

УДК 551.21.3

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И СЕЙСМОТЕКТОНИКА ЗАПАДНОГО СЫЧУАНЯ, КИТАЙ¹

© 2021 г. Ю. Л. Ребецкий¹, *, Ya. Guo², K. Wang², P. C. Алексеев¹, А. В. Маринин¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
д. 10, Б. Грузинская, 123242 Москва, Россия

²Institute of Geology, China Earthquake Administration (CEA), Yard No.1, Hua Yan Li,
Chaoyang District, 100029 Beijing, China

*e-mail: reb@ifz.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 11.06.2021 г.

После повторной доработки 11.10.2021 г.

Принята к публикации 02.11.2021 г.

В работе представлены результаты применения технологии тектонофизического районирования опасных разломов, развиваемой в Институте физики Земли на основе данных о природных напряжениях. Источником этих данных служат каталоги фокальных механизмов землетрясений, а инверсия из них напряжений получена методом катакластического анализа разрывных смещений. Для исследуемого региона, в который входят крупнейшие провинции Китая – Сычуань и Юньнань, реконструкция напряжений выполнялась на основе регионального каталога механизмов очагов землетрясений с $M_w = 2.0–6.0$ для периода времени 1999–2012 гг. Возможность прогноза состояния разломов опирается на данные о нормированных значениях шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. В работе представлены два варианта районирования разлома, являющихся результатом применения критериев Друккера–Прагера и Кулона–Мора, характеризующих соответственно упругопластическое и хрупкое поведение коры. Показано, что второй подход позволяет дать более качественную и детальную информацию о состоянии вдоль активных разломов региона Западный Сычуань. Анализ состояния системы разломов Лунмэньшаня перед Веньчуаньским землетрясением, произошедшем в 12.05.2008 году, показал, что опасным следует рассматривать распределение кулоновых напряжений вдоль разлома, имеющих не менее 70% протяженности с высоким уровнем кулоновых напряжений (>60% от критических). По результатам выполненного тектонофизического районирования выявлены более 20 участков активных разломов исследуемого региона протяженностью от 60 до 140 км, которые нами рассматриваются как возможные очаги сильных землетрясений магнитудой ≥ 7.0 .

Ключевые слова: разрывы, кора, напряжения, землетрясения, фокальные механизмы, опасные разломы, кулоновы напряжения

DOI: 10.31857/S0016853X21060072

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные подходы к оценке сейсмической опасности опираются на методы сейсмологии и сейсмотектоники. Указанные методы включают в себя поиск зон, для которых за длительный период времени наблюдается несколько сильных землетрясений (сотни и тысячи лет) или повышенная сейсмическая активность. Если в таких зонах наступает момент, когда период возникновения сильных землетрясений затягивается или в сейсмически активном районе возникает участок затишья, то данные зоны могут быть выделены

как зоны, потенциально опасные для формирования сильного землетрясения. Широко известен успешный прогноз, который был сделан для землетрясения ($M = 7.3$), произошедшего в окрестностях г. Хайченг (провинция Ляонин, Китай) 4 февраля 1975 г. [11]. Но вслед за ним последовало катастрофическое Таншаньское землетрясение ($M = 8.2$), произошедшее в г. Таншане (Хэбэй, Китай) 28 июля 1976 г., и не проявившееся в целом ряде предвестников (форшоки и пр.), за которыми осуществлялся инструментальный мониторинг [11].

Выполняются постоянные наблюдения за регионом Канто (Япония) вблизи г. Токио и г. Иокогама, где 1 сентября 1923 г. произошло разрушительное землетрясение ($M = 8.3$). В этом ре-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016853X21060072 для авторизованных пользователей.

гионе, вплоть до землетрясения ($M = 7.3$) в г. Кобе (Япония), произошедшего 17 января 1995 года, — очаг землетрясения был расположен под островом Авадзи на глубине 15–20 км и был связан с тектоническим разломом, проходящим в проливе Акаси в Японском море, — были сосредоточены основные сейсмотектонические исследования и создана одна из наиболее плотных сетей сейсмических и GPS станций с расстоянием между станциями 50–100 км. Однако и эта сеть не позволила дать прогноз сильного землетрясения ($M = 8.3$) Токачи-Оки, произошедшего 26 сентября 2003 г. к юго-востоку от побережья о. Хоккайдо — очаг землетрясения был расположен на глубине ~27 км.

Прогноз Великого Японского землетрясения ($M = 9.0$), произошедшего 11 марта 2011 г. — эпицентр землетрясения располагался восточнее о. Хонсю в 130 км к востоку от г. Сендай и в 373 км к северо-востоку от г. Токио, гипоцентр максимально мощного толчка находился на глубине 32 км в Тихом океане, — который выдавался достаточно регулярно, но затем в соответствии с алгоритмом этого подхода удалялся [26, 48]. Также для этого землетрясения в работах А.А. Любушина [5, 6] был дан успешный прогноз, но затем этот же подход стал выдавать постоянную тревогу для Нанкайской зоны субдукции, расположенной к югу от о. Хонсю [31].

Начиная с 1980-го г., в США проводился эксперимент по развитию методов прогноза на оснащенном различным сейсмологическим, геофизическим и геодезическим оборудованием (сейсмометры, крипметры, тензометры и другие инструменты) Паркфилдском полигоне (шт. Калифорния, США), где с интервалом 20–25 лет происходили землетрясения с магнитудами, близкими к $M = 6$ [11]. Это был международный полигон, на котором исследователи разных стран изучали процесс подготовки землетрясения. Предполагалось, что выполняемые наблюдения позволят выявить особенности деформационного режима и сопутствующих ему физических полей в различные периоды формирования очаговой области. Землетрясение ($M = 6.0$) произошло 28 сентября 2004 г. в районе Паркфилда, когда его менее всего ожидали, и оно не сопровождалось предваряющим крипом и форшоками так, как это было при предыдущих землетрясениях в этом районе [27, 29]. Анализ данных геофизических полей, полученных перед его возникновением, также не позволил выявить значимых аномалий, которые возможно было трактовать как предвестник землетрясения. В то же время за период ожидания этого землетрясения в Калифорнии произошла серия сильных землетрясений с магнитудами большими, чем землетрясение в районе Паркфилда: Лома Приета 18.10.1989 ($M = 6.9$), Капе Мендосино 24.04.1992 ($M = 7.2$), Ландерс 28.06.1992 ($M = 7.1$), Нордридж 17.01.1994 ($M = 6.7$),

Гектор Майн 16.10.1999 ($M = 7.1$), Сан Симеон 22.12.2003 ($M = 6.5$).

Землетрясения были неожиданными и они показали, что исследования по предупреждению сейсмической опасности не имеют значимого продвижения.

В настоящей статье для юго-восточных провинций Сычуань и Юньнань (КНР) представлено развитие тектонофизических методов выделения опасных участков разломов, где имеется повышенная вероятность возникновения сильных землетрясений. Тектонофизический подход опирается, прежде всего, на данные по природным напряжениям земной коры, которые могут быть получены в результате инверсии (реконструкции) из сейсмологических данных — механизмов очагов землетрясений. Следующим источником тектонофизического районирования разломов являются геологические и геофизические данные по простираниям и углам погружения участков региональных разломов общей протяженностью не менее 50–100 км (длины превышают мощность коры) — данная длина разлома характерна для землетрясений магнитудой $M =$ от 7.5 до 8.0.

Тектонофизический подход опирается на расчет нормальных и касательных напряжений для участков разломов, сохраняющих свое простирание и погружение на длинах 5–10 км. Для этого в наших исследованиях использовались данные по природным напряжениям в ближайших к данному разлому точках реконструкции напряжений. Далее, на основе анализа кулоновых напряжений мы выделили участки разломов, находящиеся в докритическом и разных уровнях закритического состояния [9]. Сопоставление этих данных с данными по сейсмическому режиму разломов позволили разработать систему тектонофизического районирования опасных разломов. Цель проводимых нами исследований напряженного состояния провинций Сычуань и Юньнань (КНР) состоит в выделении участков разломов, для которых возможно формирование сильных землетрясений магнитудой ≥ 7.5 .

РЕГИОНАЛЬНАЯ ТЕКТОНИКА

В географическом положении обе провинции Сычуань и Юньнань составляют обширную область Западного Сычуаня.

Провинция Сычуань расположена на стыке платформенной области, которая в восточной части провинции представлена Сычуанской синеклизой в пределах Южно-Китайской (Янцзы) платформы, и подвижной складчатой областью Лунмэншань на западе провинции. На юге провинции расположена Эмейшаньская провинция с позднепермским внутриплитным магматизмом (ELIP). Провинция Юньнань также расположена

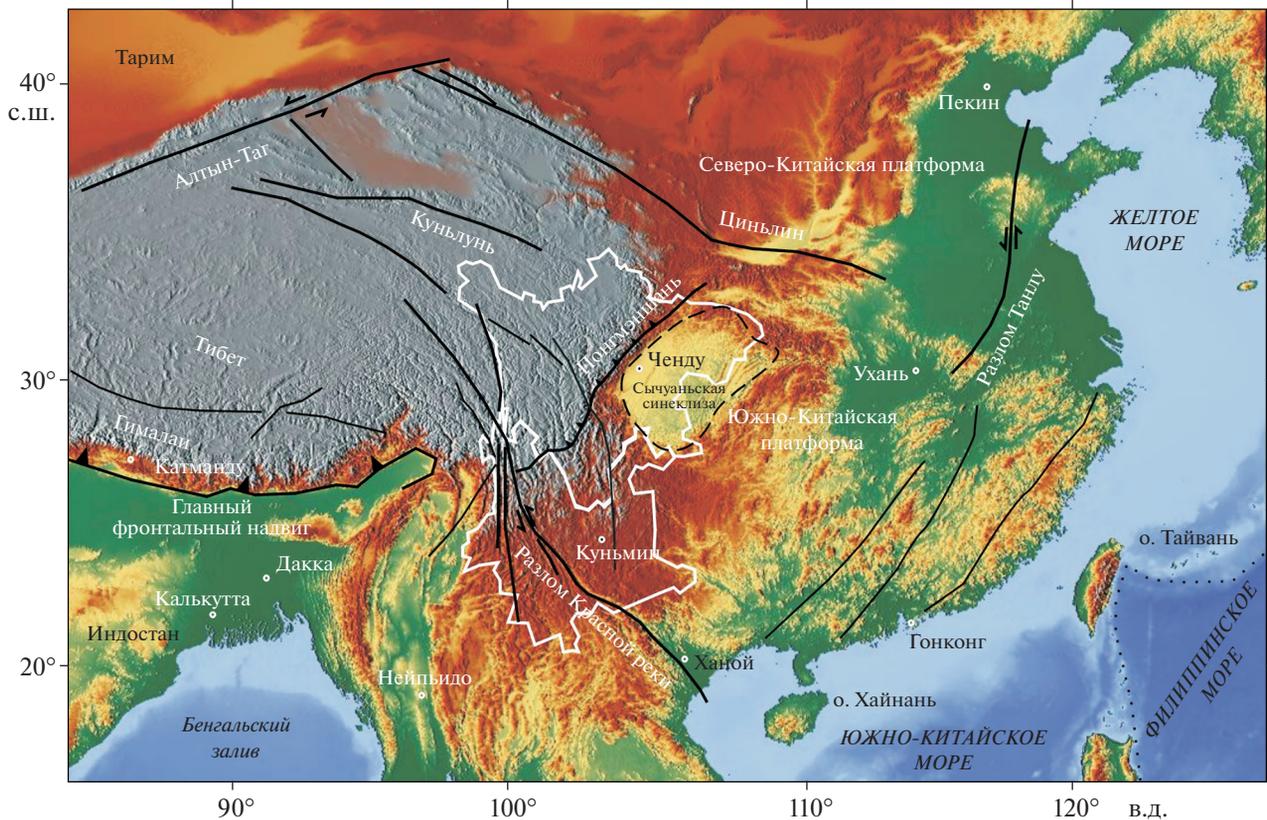


Рис. 1. Карта положения региона исследования и основных тектонических структур региона. Показаны (линия белым) провинции Сычуань и Юньнань (КНР).

на стыке крупных тектонических элементов, разделенных крупным разломом Красной реки и серией расположенных на его южном продолжении разрывов, сутурных зон и орогенов (разлом Дьен-бьенфу, разлом Айлаошань). В юго-западной части это Индосинийский/Синобирманский микроконтинент. В северо-восточной части провинции расположена Эмейшаньская провинция с позднепермским внутриплитным магматизмом (ELIP) внутри Южно-Китайской (Янцзы) платформы. Система разломов Сяньшуйхэ северо-западного простирания, разлом Лунмэньшань северо-восточного простирания и Сяоцзянский разлом субмеридионального простирания образуют в рассматриваемых провинциях узел разрывной тектоники и сгущения очагов землетрясений [30].

Южно-Китайская платформа (или платформа Янцзы) расположена к югу от орогена Циньлин, к востоку от орогена Лунмэньшань–Юньнань, к северу от Вьетлаосской складчатой системы и к северо-западу от Катазийского орогена (рис. 1). Орогены Циньлин и Лунмэньшань надвинуты (и даже шарированы) на платформу в индосинийскую эпоху. Северо-восточная часть платформы ограничена разломом Танлу. Разлом Танлу (Тан-

чен–Луцзян), который, являясь субмеридиональным левым сдвигом, смещает восточное продолжение орогена Циньлина на 500 км (к северу).

Фундамент платформы – докембрийский (архей и протерозой), преимущественно сложен породами раннепротерозойского возраста (около 2 млрд лет). Наиболее древние архейские породы с возрастом 2.9–2.8 млрд лет, а наиболее молодые протерозойские с возрастом 1 млрд лет и 800 млн лет (комплекс интрузивных гранитоидов).

В результате Индосинийского (поздний триас–ранняя юра) орогенеза западный и северный борты Сычуанского бассейна стали более крутыми, а также были перекрыты надвигами со стороны обрамляющих бассейнов структур орогенов Лунмэньшаня и Циньлина. В самом бассейне возникли вытянутые в север–северо-восточном направлении складки палеозойско–триасового чехла. Яншаньские (в середине мела) деформации усилили этот структурный рельеф. В Сычуанской синеклизе в течение юры, мела и кайнозоя накопилось более 6 км аллювиально-озерных отложений. Вместе с палеозойско-триасовыми отложениями около 6 км по мощности это опре-

делило положение фундамента на глубине порядка 12 км.

Хубэй-Гуйчжоуская синеклиза сменяет Сычуанскую синеклизу на востоке, отделяясь от последней седловиной, и выполнена она только палеозойско-триасовыми отложениями. Строение синеклиз осложнено развитием (преимущественно параллельно бортам) валов, сундучных и гребневидных антиклиналей.

Синобирманский микроконтинент и Индосининийский микроконтинент разделены Юньнань–Малайской киммерийской складчатой системой. Северная часть Синобирманского микроконтинента простирается на севере в провинцию Юньнань, а на юге достигает о. Суматра. Индосининийский микроконтинент расположен к югу от Южно-Китайской платформы.

К северо-западу от Синобирманского микроконтинента и севернее Гималаев в океане Тетис существовали два блока с докембрийской континентальной корой – Северо-Тибетский (Цзянтан, или Тангла) и Южно-Тибетский (Гандин, или Лхаса). Сейчас они разделены позднекиммерийской зоной Бангонг–Нуцзян и с середины мела образуют единый Тибетский массив, который в плиocene испытал поднятие и образовал Цинхай-Тибетское высокое плоскогорье.

Считается, что коллизия между Индийским и Евразийским континентами вызывает тектоническое течение от восточного Сицзян к юго-востоку с формированием вдоль разломов северо-западного простираения с правосдвиговой компонентой, субмеридиональными разломами с левосдвиговой компонентой, разломами и линейными структурными зонами север-восточного простираения высокосейсмичные зоны [15, 16, 23, 24, 46].

Таким образом, исследуемая территория расположена в переходной зоне между двумя типами земной коры западной и восточной части Китая. Структурное строение обуславливает выделение трех основных тектонических блоков – ромбического блока Газа (Garze), центрального, также ромбического блока Сычуань и треугольного блока Аба. В результате коллизии и субдукции Индийской и Филиппинской плит в сторону Евразийской плиты и региональных тектонических движений блоки земной коры находятся в условиях сильного горизонтального сжатия, а весь регион является высокосейсмичным, и такие разломы, как Сяньшуйхэ, Мицзянг, Мауен–Тяньцзян, Аннигхе и Цземухе вдоль границ блоков реактивированы и на них происходят сильные и частые землетрясения.

В настоящей работе при интерпретации результатов тектонофизической инверсии напряжений использовалась база данных региональных разломов, которая была предоставлена Геологи-

ческим институтом Китайской Администрации по землетрясениям (г. Пекин, Китай – Institute of Geology, China Earthquake Administration (CEA), Beijing, China) [46].

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В провинциях Юньнань и Сычуань зарегистрировано более 1480 землетрясений $M \geq 3.0$ за 2012–2019 гг. Здесь произошло 8 событий $M > 7.0$, включая исторические данные [24, 35, 36, 42, 43] (рис. 2). Землетрясения связаны с активизированными в кайнозойское и особенно в четвертичное время разломами. Изучение современного поля тектонических напряжений и фокальных механизмов землетрясений указывает главным образом на север–северо-западное направление регионального сжатия.

Тектонофизическая инверсия природных коровых напряжений двух юго-восточных провинций Китая выполнялась по данным каталога механизмов очагов землетрясений. Первым источником таких данных являлись землетрясения из базы данных Global CMT [49]. Для изучаемых провинций Сычуань и Юньнань по данным этого источника был создан каталог фокальных механизмов землетрясений, насчитывающий 161 землетрясение $M_w = 4.7–7.9$, произошедших за период от 1976 г. по начало 2018 г. [3] (рис. 3).

Кроме такого каталога фокальных механизмов на основе опубликованных данных [3] был создан еще один каталог землетрясений, состоящий из 329 событий магнитудами $M = 4.0–8.7$, произошедших в период от 1933 по 1994 гг. (рис. 4).

Еще больше данных по фокальным механизмам землетрясений для исследуемых территорий было получено на основе цифровых записей региональных сейсмических центров КНР провинций Юньнань и Сычуань. Данные по этим землетрясениям были собраны и организованы в каталог (далее – Региональный каталог) сейсмологами Института геологии Администрации по землетрясениям Китая (г. Пекин, Китай) в рамках проекта Российский фонд фундаментальных исследований–Государственный фонд естественных наук Китая (РФФИ–ГФЕН). В Региональный каталог включены данные по 1617 землетрясениям с глубинами до 50 км (средняя глубина 9.5 км) в диапазоне магнитуд $M_w = 2.5–6.0$, произошедших за период от 08.07.1999 г. по 15.01.2012 г. Показаны эпицентры землетрясений и механизмы очагов землетрясений (рис. 5). В период времени, отвечающему региональному каталогу, произошло катастрофическое по последствиям Сычуаньское (или Веньчуаньское) землетрясение 12.05.2008 г. ($M_w = 8.0$ по данным Китайской Администрации по землетрясениям и $M_w = 7.9$. Согласно данным Геологической службы США) в

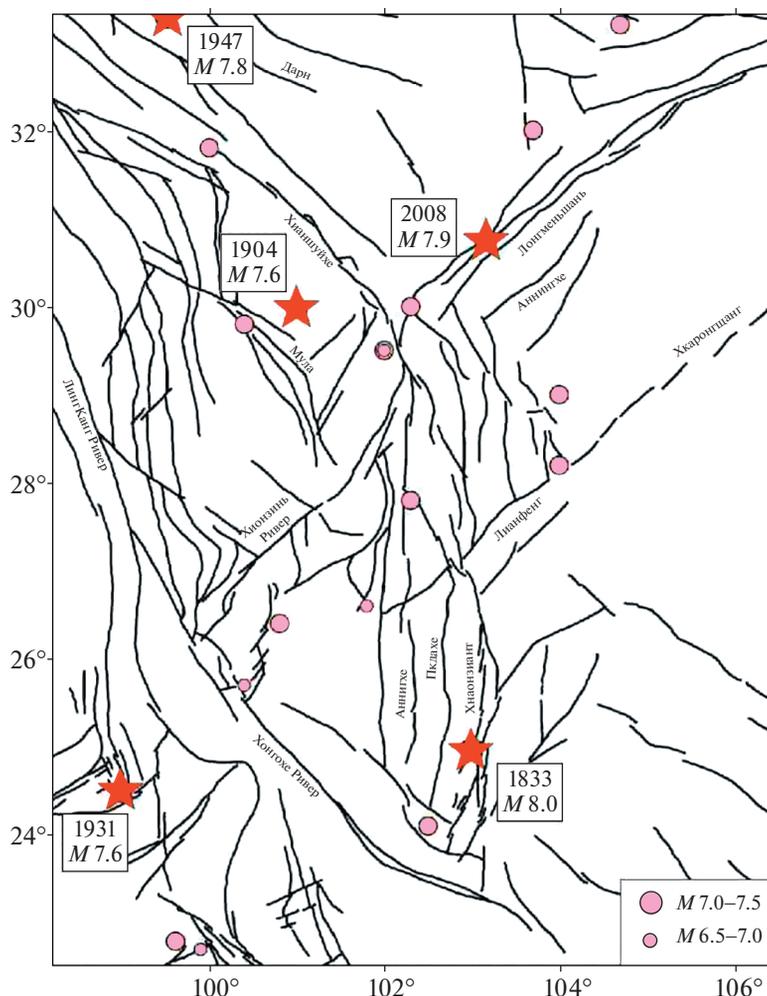


Рис. 2. Эпицентры сильнейших землетрясений региона по данным инструментальных наблюдений и историческим записям (по данным [23, 33, 34, 40, 41]). Показаны (линии черным) основные сейсмогенерирующие разломы.

китайской провинции Сычуань, эпицентр землетрясения находился в 75 км от г. Чэнду, гипоцентр – на глубине 19 км. Афтершоки этого землетрясения из Регионального каталога были удалены.

Сравнение фокальных механизмов наиболее сильных землетрясения ($M > 4$) регионального каталога с двумя другими каталогами показало хорошее его соответствие [3, 49] (см. рис. 3, рис. 4). Поскольку Региональный каталог имеет существенно большую плотность покрытия региона, то мы использовали этот каталог для выполнения инверсии коровых напряжений.

ИНВЕРСИЯ КОРОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Расчет кулоновых напряжений

При расчете напряжений по сейсмологическим данным о механизмах очагов Регионального каталога землетрясений использовалась послед-

няя модификация программы STRESSseism [51], созданная на основе алгоритма метода катакластического анализа разрывных смещений [38]. Катакластический метод начал создаваться в 1990-х годах и первоначально являлся прямым продолжением алгоритмов методов, разработанных в Институте физики Земли РАН (г. Москва, Россия) и Университете Пьера и Марии Кюри (г. Париж, Франция) [1, 2, 13, 14, 37] (Приложение 1). В методе катакластического анализа разрывных смещений так же, как в этих методах, существовали критерии формирования однородной выборки механизмов очагов землетрясений (определяющие неравенства метода). На первом этапе расчета метод позволял определять только ориентацию осей главных напряжений и форму эллипсоида напряжений. Важной особенностью катакластического метода и отличием от других методов является взаимосвязанный расчет параметров тензора напряжений и приращений тензора сеймотектонических деформаций.

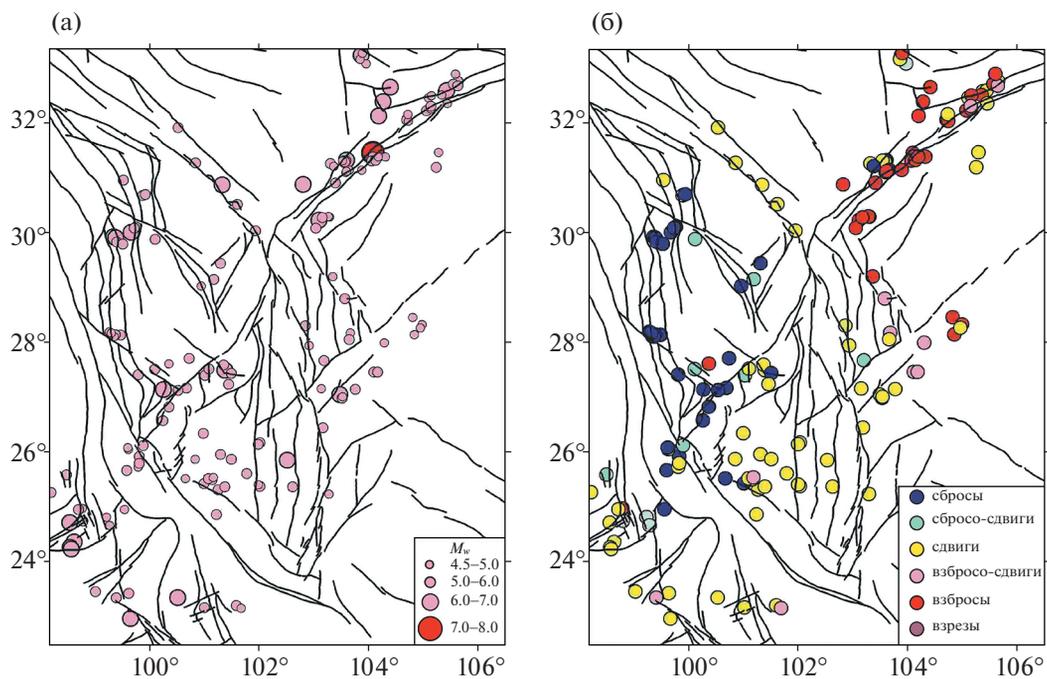


Рис. 3. Каталог фокальных механизмов землетрясений (по данным [47]).
 (а) – Распределение эпицентров очагов землетрясений; (б) – кинематические типы фокальных механизмов.

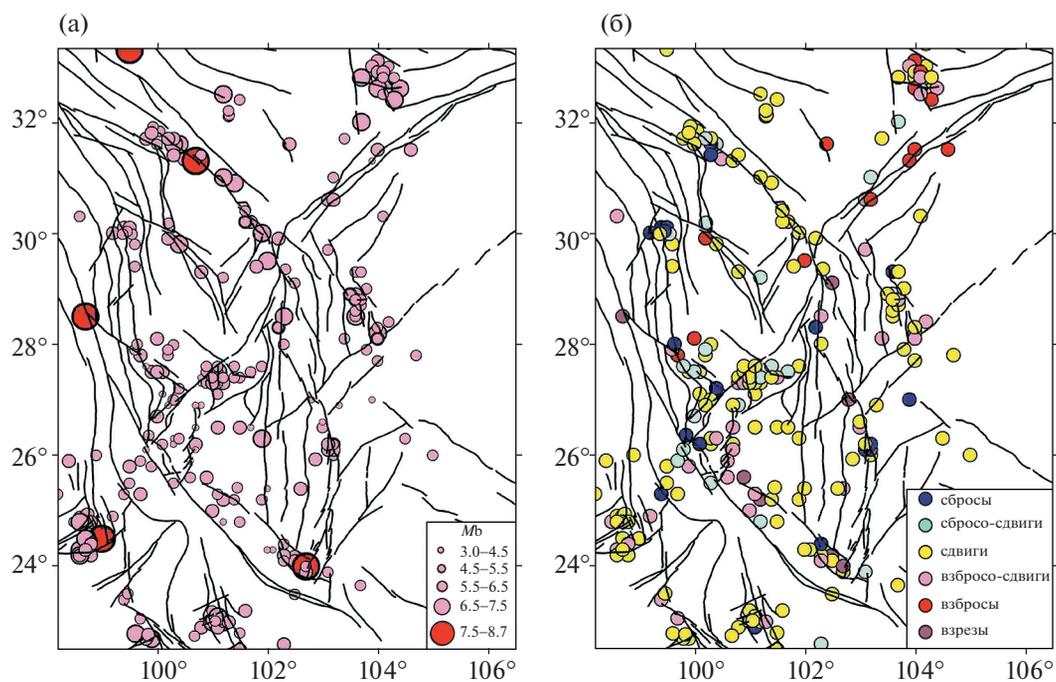


Рис. 4. Каталог фокальных механизмов землетрясений (по данным [3]).
 (а) – Распределение эпицентров очагов землетрясений; (б) – кинематические типы фокальных механизмов.

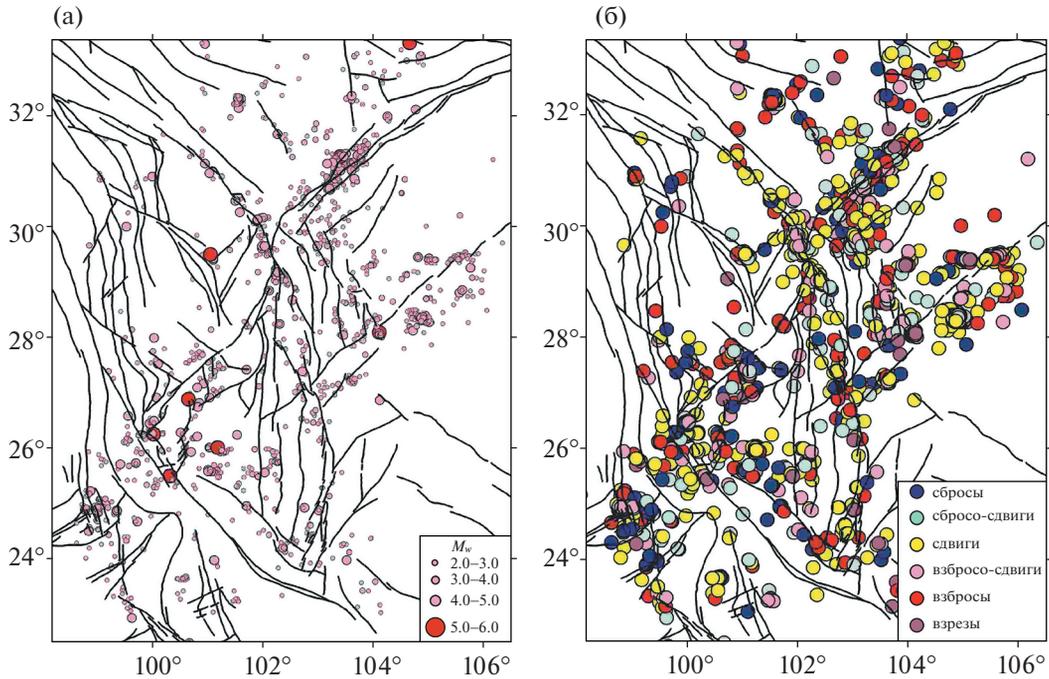


Рис. 5. Каталог фокальных механизмов землетрясений по данным региональных сейсмических центров КНР за период 1999–2012 гг. (1617 событий, $M_w = 2.0–6.0$) (Региональный каталог механизмов очагов землетрясений Западного Сычуаня [3]).

(а) – Распределение эпицентров очагов землетрясений; (б) – кинематические типы фокальных механизмов.

Определение других параметров тензора напряжений происходит на следующих этапах Катакластического метода:

второй этап – расчет относительных величин шаровой и девиаторных компонент тензора напряжений;

третий этап – расчет прочности сцепления коры в масштабе усреднения напряжений (первые десятки километров), величин максимальных касательных напряжений и эффективного давления;

четвертый этап – расчет величин тектонического давления в твердом скелете пород и флюидного давления в трещинно-поровом пространстве.

В данной работе использовались результаты только первого и второго этапов метода (третий и четвертый этапы не были включены в наше исследование), как достаточные для районирования разломов по относительному уровню кулоновых напряжений.

На втором этапе метода были определены эффективные нормальные σ_{ij}^* и касательные напряжения σ_{ij} ($i \neq j$), нормированные на прочность сцепления массивов τ_f :

$$\left\langle \frac{\sigma_{ij}^*}{\tau_f} \right\rangle = -\left\langle \frac{p^*}{\tau_f} \right\rangle + \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle \times \left[(1 - \mu_\sigma/3)l_{1i}l_{1j} + 2\mu_\sigma l_{2i}l_{2j}/3 - (1 + \mu_\sigma/3)l_{3i}l_{3j} \right], \quad (1)$$

где l_{ki} – направляющие косинусы главных напряжений (σ_k , $k = 1, 2, 3$) в топоцентрической системе координат ($i = \text{Север, Zenит, Восток}$) или системе координат, связанной с разрывом ($i = \text{полюс} - n$, простираение – s , погружение – p), а p^* и τ – соответственно эффективное изотропное давление ($p^* = p - p_{fl}$, p_{fl} – давление флюида в порах и трещинах) и максимальное касательное напряжение

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, \quad p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, \quad (2)$$

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\tau} - 1, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

Здесь и далее напряжения растяжения имеют положительные значения.

Полученные на втором этапе катакластического метода данные дают возможность рассчитать кулоновы напряжения (τ_c) на плоскости разрыва, нормированные также на τ_f :

$$0 \leq \left\langle \frac{\tau_c}{\tau_f} \right\rangle \leq 1 \text{ при } \left\langle \frac{\tau_c}{\tau_f} \right\rangle = \left\langle \frac{\tau_n}{\tau_f} \right\rangle + k_f \left\langle \frac{\sigma_{nn}^*}{\tau_f} \right\rangle, \quad (3)$$

$$\tau_n = \sqrt{\tau_s^2 + \tau_p^2},$$

где τ_n и $\sigma_{nn}^* = \sigma_{nn} - p_{fl}$ – касательные и эффективные нормальные напряжения на произвольно ориентированной плоскости с нормалью \mathbf{n} , а k_f – коэффициент трения на плоскости разрыва.

Считается, что прочность сцепления природных массивов в масштабе усреднения сотен и более метров меньше прочности малых образцов, используемых в лабораторном эксперименте, и ее требуется определить *in-situ*. В нашем случае масштаб усреднения напряжений — первые десятки километров (весь сейсмогенный слой коры) и поэтому для каждого региона прочность сцепления можно считать величиной постоянной. В этой связи рассчитанные значения $\langle \tau_c / \tau_f \rangle$ можно сопоставлять в разных участках разрыва, т.е. можно выполнить районирование разлома по уровню кулоновых напряжений.

Региональные особенности инверсии напряжений

Большой проблемой для выполнения качественной инверсии напряжений исследуемого региона является существенная неоднородность плотности распределения землетрясений, связанная с наличием 6 локальных зон очень высокого уровня сейсмического режима, участков средней плотности эпицентров очагов землетрясений, а также участков низкой плотности (см. рис. 5). Второй проблемой инверсии является повышенная вариабельность механизмов очагов землетрясений в пределах локальных участков, и особенно в областях повышенной плотности эпицентров землетрясений.

Стандартные подходы к инверсии напряжений опираются на алгоритмы усреднения по равным площадям [12, 19, 47]. В приложении таких подходов к сейсмоактивным регионам с существенно неоднородным сейсмическим режимом это приводит либо к неоправданно большому масштабу усреднения в участках высокой плотности эпицентров землетрясений, либо к невозможности получить данные о напряжениях в случае малых окон усреднения. В основу нашего исследования заложено получение как можно более детального поля напряжений исследуемого региона, позволяющего выполнить районирование активных разломов провинций по степени их опасности. Поскольку здесь существует большое число достаточно близко расположенных разломов относительно небольшой протяженности — первые сотни километров, то желательная детальность реконструируемых напряжений должна быть ~30–50 км.

В методе катакластического анализа разрывных смещений существует возможность создания алгоритма формирования однородных выборок с разным масштабом усреднения, зависящего от плотности распределения эпицентров землетрясений и однородности кинематики механизмов их очагов. С одной стороны, этот алгоритм опирается на процедуры формирования начальной выборки землетрясений в условиях последова-

тельно увеличивающегося окна усреднения. С другой стороны, в нем используется процедура формирования однородной выборки землетрясений, определяющая взаимную непротиворечивость фокальных механизмов. Эта непротиворечивость достигается требованием уменьшения упругой энергии после каждого землетрясения на искомом тензоре напряжений (главные неравенства катакластического метода).

Для реконструкции напряжений исследуемого региона задавался минимальный радиус усреднения (5 км), являющийся одновременно и шагом увеличения этого радиуса, число итераций, в ходе которых этот радиус могкратно возрастать, а также минимальное число событий в однородной выборке фокальных механизмов. Если в данном узле расчета после первой итерации с радиусом сбора землетрясений в 5 км однородная выборка с минимально необходимым числом событий не была создана, то происходило увеличение радиуса на 5 км и попытка создания однородной выборки повторялась. Размер радиуса усреднения напряжений рассчитывался в каждом случае по расстоянию от узла расчета максимально удаленного эпицентра землетрясения из однородной выборки (рис. 6). В результате применения такого алгоритма удалось выполнить инверсию напряжений в 600 узлах расчета при шаге между узлами 0.2 град., а по глубине они отвечали среднечерновым глубинам ~25 км.

Алгоритм метода катакластического анализа разрывных смещений позволяет для узлов расчета, располагающихся в зонах высокой плотности эпицентров землетрясений и имеющих в начальной выборке большое число событий (10 и более), выполнить несколько инверсий напряжений для разных временных интервалов однородной выборки. Таким образом, в результате инверсии в каждом из узлов имеются данные по одному, двум и более разновременным расчетам напряжений. Полученные в этом случае различия в напряженном состоянии в одном и том же узле в разные интервалы времени отражают среднепериодные вариации тензора напряжений. В катакластическом методе короткопериодные вариации напряженного состояния связывают с каждым землетрясением и изменением напряжений в его окрестности, им обусловленным.

В наших расчетах представлены средние за весь период наблюдений значения компонент тензора напряжений, которые получены для каждого узла на основе суммирования с учетом веса (периода времени) среднепериодных тензоров напряжений (см. рис. 6, диаграмма). Такой тензор напряжений отвечает длиннопериодным вариациям или длиннопериодному усреднению напряжений. Результаты реконструкции напряжений в виде набора среднепериодных тензоров

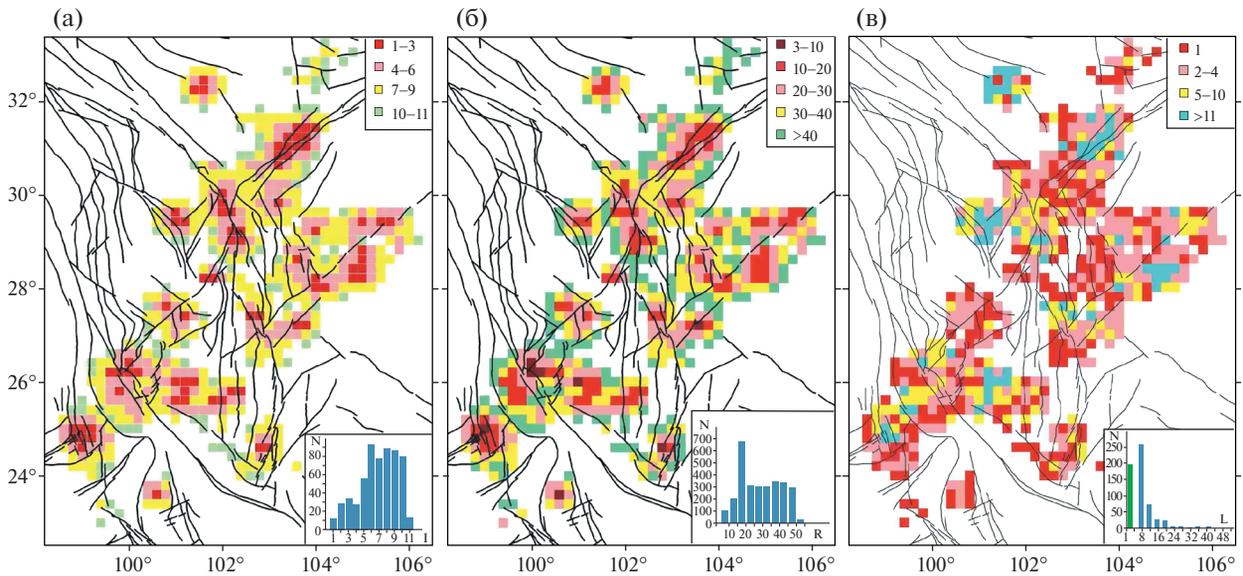


Рис. 6. Параметры, определяющие масштаб усреднения напряжений в узлах их расчета. (а) – Число итераций расчета (L), определяющее радиус области сбора данных о землетрясениях при создании начальной выборки; (б) – латеральный радиус (R) усреднения напряжений, км; (в) – число напряженных состояний (L), отвечающее среднепериодному усреднению напряжений в разные интервалы времени. Показаны (на врезке) диаграммы представительности приведенных данных.

напряжений в каждом узле расчета дают возможность выполнить мониторинг напряженно-состояния. Одним из вариантов такого мониторинга является сравнение регионального поля напряжений, относящегося к наиболее ранним значениям среднепериодных тензоров напряжений в узлах расчета, с наиболее поздним полем напряжений.

Наиболее представительны данные по напряжениям с радиусом усреднения до 15 км ~11%, до 25 км ~45%, до 35 км ~60%, более 50 км отвечает ~2% (см. рис. 6, диаграммы). Из диаграммы представительности числа определений напряжений в одном узле около 1/3 узлов имеет по одному определению. Более 10 определений в одном узле имеют ~10% всех узлов.

Оцененный по результатам инверсии масштаб усреднения напряжений для нас существенен, т.к. он определяет возможности прогноза опасных состояний разломов с точки зрения генерации землетрясений определенной магнитуды. Средний латеральный радиус усреднения напряжений составляет 20–40 км при глубинном радиусе усреднения в 25 км (см. рис. 6, диаграмма). Отсюда следует, что для исследуемого региона тектонофизическое районирование опасных разломов может позволить дать прогноз землетрясений в интервале магнитуд $M > 7.0-7.5$, размер очага которых превышает 30–60 км.

Ориентация главных напряжений и нормированные величины напряжений

Представлены результаты первых двух этапов реконструкции катакластического метода (рис. 7). Здесь напряжения отвечают средним напряжениям за весь 13-ти летний период, для которого имелись данные о механизмах очагов землетрясений в региональном каталоге.

Большая часть исследуемого региона характеризуется геодинамическим типом напряженного состояния в виде горизонтального сдвига, но здесь также имеются локальные зоны линейных размеров 50–150 км с режимом горизонтального сжатия, а также небольшие участки горизонтального растяжения. Коэффициент Лоде–Надаи изменяется во всем диапазоне своих значений (от -1 до $+1$). При этом состоянию вблизи чистого сдвига (от -0.2 до $+0.2$) отвечает 70% определений.

Как следует из картины распределения максимальных касательных напряжений, средний уровень их значений в 3–4 раза превосходит прочность сцепления горных пород и занимает площадь около 30% от всей площади, где получены результаты инверсии.

Площадь территории, где наблюдается пониженный уровень напряжений, не превышающий прочность сцепления вдвое, составляет только 10%, а площадь высокого уровня этих напряжений в шесть и более раз превышающей прочность сцепления, занимает $\leq 10\%$. Оценка величины прочности сцепления массивов горных пород

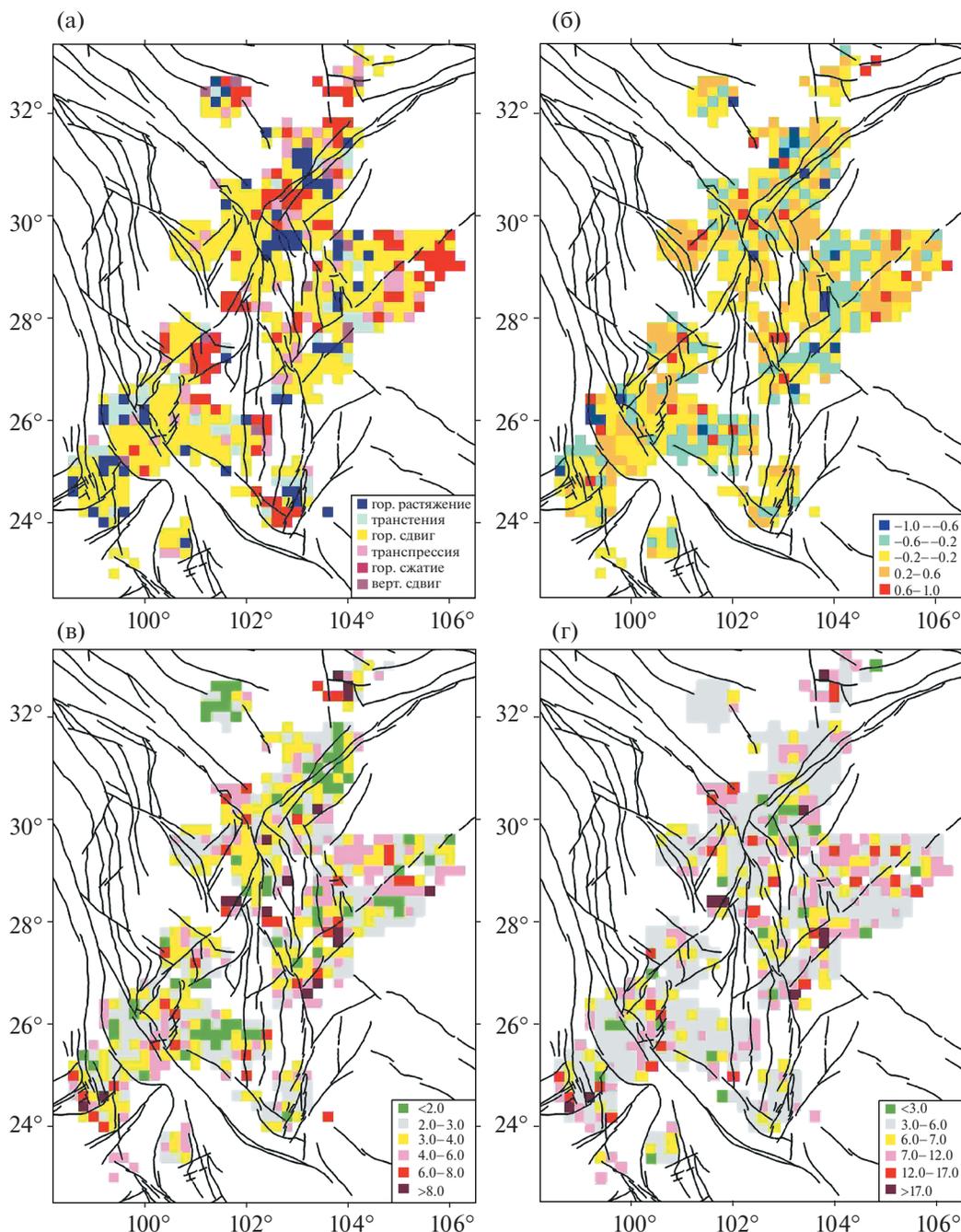


Рис. 7. Результаты расчетов 1-го и 2-го этапов катакlastического метода для длиннопериодных напряжений. (а) – Геодинамический тип напряженного состояния; (б) – коэффициент Лоде–Надаи; (в) – максимальное касательное напряжение, нормированное на прочность сцепления (τ/τ_j); (г) – эффективное давление, нормированное на прочность сцепления (p^*/τ_j).

континентальных орогенов в масштабе коры (десятки километров) в их естественном состоянии, выполненная для Алтае Саян, показывает, что его значения могут достигать 6 МПа [7].

Таким образом, среднему уровню максимальных касательных напряжений соответствует диа-

пазон значений в 20–25 МПа, а низким и высоким соответственно менее 10 МПа и более 35 МПа.

Средний уровень эффективного всестороннего давления в 6–7 раз превышает прочность сцепления, и области с таким диапазоном значений занимают площадь ~15% от всей, где получены

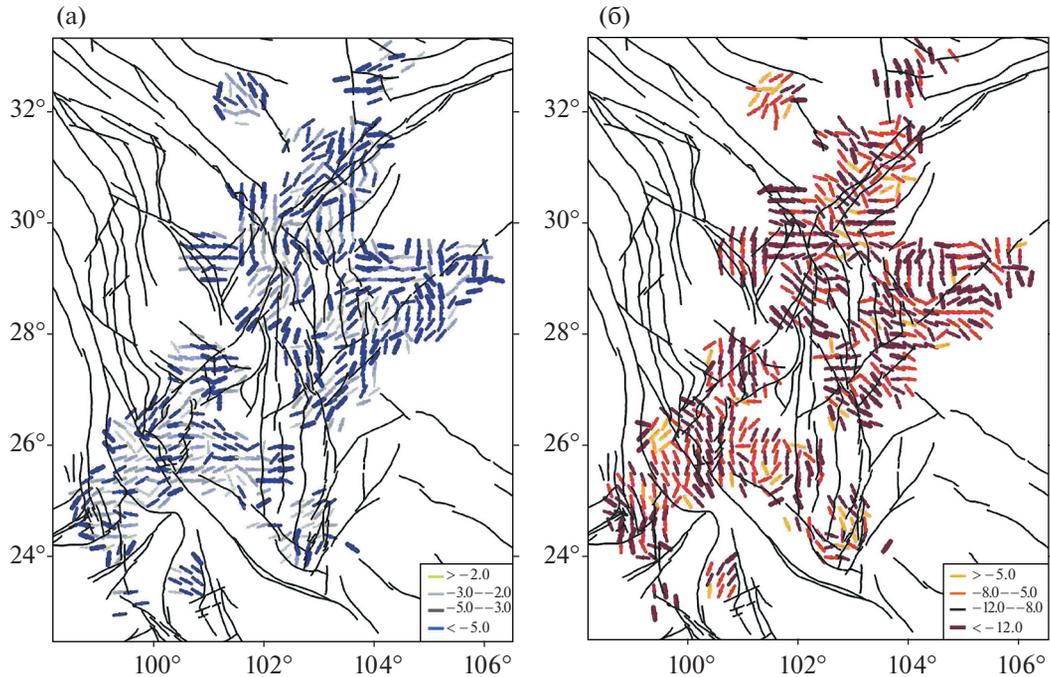


Рис. 8. Результаты 1-го и 2-го этапов катакластического метода длиннопериодной вариации напряжений, отвечающих усреднению за весь период каталога механизмов очагов землетрясений. Напряжения горизонтального сжатия: (а) – наименьшего, (б) – наибольшего. Показаны (толщина линий и оттенки синего и красного цвета) нормированные значения напряжений. На врезках внизу: диапазоны нормированных напряжений σ_h/τ_f (а) и σ_H/τ_f (б) соответственно.

данные о напряжениях. К низкому и высокому уровням эффективного давления можно отнести зоны, где диапазон его изменений в 3 раза меньше или в 10 раз больше прочности сцепления. Этим зонам отвечают площади соответственно около 4 и 14%.

После второго этапа метода катакластического анализа разрывных смещений можно рассчитать направления действия и нормированные значения напряжений максимального (σ_H) и минимального (σ_h) горизонтального сжатия (рис. 8). Для определения ориентации осей наибольшего горизонтального сжатия использованы формулы тензорного анализа:

$$\left\langle \frac{\sigma_i}{\tau_f} \right\rangle = -\left\langle \frac{p^*}{\tau_f} \right\rangle + \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle \times \times [(1 - \mu_\sigma/3)l_{1i}^2 + 2/3\mu_\sigma l_{2i}^2 + (1 + \mu_\sigma/3)l_{3i}^2], \quad i = h, H, \quad (4)$$

где l_{ki} – направляющие косинусы главных напряжений ($\sigma_k, k = 1, 2, 3$) с горизонтальными направлениями, доставляющими из выражения (4) значения напряжений наибольшего и наименьшего сжатия. Заметим, что использование для направлений осей наибольшего горизонтального сжатия азимутов простираения осей главного сжатия σ_3 в случае значений коэффициента Лодэ–Надаи близкий +1 и –1 может приводить к большим

ошибкам. В базе данных проекта World Stress Map [50] практически везде для σ_H используются азимуты σ_3 , хотя в технической документации к проекту декларирована необходимость использования формул тензорного анализа [21, 22, 47].

Как следует из результатов расчетов, в земной коре исследуемого региона поля ориентации осей наибольшего и наименьшего горизонтального сжатия и их величины имеют сложное – блоковое строение, что соответствует сложной разломной тектонике (см. рис. 8). Характерным здесь является как постепенное изменение ориентации осей, так и их резкое изменение, привязанное к разломам.

Напряжения и сейсмическая опасность

Согласно концепции хрупкого разрушения там, где всестороннее давление повышенное, хрупкое разрушение менее эффективно, т.к. требует затраты большей части упругой энергии на преодоления сил трения на разломе. Результаты реконструкции природных напряжений [10] показали, что очаги всех современных землетрясений магнитудой $M > 8.5$, произошедших в активных континентальных окраинах, приходились на участки разломов пониженного уровня эффективного давления, которые граничили с участками повышенного давления. Для континентальных орогенов было замечено, что землетрясения

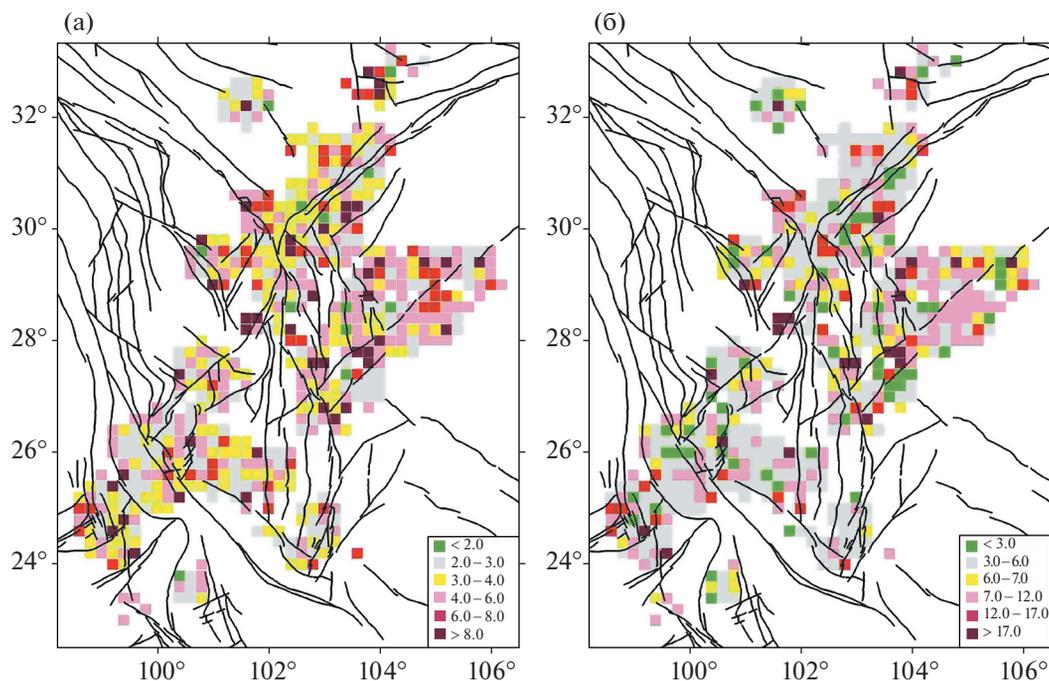


Рис. 9. Результаты 2-го этапа метода катакlastического анализа разрывных смещений, отвечающие последней по времени инверсии среднепериодных вариации напряжений в каждом из узлов расчета.

(а) – Максимальное касательное напряжение, нормированное на прочность сцепления; (б) – эффективное давление, нормированное на прочность сцепления.

магнитудами $M = 4.5–6.0$ также располагаются в участках земной коры пониженного эффективного давления [10]. Во всех этих случаях масштаб усреднения напряжений был ≥ 50 км. Таким образом, мы могли определить только среднее напряженное состояние для всего очага.

В некоторых случаях удалось установить, что эпицентры таких землетрясений располагались в непротяженных зонах перехода (большой градиент напряжений) от высокого уровня напряжений к низкому, т.к. зонам повышенного уровня напряжений соответствует и высокий уровень упругой энергии [10]. Отсюда сочетание зон высокого и низкого уровня напряжений при достаточной протяженности последних представляется наиболее опасным.

До настоящего времени у нас не было опыта сопоставления произошедших региональных землетрясений с магнитудами 7–8 с напряженным состоянием, полученным с хорошей детальностью. Для исследуемого региона таким землетрясением является Веньчуаньское землетрясение 2008 г. $M = 7.9$. Линейный размер очага этого землетрясения был ~ 140 км, что многократно превышает масштаб усреднения напряжений.

К юго-западу и северо-востоку от эпицентра Веньчуаньского землетрясения вдоль системы разломов Лунменьшань существуют обширные области пониженного эффективного давления

(см. рис. 7, г). Эпицентр находился в локальной зоне высокого уровня напряжений. Для прогноза сейсмической опасности из данных о напряженном состоянии земной коры необходимо, чтобы оно было как можно более актуальным и наименее осредненным не только в пространстве, но и во времени. Метод катакlastического анализа разрывных смещений позволяет в рамках своего алгоритма выполнять мониторинг напряженного состояния. В этой связи, представлены данные о нормированных величинах максимальных касательных напряжений и эффективному давлению, но относящиеся к последнему по времени периоду расчета напряжений в каждом из узлов (см. рис. 7, в, г, рис. 9). Такое напряженное состояние можно считать состоянием сегодняшнего дня (см. рис. 7 и рис. 9).

При схожести общей картины распределения указанных характеристик в их распределении существуют различия. Такие различия наблюдаются, в частности, в районе системы разлома Лунменьшань и вблизи эпицентра Веньчуаньского землетрясения. Проведенный анализ показывает, что для почти 50% узлов расчета имеет место увеличение значений максимального касательного напряжения сегодняшнего дня относительно расчета за весь период наблюдения. Для почти 15% узлов это напряжение уменьшается. При этом в среднем максимальное касательное напря-

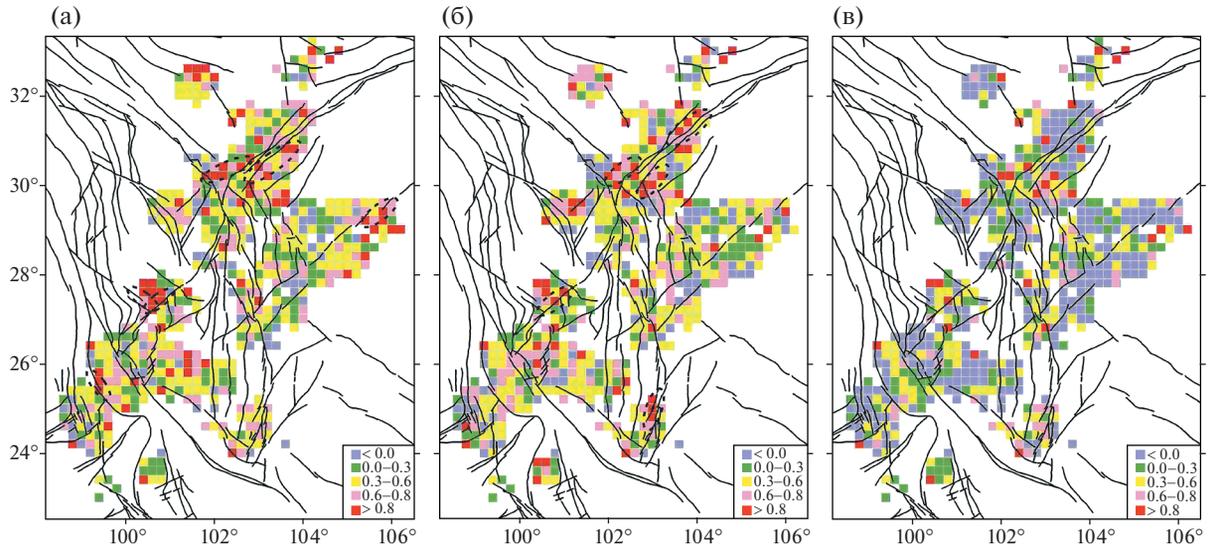


Рис. 10. Кулоновы напряжения, рассчитанные из критерия Друккера–Прагера по выражению (5) и нормированные на прочность сцепления в каждом из узлов расчета: для первой (а) и последней (б) по времени инверсиям – среднепериодные вариации напряжений и по результатам усреднения среднепериодных вариаций напряжений по всему периоду времени (в) – длиннопериодная вариация напряжений.

жение увеличилось на $0.83\tau_f$. Также в среднем возрастает и эффективное давление, но оно возрастает всего на $0.5\tau_f$, при этом для трети узлов давление увеличивается, у трети узлов давление уменьшается и еще у трети узлов изменений давления не происходит.

Районирование земной коры по критерию Друккера–Прагера

Полученные данные о нормированных значениях максимальных касательных напряжений, эффективного давления и коэффициента Лоде–Надаи позволяют выполнить районирование коры в рамках континуального подхода, так, как это делают в теории пластичности. Для этого, опираясь на критерий Друккера–Прагера, рассчитаем кулоновы напряжения по следующей формуле:

$$\tau_{DP} = \sqrt{-I_2(\mathbf{D}_\sigma)} - k_c p^* \quad (5)$$

при $I_2(\mathbf{D}_\sigma) = -\tau^2(1 + \mu_c^2/3)$,

где $I_2(\mathbf{D}_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений, k_c – коэффициент внутреннего трения (в расчетах $k_c = 0.6$). Критерий Друккера–Прагера для чистого сдвига ($\mu_\sigma = 0$) совпадает с критерием Кулона–Мора, записанного в инвариантах τ и p^* .

Используя результаты инверсии напряжений, полученной алгоритмом МКА для их среднепериодных вариаций, можно понять тенденцию изменений во времени напряженного со-

стояния. Для этого сравним два напряженных состояния. В первом варианте в узлах точек расчета показаны кулоновы напряжения по формуле (5), отвечающие самому раннему по времени определению тензора напряжений, а во втором варианте кулоновы напряжения отвечают самому последнему по времени определению тензора напряжений (рис. 10, а, б). По данным регионального каталога, до Веньчуаньского землетрясения 12.05.2008 произошло 90% землетрясений, поэтому оба поля напряжений за редким исключением соответствуют инверсии, выполненной по данным по землетрясениям до события 12.05.2008, но второе поле напряжений по времени ближе к моменту возникновения Веньчуаньского землетрясения [3].

Показано распределение кулоновых напряжений, полученных по формуле (5) для длиннопериодной вариации напряжений (см. рис. 10, в). Видно, что существенно большее число точек расчета находится далеко от критического состояния в сравнении тем, что получено для поля кулоновых напряжений в среднепериодной вариации (см. рис. 10, а, б). Это связано с тем, что при колебаниях напряженного состояния сильнее варьируется ориентация осей главных напряжений, чем эффективное давление. Это приводит к тому, что интенсивность усредненных девиаторных напряжений снижается. Таким образом, в формуле (5) трение начинает превалировать над сдвиговыми напряжениями.

Согласно данным по длиннопериодным напряжениям, большая часть системы разломов

Лунмэньшань находится в стабильном состоянии ($\tau_{DP} < 0$) (см. рис. 10, в). Однако именно в той части разломов, где находился эпицентр Веньчуаньского землетрясения, имеется большое число определений с высоким, близким к критическому уровню кулоновых напряжений. В этом поле напряжений другие региональные разломы не имеют протяженных (≥ 50 км) участков с состоянием, близким к критическому.

В среднепериодных вариациях напряжений система разломов Лунмэньшань выглядит как самая сейсмически опасная, в которой практически на всем ее протяжении встречаются участки, близкие к критическому состоянию. Их число и приближенность к разлому, активизировавшемуся при Веньчуаньском землетрясении, явно увеличивается (2 узла против 6 узлов с $\tau_{DP}/\tau_f > 0.8$). В среднепериодных вариациях напряжений для всего исследуемого региона около 30–35% территории имеет отрицательные значения кулоновых напряжений или положительный, но низкий их уровень. Это означает, что влияние всестороннего сжатия превалирует над девиаторными напряжениями. Только около 10% территории находится в критическом состоянии ($\tau_{DP}/\tau_f > 0.8$).

В качестве критерия опасности разлома будем использовать наличие для него участка большой протяженности, вдоль которого кулоновы напряжения находятся вблизи критического состояния ($\tau_{DP} > 0.5\tau_f$). Тогда опасными можно считать участки разломов в бассейнах рек Лункан, Дари и Сяцзян, имеющих протяженность повышенных кулоновых напряжений ≥ 100 км.

Показаны данные разломы и ряд достаточно протяженных участков (≥ 50 км) других разломов с высоким уровнем кулоновых напряжений (см. рис. 10, а, б – пунктирные эллипсы).

Районирование разломов по критерию прочности Кулона–Мора

В приведенном прогнозе опасных участков разломов параметры разломов не отражаются на результате. Можно только сопоставить местоположение разломов и участки повышенных значений кулоновых напряжений по формуле (5). При этом опасность разлома зависит не только от уровня напряжений, но и от взаимной ориентации плоскости разлома и осей главных напряжений или напряжений горизонтального сжатия (см. рис. 8).

Участки разломов могут быть сейсмо-опасными, если их азимуты простирания и углы погружения в поле реконструированных напряжений отвечают созданию вдоль разломов кулоновых напряжений $\langle \tau_c/\tau_f \rangle$ (3) высокого уровня.

Углы погружения разломов, которые были представлены в используемой нами базе данных, даются одинаковыми для каждого из разломов вдоль простирания и по глубине [34]. Для исследуемой территории большая часть разломов имеет субвертикальное погружение, а диапазон изменения погружения $\perp 60^\circ\text{--}90^\circ$. На самом деле углы погружения для каждого из разломов могут меняться не только по простиранию, но и с изменением глубины. В частности, для системы разломов Лунмэньшань углы погружения близки к вертикальным у поверхности, а на глубине 20–30 км выполаживаются до $\perp 60^\circ$ [41].

Для учета влияния на оценки сейсмической опасности разломов углов их простирания и погружения следует использовать кулоновы напряжения, рассчитанные на плоскости разлома согласно выражению (3). При этих расчетах принималось $k_f = 0.6$. Дискретность представления данных о простирании разломов составляла 3–7 км [34]. В соответствии с этой дискретностью разломов выполнялись расчеты. Для каждой точки разлома подыскивался ближайший узел сетки расчета с данными о напряжениях. В этом расчете учитывались латеральные изменения положения участка разлома, связанные с увеличением глубины (для углов погружения менее $\perp 90^\circ$). Если расстояния между указанными точками было ≥ 50 км, то расчет кулоновых напряжений в данной точке разлома не производился.

Приведенные карты районирования разломов по уровню кулоновых напряжений для среднепериодной компоненты отвечают первым и последним по времени результатам расчета в каждом узле сетки, т.е. начальной и конечной стадиям мониторинга напряжений (рис. 12, I, II). В обоих расчетах число землетрясений, произошедших до Веньчуаньского землетрясения (форшоковая стадия), превалировало над числом землетрясений после него (афтершоковая стадия). В этих двух расчетах соотношение механизмов очагов землетрясений до и после Веньчуаньского землетрясения позволяют условно считать их соответствующими ранней и поздней форшоковым стадиям землетрясения.

Кулоновы напряжения для каждого разлома рассчитывались для разных направлений погружения (север–юг, восток–запад) и углов погружения, которые менялись через 10° от -60° до -90° (рис. 12, I–II, а–г) и от $+90^\circ$ до $+60^\circ$ (см. рис. 12, I–II, г–ж). Карты с данными по кулоновым напряжениям для вертикальных углов погружения разломов сделаны в большем масштабе в связи с тем, что практически все крупные разломы исследуемого региона при подходе к поверхности становятся почти вертикальными (см. рис. 12, I (г), II (г)). Данные карты можно рассматривать,

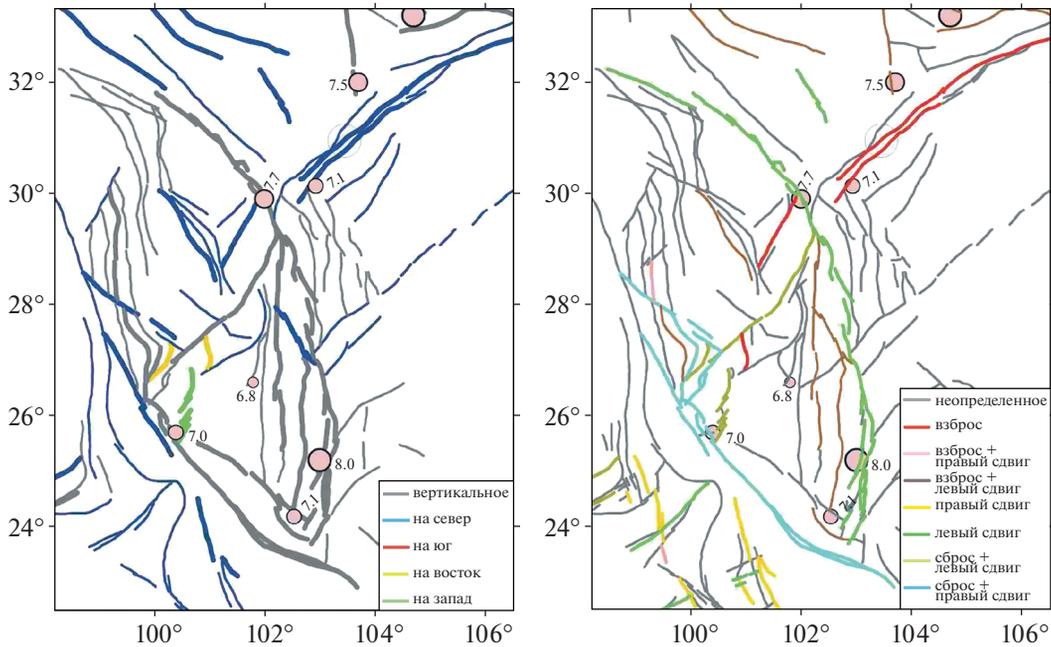


Рис. 11. Направления погружения (а) и кинематический тип (б) разломов исследуемого региона. Показаны (кружочки розовым) эпицентры сильных землетрясений магнитудами $M \geq 7.0$. Утолщенные линии разломов, имеющие данные о направлении погружения (а), и цветные линии (б), характеризующие кинематические типы разломов, по [46].

как актуальные практически для всех разломов исследуемого региона.

Стандартно отрицательные значения кулоновых напряжений на разломах рассматриваются как безопасные (силы трения и прочности сцепления превышают уровень касательных напряжений). Здесь сильные землетрясения магнитудой $M \geq 6.5$ не могут начинаться, но могут продолжаться в виде медленных или тихих землетрясений. Поскольку результаты реконструкции имеют определенную точность (по ориентациям осей это $10^\circ\text{--}15^\circ$), то к таким участкам относились разломы с уровнем нормированных кулоновых напряжений в диапазоне меньше -0.3 (см. рис. 12, темно-синий цвет). Соответственно к начальному уровню опасности относились разломы с малым отрицательным $-0.3\text{--}0.0$ (см. рис. 12, светло-голубой цвет) и малым положительным $0.0\text{--}0.3$ (см. рис. 12, желтый цвет) значением нормированных кулоновых напряжений. Такие участки разломов определяют возможность криповых движений, медленных или тихих землетрясений.

Средние значения кулоновых напряжений $0.3\text{--}0.6\tau_f$ (см. рис. 12, розовый цвет) показывают возможность сильных землетрясений при достаточной протяженности таких участков, но развитие очага здесь может быть менее интенсивным (низкие скорости) и выглядеть как медленное землетрясение. Высокий и критически высокий уровни кулоновых напряжений $0.3\text{--}0.8\tau_f$ и 0.8--

$1.0\tau_f$ (см. рис. 12, красный и темно-красный цвета) рассматриваются, как особо опасные, наличие которых может привести к распространению очага землетрясения за пределы таких участков — инициация сильного землетрясения.

Закономерность распределения кулоновых напряжений для разлома Лунмэньшань на участке очага Веньчуаньского землетрясения 2008 г. Изучение возможных вариантов опасного распределения кулоновых напряжений осуществлено на примере результатов инверсии напряжений на примере разлома Лунмэньшань и Веньчуаньского землетрясения 12.05.2008 г. ($M_w = 6.8$). Такая возможность обусловлена тем, что кулоновы напряжения (см. рис. 12) отвечали результатам расчетов среднепериодной компоненты тензора напряжений, действовавшего в форшоковый период.

Система разломов Лунмэньшань погружается на северо-запад под углом $\approx 60^\circ$ [34]. По геофизическим данным угол погружения разломов этой системы меняется от $\approx 80^\circ\text{--}90^\circ$ у поверхности до $\approx 40^\circ$ на глубине 20 км [17]. Из сейсмологических данных о фокальном механизме Веньчуаньского землетрясения следует, что угол погружения плоскости очага на северо-запад составлял $\approx 35^\circ$. Таким образом, принятые в наших расчетах углы погружения $\approx 60^\circ\text{--}90^\circ$ на северо-запад отвечают самой верхней части этих разломов (глубина 0–10 км) (см. рис. 12, I, а–г).

В ранний форшоковый период на разломе Лунмэньшань вблизи эпицентра очага Веньчуаньского землетрясения не существует зон высокого уровня кулоновых напряжений ($\tau_c > 0.6\tau_f$), угол погружения $\perp 90^\circ$ (см. рис. 12, I, г). К северо-востоку от эпицентральной области находится протяженный участок (150 км) с высоким уровнем кулоновых напряжений. Угол погружения разлома $\perp 90^\circ$ можно считать соответствующим приповерхностной глубине. Углы погружения от 80° до 60° отвечают постепенно увеличивающейся глубине разлома. Поскольку гипоцентр очага этого землетрясения располагался на глубине около 24 км (погружение очага под углом 35°), то углы от 80° до 60° соответствуют глубинам 5–15 км (см. рис. 12). Для этих углов на очаг Веньчуаньского землетрясения приходится большое число определений с высоким уровнем кулоновых напряжений, так что их непрерывный ряд захватывает участки от 90 до 150 км. Для зоны очага Веньчуаньского землетрясения для всех углов падения имеются небольшие участки (≤ 50 км) опасного состояния. При этом во всех случаях северо-восточная часть разломов Лунмэньшань выглядит более опасной, но не является непрерывной по уровню опасных напряжений.

В поздний форшоковый период система разломов Лунмэньшань выглядит существенно более опасной (см. рис. 12, II). Вблизи эпицентра очага Веньчуаньского землетрясения находится участок протяженностью около 20 км, которому отвечает критически высокий уровень кулоновых напряжений ($\tau_c > 0.6\tau_f$) (см. рис. 12, II, г). Для других углов погружения этих разломов на север опасные участки в эпицентральной области становятся существенно более крупными, а к северо-востоку формируются более протяженные опасные участки (110–210 км), чем в ранний форшоковый период. Но даже в этот период вся область будущего землетрясения не выглядит, как единая область опасно-высокого уровня кулоновых напряжений ($>60\%$ от критических значений).

Такое необычное состояние разлома (сочетание протяженных участков низкого и высокого уровня положительных значений кулоновых на-

пряжений) в результате инверсий природных напряжений соответствует сейсмической реализации Веньчуаньского землетрясения 2008 г. Вдоль очага землетрясения существовали протяженные участки в начальной фазе его развития, где землетрясение развивалось достаточно слабо, хотя и приводило к выходу разлома на поверхность с образованием 1–2 м эскарпа [4]. Эта ситуация изменилась во второй – северо-восточной половине разлома. Здесь были наибольшие разрушения и выделявшаяся сейсмическая энергия была существенно выше [45].

Таким образом, анализ распределения кулоновых напряжений в очаге Веньчуаньского землетрясения показал, что опасными для формирования сильного землетрясения могут быть не только участки разлома, имеющие непрерывное распределение высокого уровня значения кулоновых напряжений. Сейсмически опасными могут быть разломы, где происходит чередование участков высокого и низкого уровня кулоновых напряжений. Имеет значение протяженность участков – участки с низким уровнем кулоновых напряжений и даже с отрицательными их значениями (барьеры) должны быть существенно меньше по протяженности, чем участки высокого уровня этих напряжений. Продолжение развития очага землетрясения при переходе через такие участки-барьеры будем считать возможным, если на их продолжении имеются зоны высокого уровня кулоновых напряжений $\tau_c > 0.6\tau_f$.

Формальный алгоритм выделения опасных участков разломов состоял в выявлении зон, обязательно имевших некоторое число точек (>5 – 15–25 км) на разломе со значениями кулоновых напряжений $\tau_c > 0.6\tau_f$ – ядро опасного участка. Полная длина опасного участка определяет совместно с точками, примыкающими к этому ядру, со значениями кулоновых напряжений ($0.6\tau_f > \tau_c > 0.3\tau_f$). Внутри этого опасного участка могут находиться точки с невысоким уровнем кулоновых напряжений ($0.3\tau_f > \tau_c > 0$), но их непрерывный ряд не должен быть более 5 точек (15–25 км). Точки с отрицательными значениями кулоновых напряжений меньше $-0.3\tau_f$ могут присутствовать во внутренней части опасного участка (непрерыв-

Рис. 12. Районирование разломов по уровню нормированных кулоновых напряжений (τ_c/τ_f) для разных направлений погружения и разных углов погружения.

(а)–(ж) – углы погружения:

(а) – $\perp 80^\circ$ на север; (б) – $\perp 70^\circ$ на север; (в) – $\perp 60^\circ$ на север; (г) – $\perp 90^\circ$ – вертикальные разломы (показаны карты точек (левый верхний угол) с данными по временным интервалам, используемых в расчете землетрясений); (д) – $\perp 80^\circ$ на юг; (е) – $\perp 70^\circ$ на юг; (ж) – $\perp 60^\circ$ на юг.

I–II – стадии форшокового режима: I – ранняя, II – поздняя.

Показано: уровень кулоновых напряжений, соответствующий разной степени опасности участков разломов (утолщенные цветные линии); разломы, которые находятся в безопасном состоянии (темно-синие линии средней толщины); участки разломов, для которых поблизости (<50 км) отсутствовали данные о напряжениях (тонкие черные линии), длина опасных участков дана в км (надписи вдоль разломов); надписи для разломов (направление показано в рамке), погружения которых было указано в базе данных разломов [32].

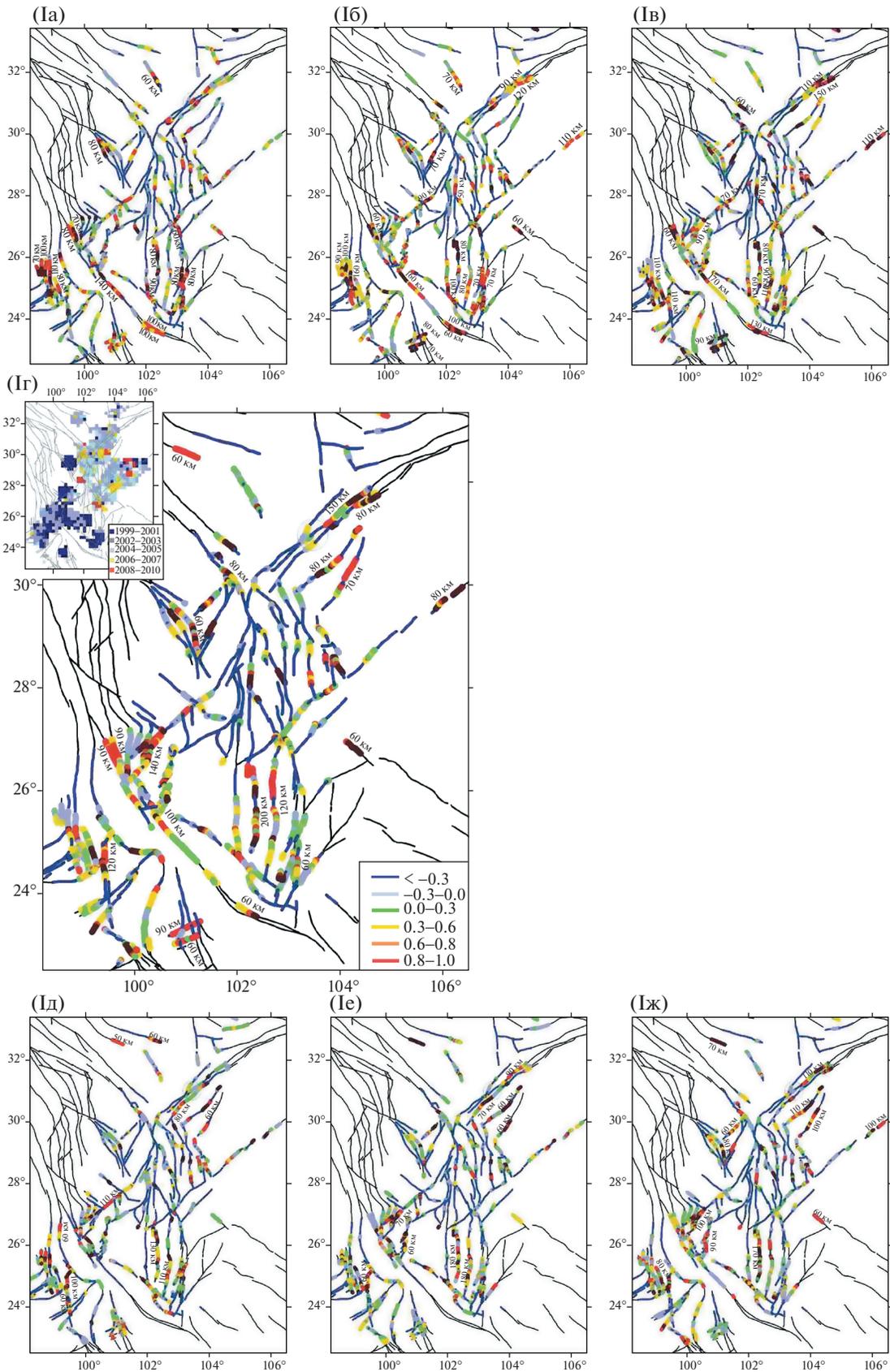


Рис. 12. Начало

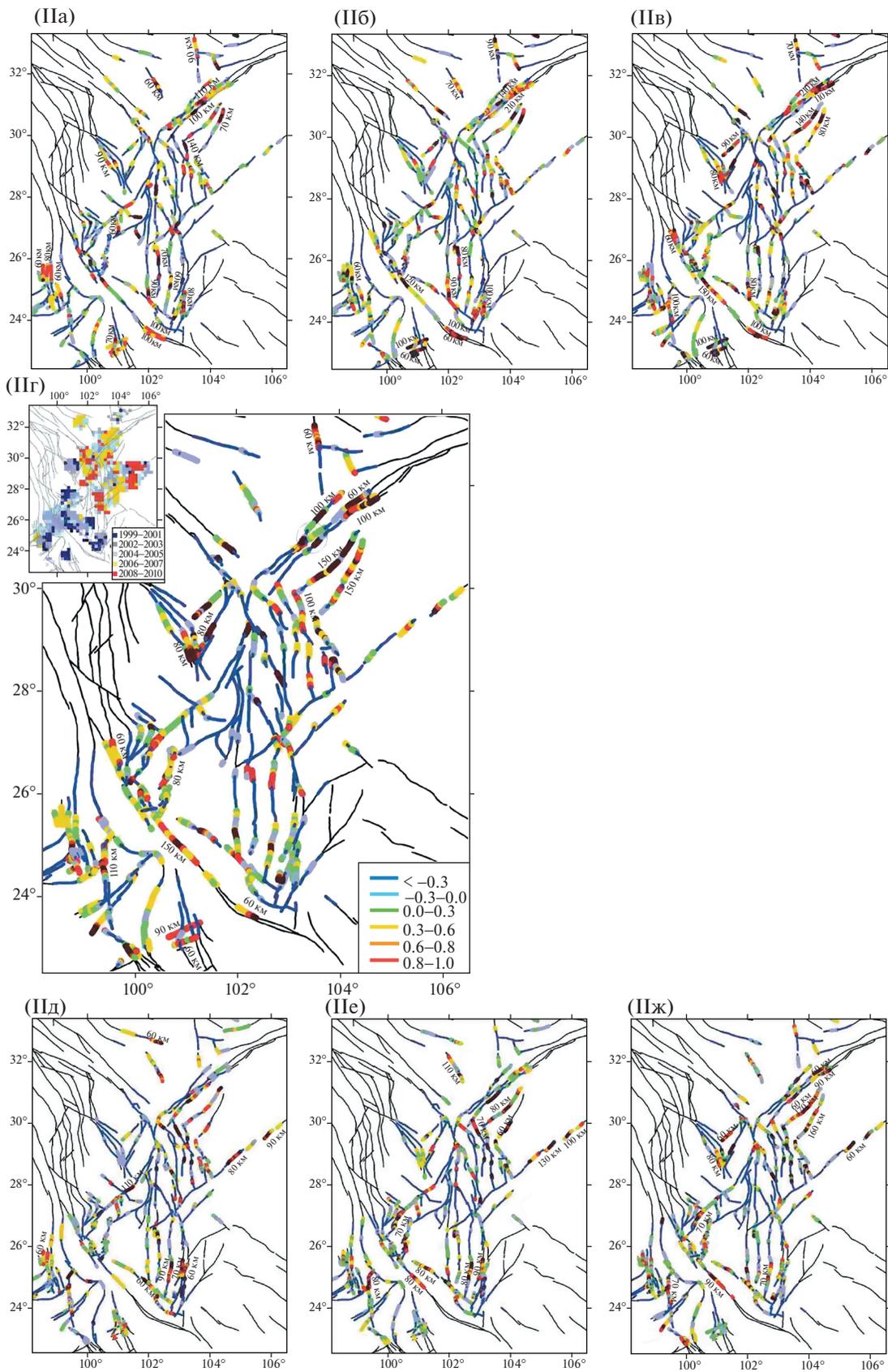


Рис. 12. Окончание

ный ряд не более 1–3 между точками высокого уровня кулоновых напряжений ($\tau_c > 0.6\tau_f$), но не могут находиться на его периферии.

Опасные участки разломов провинций Сычуань и Юньнань для возникновения сильных землетрясений. Выделены участки разломов опасного уровня кулоновых напряжений, где их протяженность составляет 60 км и более (см. рис. 12). Этот линейный масштаб в два раза превосходит масштаб усреднения напряжений и поэтому наиболее достоверно отражает возможности интерпретации результатов тектонофизического районирования опасных разломов.

Критический уровень кулоновых напряжений показывает только достижение для данного участка разлома некоторого предельного состояния, которое не может существовать бесконечно долго (см. рис. 12). Механизм трансформации этого состояния, уменьшающего уровень положительных значений кулоновых напряжений, в рамках используемого набора данных выясняется. Исследования последних 20–25 лет показали, что существует много вариантов вывода разлома из критического состояния, и это не обязательно стандартное мощное землетрясение, захватывающее весь участок высокого уровня кулоновых напряжений, множество слабых землетрясений (сейсмический крип) или асейсмический крип (скорости скольжения $V \sim$ см/год) [38]. Могут быть реализованы механизмы диссипации энергии в виде эпизодов [18, 25, 28, 33, 39, 44]:

- медленного скольжения ($V \sim 0.1$ м/с);
- низкочастотных землетрясений ($V \sim 0.001–0.1$ м/с);
- очень низкочастотных землетрясений ($V < 0.0001$ м/с);
- тихое, медленное землетрясение ($V < 0.01–0.1$ м/год);
- эпизодического крипа, в том числе постсейсмический ($V < 0.1–1$ м/год).

Реализующееся в этих механизмах медленное скольжение на разломах захватывает разные периоды времени и за счет большой площади способно снизить уровень упругой энергии в массиве адекватно сильному землетрясению.

Интерпретация данных по кулоновым напряжениям выполнялась из предположения формирования землетрясения, приводящего к сбросу энергии, соответствующей магнитуде $M \geq 7.5$ (см. рис. 12).

Для всех разломов с данными о напряжениях варьировались (7 вариантов) углы погружения в оба возможных направления от вертикали, при этом для части разломов имелись данные по направлению погружения [34]. Для таких разломов

указанная протяженность опасных разломов специально выделена (см. рис. 12).

Мы рассматриваем 20 опасных участков разломов согласно данным (см. рис. 12, I, г). Из них 6 участков разломов имеют наивысшую достоверность, т.к. они отмечены как вертикальные [46]. К этим шести участкам можно добавить 6–7 опасных участка разломов с падением на север, расположенные в северной части провинции Сычуань и в юго-западной части провинции Юньнань (см. рис. 12, I (а–в)). Часть из этих опасных участков разломов соответствует областям опасных участков земной коры (см. рис. 10). Дополнительно выделено еще несколько опасных участков разломов протяженностью от 60 до 220 км (см. рис. 10, рис. 12, I).

Результаты районирования отвечают ранней стадии форшокового периода Веньчуаньского землетрясения (см. рис. 12, I). Аналогичное районирование выполнено для более поздней стадии форшокового периода (см. рис. 12, II). Большому числу узлов сетки расчетов восточной части провинции Сычуань отвечают временные интервалы землетрясений, включенных в расчет, либо непосредственно предшествовавшие Веньчуаньскому землетрясению (2006–2007 гг.), либо произошедшие после него (см. рис. 12, I, II: врезки). В провинции Юньнань основным базисом расчета оставались события, произошедшие в 1999–2003 гг. (см. рис. 12, I, г).

Сопоставление результатов районирования показывает, что в провинции Юньнань самыми опасными являются системы разломов Пудухе–Сяоянг, Красной реки, Хецзянг–Ерян и Ницзяп–Лунчянцзянг–Лунгчанцзянг (см. рис. 12, I, II, г) Протяженность наиболее опасных участков этих разломов достигает 100–140 км. Эти разломы или субвертикальные, или погружаются на север (см. рис. 12, I, II, а–г).

В провинции Сычуань кроме северо-восточных участков разломов Лунмэньшань к опасным относятся системы разломов Миницзянг, Сиушухе, Литанг–Деву–Ляшонг–Мула, Хурунганг, протяженность опасных участков которых достигает 80–120 км.

Характерным является то, что для поздней стадии форшокового режима (см. рис. 12, II) протяженность почти всех опасных участков этих разломов изменилась в сторону уменьшения в сравнении с ранней стадией (см. рис. 12, I). Мы полагаем, это связано со сбросом напряжений, вызванным Веньчуаньским землетрясением. Выделенные участки остаются опасными, т.к. их протяженность позволяет их рассматривать как потенциально возможные очаги землетрясений магнитудой $M > 7.5$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для провинций Сычуань и Юньнань (Китайская Народная Республика) в рамках алгоритма метода катакластического анализа разрывных смещений выполнена инверсия напряженного состояния по выборке данных регионального каталога фокальных механизмов, предоставленного сейсмологами Института геологии Администрации по землетрясениям Китая (Пекин). Поскольку катакластический метод на втором этапе позволяет рассчитывать не только ориентацию главных осей и форму эллипсоида напряжений, но и оценивать соотношение шаровой и девиаторной частей тензора напряжений, то нами были рассчитаны относительные значения кулоновых напряжений земной коры исследуемого региона на основе критериев Друккера—Прагера (упругопластический закон) и Кулона—Мора (закон хрупкого разрушения). Нормировка этих напряжений производилась на прочность сцепления массива. По результатам расчетов построены карты ориентации осей главных напряжений, нормированных величин максимальных касательных напряжений и эффективного давления, а также кулоновых напряжений.

Полученные данные по закономерности распределения кулоновых напряжений в земной коре и в разломах провинций Юньнань и Сычуань позволили развить тектонофизические принципы районирования по сейсмической опасности [9].

Для области Веньчуаньского землетрясения 2008 г., произошедшего в системе разломов Лунмэньшань, было показано, что опасным состоянием разломов является не только наличие протяженной области разлома с уровнем кулоновых напряжений, приближенным к критическим значениям. Протяженный участок разлома, в пределах которого может наблюдаться прерывистость зон критического состояния, мы рассматриваем как сейсмически опасный. При этом зоны разлома с высоким уровнем кулоновых напряжений (>60% от критических) составляют не менее 70% от общей протяженности такого участка.

Применяемая в рамках катакластического метода технология инверсии напряжений сделала возможным рассчитать компоненты тензора напряжений в мониторинговом режиме, что позволило оценить тенденцию изменений напряжений земной коры во времени.

Данные по кулоновым напряжениям на разломах рассчитывались с учетом вариации углов погружения разломов с глубиной. Анализ результатов расчетов показал, что для области разлома Лунмэньшань, соответствующего месту реализации Веньчуаньского землетрясения 2008 г., имеются участки высокого уровня кулоновых напряжений. Мы выявили более 20 участков

разломов с высоким уровнем значений, где, в соответствии с протяженностью разломов 60–140 км, ожидаемая магнитуда землетрясения может быть более $M \geq 7.0$.

В настоящее время известны исследования по районированию сейсмически опасных разломов земной коры по данным о кулоновых напряжениях. Но при этом такие исследования достаточно редки. Это связано с тем, что для их расчета необходимо иметь данные не только по ориентации главных напряжений, но и получить значения их абсолютной или относительной величины. Поэтому для расчета кулоновых напряжений используются региональные данные по напряжениям с большой площади усреднения, полученные либо *in-situ* методами горного дела, либо методы численных расчетов при директивном задании регионального напряженного состояния [20, 32].

ВЫВОДЫ

1. В работе показана возможность выполнения исследований сейсмической опасности разломов на основе количественного критерия кулоновых напряжений, для расчета которых были использованы данные по природным напряжениям локального масштаба, полученные тектонофизическим методом анализа механизмов очагов землетрясений. Предложен алгоритм варьирования погружения плоскости разломов в рамках допустимых значений углов в тех случаях, когда подобный тип данных отсутствует.

2. Результаты районирования активных разломов по кулоновым напряжениям позволили выявить закономерность их распределения в очаге сильного Веньчуаньского землетрясения 2008 г. Нами показано, что не вся область очага этого землетрясения находилась вблизи предельного уровня кулоновых напряжений. Для разлома Лунмэньшань, на котором происходило развитие Веньчуаньского землетрясения, имело место чередование участков высокого и низкого уровня кулоновых напряжений. Внутри будущего очага даже существовали малые по протяженности участки с отрицательным значением кулоновых напряжений, которые следует рассматривать как барьеры. При этом эпицентр землетрясения располагался в области высокого уровня кулоновых напряжений, а общая протяженность таких участков была немногим более 60% от протяженности всего очага. Установленная закономерность показала возможность существования большой неоднородности напряжений в области очагов даже очень сильных землетрясений.

3. Выявленная неоднородность распределения кулоновых напряжений для катастрофического

Веньчуаньского землетрясения была принята нами в качестве модели при оценке протяженности опасных участков разломов, которые могут реализовать землетрясения ($M > 7.5$) с протяженностью очага ≥ 60 км. Было выделено более 20 участков разломов, удовлетворяющих признакам опасности формирования землетрясения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сейсмологам Геологического Института Пекина (Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China) за предоставление возможности использовать в настоящей работе базу данных региональных разломов [46] при интерпретации результатов тектонофизической инверсии напряжений.

Авторы благодарят рецензента д. г.-м. н. А.Ф. Еманова (АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия) и анонимного рецензента за комментарии, которые позволили улучшить статью.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 19-55-53025 GFEN, госзадания ИФЗ РАН, Национальным фондом естественных наук Китая (гранты № 41911530111 и № 41572181) и Национальной ключевой программой исследований и разработок Китая (грант № 2018YFC1503301).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуценко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Докл. АН СССР. Сер. Геофиз. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560.
2. Гуценко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. – В кн.: *Поля напряжений в литосфере.* / Ред. А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. М.: Наука, 1979. С. 7–25.
3. Каталог механизмов очагов землетрясений Китая. Пекин. М.–Пекин: Академкнига–Издательство Ду (*China Earthquake source catalogue.* – Beijing: Du Publ., China. 1990). Р. 400. (на китайском).
4. Лю Цзяо, Рогожин Е.А. Макросейсмические проявления Веньчуаньского катастрофического землетрясения 2008 г. ($M_s = 8.0$) по результатам изучения поверхностных сейсмодислокаций // Геофизические процессы и биосфера. 2017. № 14. Вып. 4. С. 103–121.
5. Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г. Долгосрочный прогноз по низкокачественным микросейсам // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 9–35.
6. Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. № 8. С. 23–33.
7. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291.
8. Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 496–520.
9. Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 6. С. 1225–1250.
10. Ребецкий Ю.Л. Закономерности разномасштабного разрывообразования в коре и тектонофизические признаки метастабильности разломов // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. Вып. 3. С. 629–652.
11. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 190 с.
12. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. М.: Наука. 1990. 190 с.
13. Angelier J. On the analysis of measurements collected in fault sites: the utility of a confrontation between dynamic and cinematic methods // *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris. D.* 1975. Vol. 281. P. 1805–1808.
14. Angelier J. Inversion field data in fault tectonics to obtain the regional stress – III. A new rapid direct inversion method by analytical means // *Geophys. J. Int.* 1990. Vol. 10. P. 363–367.
15. Dai F.C., Lee C.F., Deng J.H., Tham L.G. et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China // *Geomorphology.* 2005. Vol. 65. No. 3–4. С. 205–221.
16. Engdahl E.R., Villaseñor A. Global seismicity: 1900–1999 // *Int. Earthquake and Engineer. Seismol. Part A.* 2002. Chapt. 41. Part A. P. 665–690.
17. Feng, S.Y., Zhang P.Z., Liu B.J. et al. Deep crustal deformation of the Longmen Shan, eastern margin of the Tibetan Plateau, from seismic reflection and finite element modeling // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2016. Vol. 121. P. 767–787.
18. Gao H., Schmidt D.A., Weldon R.J. Scaling relationships of source parameters for slow slip events // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2012. Vol. 102. No. 1. P. 352–360. <https://doi.org/10.1785/0120110096>
19. Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89. No. B11. P. 9305–9320.
20. Healy D., Hicks St.P. De-risking the energy transition by quantifying the uncertainties in fault stability // *Solid Earth. Sci.* 2021. <https://doi.org/10.5194/se-2021-100>
21. Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfe D., Müller B. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008 // *Tectono-*

- physics. 2010. Vol. 482. P. 3–15.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.1007.1023>
22. *Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.-L., Zoback M.D.* The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 744. P. 484–498.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
 23. *Hu Y.X., Liu S.C., Dong W.* Earthquake engineering. London: CRC Press, 1996. 410 p.
 24. *Huan W., Shi Zh.* Great earthquakes of $M \geq 8$ in the mainland of China and their evolution // *Tectonophysics*. 1987. Vol. 138. P. 55–68
 25. *Jordan T.H.* Far-field detection of slow precursors to fast seismic ruptures // *Geophys. Res. Lett.* 1991. Vol. 18. No. 11. P. 2019–2022.
<https://doi.org/10.1029/91GL02414>
 26. *Kossobokov V.G., Healy J.H., Dewey J.W.* Testing an earthquake prediction algorithm // *Pure and Appl. Geophys.* 1997. Vol. 149. P. 219–232.
 27. *Langbein J., Borchrdt R., Dreger D., Fletcher J., Hardebeck J.L., Hellweg M., Johnston M.J.S., Murray J.R., Nadeau R.M., Remer J., Treiman J.A.* Preliminary report on the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California earthquake // *Seismol. Res. Lett.* 2005. Vol. 76. No. 1. P. 10–26.
 28. *Linde A.T., Gladwin M.T., Johnston M.J.S., Gwyther R.L., Bilham R.G.* A slow earthquake sequence on the San Andreas Fault // *Nature*. 1996. Vol. 383. No. 6595. P. 65–68.
<https://doi.org/10.1038/383065a0>
 29. *Lindh A.G.* Success and failure at Parkfield // *Seismol. Res. Lett.* 2005. Vol. 76. No. 1. P. 3–6.
 30. *Lithospheric Dynamics Atlas of China. 1 : 14 000 000 to 1 : 4 000 000.* / Ed. by Ma Xingyuan, (China Cartograf. Publ. Beijing, China. 1989).
 31. *Lyubushin A.A.* How soon would the next mega-earthquake occur in Japan // *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 5. No. 8. P. 1–7.
 32. *Moeck I., Kwiatek G., Zimmermann G.* Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 31. P. 1174–1182.
 33. *Peng Z., Gombert J.* An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // *Nature Geoscience*. 2010. Vol. 3. P. 599–607.
 34. *Qidong Deng.* Active tectonics map of China 1 : 4000000. – Seismol. Press, Beijing, China. 2007.
 35. *Rao G., Chenb P., Hub Ji., Yua Ya., Qiu Ji.* Timing of Holocene paleo-earthquakes along the Langshan Piedmont Fault in the western Hetao Graben, North China: Implications for seismic risk // *Tectonophysics*. 2016. Vol. 677–678. P. 115–124.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.035>
 36. *Rao G., Lin Ai., Yan B.* Paleoseismic study on active normal faults in the southeastern Weihe Graben, central China. // *J. Asian Earth Sciences*. 2015. Vol. 114. Part 1. P. 212–225.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.031>
 37. *Rebetsky Yu.L.* Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations // *J. Earthquake Predict. Res.* 1996. Vol. 5. No. 4. P. 557–573.
 38. *Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu.* The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. – In.: *Moment Tensor Solutions – A Useful Tool for Seismotectonics.* / Ed. by S. D’Amico. Springer, N.Y. USA. 2018. P. 111–162.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6
 39. *Sekine S., Hirose H., Obara K.* Short-term slow slip events correlated with non-volcanic tremor episodes in southwest Japan // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115(B9), B00A27.
<https://doi.org/10.1029/2008JB006059>
 40. *Steinbrugge K.V., Zacher E.G.* Fault creep and property damage // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1960. Vol. 50. No. 3. P. 389–396.
 41. *Wang K., Rebetsky Yu.L., Feng X., Ma Sh.* Background stress state before the 2008 Wenchuan earthquake and the dynamics of the Longmen Shan thrust belt // *Pure and Appl. Geophys.* 2018. Vol. 175. P. 2503–2512.
<https://doi.org/10.1007/s00024-018-1800-6>
 42. *Wang J.* Historical earthquake investigation and research in China // *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 47. No. 2/3. P. 831–838.
<https://doi.org/10.4401/ag-3337>
 43. *Wang T., Wu S.R., Shi J.S., Xin P., Wu L.Z.* Assessment of the effects of historical strong earthquakes on large-scale landslide groupings in the Wei River midstream // *Engineer. Geol.* 2018. Vol. 235. P. 11–19.
 44. *Wei M., McGuire J.J., Richardson E.* A slow slip event in the south central Alaska subduction zone and related seismicity anomaly // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. No. 15. L15309.
<https://doi.org/10.1029/2012GL0>
 45. *Yin A., Freymueller J.T., Keller G.R., Ni S.D., Song X.D.* The Great Wenchuan Earthquake ($M_w = 7.9$) on 12 May 2008, China // *Tectonophysics*. 2010. Spec. Is. Vol. 491. No. 1–4. P. 1–276.
 46. *Zhou H., Allen C.R., Kanamori H.* Rupture complexity of the 1970 Tonghai and 1973 Luhuo earthquakes, China, from P-wave inversion, and relationship to surface faulting // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1983. Vol. 73. No. 6A. P. 1585–1597.
 47. *Zoback M.L.* First- and second modern pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. No. B8. P. 11 703–11 728.
 48. Prediction ITPE&MG, <http://www.mitp.ru/ru/predictions.html> (Accessed June 11, 2021).
 49. Global CMT, <http://globalcmt.org> (Accessed June 26, 2021).
 50. World Stress Map, <http://www.world-stress-map.org> (Accessed July 11, 2021).
 51. STRESSseism <http://shark.ifz.ru> (Accessed July 11, 2021).

Stress State of the Earth Crust and Seismotectonics of West Sichuan, China

Yu. L. Rebetsky^{a,*}, Ya. Guo^b, K. Wang^b, R. S. Alekseev^a, A. V. Marinin^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, bld. 10, Bol. Gruzinskaya, 123242 Moscow, Russia*

^b*Institute of Geology, China Earthquake Administration, (CEA),
Yard No. 1, Hua Yan Li, Chaoyang District, 100029 Beijing, China*

**e-mail: reb@ifz.ru*

The paper presents the results of the application of the technology of tectonophysical zoning of dangerous faults, developed at the Institute of Earth Physics on the basis of data on natural stresses. The source of this data is catalogues of focal mechanisms of earthquakes, and inversion of stresses from them is obtained by the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. For the study region, which includes the largest provinces of China – Sichuan and Yunnan – the stress reconstruction was performed on the basis of the regional catalog of mechanisms of earthquake foci with $M_w = 2.0–6.0$ for the time period 1999–2012. The ability to predict the state of faults is based on data on the normalized values of the ball and deviator components of the stress tensor. The paper presents two variants of fault zoning, which are the result of applying the Drukker–Prager and Coulomb–Mohr criteria, which characterize the elastic-plastic and brittle behavior of the crust, respectively. It is shown that the second approach allows us to provide better and more detailed data for the state along the active faults of the Western Sichuan region. Analysis of the state of the Longmenshan fault system before the 2008 Wenchuan earthquake showed that the distribution of coulomb stresses along the fault with at least 70% of the length and a high level of Coulomb stresses (>60% of the critical ones) should be considered dangerous.) According to the results of the performed tectonophysical zoning, more than 20 sites of active faults of the studied region with a length of 60 to 140 km were identified, which we consider as possible foci of strong earthquakes with magnitudes greater than 7.0.

Keywords: fractures, crust, stresses, earthquakes, focal mechanisms, dangerous faults, Coulomb stresses