology. 2004. Vol. 26, N 2. P. 248–258.

- Li Jianiong, Meng Guojie, Wang Min* et al. Investigation of ionospheric TEC changes related to the 2008 Wenchuan earthquake based on statistical analysis and signal detection // *Earthquake Sci.* 2009a. Vol. 2, N 5. P. 545–554.
- Li Y., Huang R.Q., Zhou R.J.* et al. Geological background of Longmen shan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake // *J. Engineering Geology.* 2009b. Vol. 17, N 1. P. 3–16.
- Li Yong, Zhou Rongjun, Densmone A.L., Ellis M.A.* Geomorphic evident for the late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau // *Quaternary Sci.* 2006. Vol. 26, N 1. P. 40–51.
- Ma Baoqi, Su Gang, Hou Zhihua* et al. Late Quaternary slip rate in the central part of the Longmenshan fault zone from terrace deformation along the Minjiang river // *Seismology and Geology.* 2005. Vol. 27, N 2. P. 234–242.
- Manabu Hashimoto, Mari Enomoto, Yo Fukushima.* Coseismic Deformation from the 2008 Wenchuan, China, Earthquake Derived from ALOS/PALSAR Images // *Tectonophysics.* 2010. Vol. 491. P. 59–71.
- Shen Z., Lu J., Wang M., Bergmann R.* Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. P. 1–17.
- Wen X.Z., Zhang P.Z., Du F.* et al. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 Ms 8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake // *Chinese J. Geophys.* 2009. Vol. 52, N 2. P. 444–452.
- Yang Xiaoping, Jiang Pu, Song Fengmin* et al. The evidence of the south Longmenshan fault zones cutting late quaternary stratum // *Seismology and Geology.* 1999. Vol. 21, N 4. P. 341–345.
- Yin An.* A special issue on the great 12 May 2008 Wenchuan earthquake (Mw 7.9): Observations and unanswered questions // *Tectonophysics.* 2010. Vol. 491. P. 1–9.

Поступила в редакцию
25.05.2016