

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.348.436, 551.242

**ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 ГОДА**

Е.В. Лескова^{1,2}, А.А. Еманов^{1,2}

¹ *Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

² *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

По материалам сейсмологических исследований с временными сетями станций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. рассчитано локальное поле тектонических напряжений на основе механизмов очагов афтершоков. Оригинальность данной работы заключается в привлечении для изучения напряженного состояния землетрясений с большими различиями в энергии и использовании в анализе событий с высокоточными сведениями о координатах и глубине. Основным результатом стало выделение двух иерархических уровней поля напряжений. Показано, что тип напряженного состояния, определенный по сильным землетрясениям, однородный (горизонтальной сдвиг) по всей афтершоковой области, а по слабым событиям — изменяется в соответствии с блоковой структурой афтершоковой зоны.

Сейсмология, тектонофизика, афтершоки, механизмы очагов, иерархический уровень, поле напряжений, блоковая структура, Чуйское землетрясение, Горный Алтай.

**HIERARCHICAL PROPERTIES OF THE TECTONIC-STRESS FIELD
IN THE SOURCE REGION OF THE 2003 CHUYA EARTHQUAKE**

E.V. Leskova and A.A. Emanov

Local tectonic stress field has been calculated based on aftershock focal mechanisms, using materials of epicentral studies with temporary networks of stations in the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake. The originality of this work is that the stress state is studied invoking earthquakes with large differences in energy and using highly accurate data on the location and depth in the analysis of events. The main result is the selection of two hierarchical levels of the stress field. It is shown that the stress state determined from data on large earthquakes is homogeneous (horizontal shear) throughout the aftershock zone, and the stress state determined from data on small events varies according to the block structure of the aftershock region.

Seismology, tectonophysics, aftershocks, focal mechanisms, hierarchical level, stress field, block structure, Chuya earthquake, Altai Mountains

ВВЕДЕНИЕ

Напряженное состояние земной коры является одним из ведущих факторов, определяющих такие процессы, как тектонические движения, образование и развитие складчатых и разрывных структур и зон подготовки сильных землетрясений. Экспериментальные исследования напряженного состояния осуществляются на основе двух принципиально различающихся методов: геологического и сейсмологического. В первом случае тектонические поля напряжений строятся на основе информации о структуре разломов, а во втором — с помощью сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений.

Разломы в земной коре представлены в обширном диапазоне размеров и дают возможность изучить напряженное состояние, среднее за длительный интервал времени в историческом плане. Сейсмологический метод позволяет установить современное поле напряжений (в историческом плане — мгновения), но для детальных исследований часто ощущается дефицит землетрясений с определенным

механизм очага. Причинами этого могут быть как редкие сети сейсмостанций, так и слабая сейсмичность рассматриваемых территорий.

Однако основная трудность, с которой сталкиваются как геологи, так и сейсмологи, заключается в том, что сейсмический процесс протекает в сложнопостроенной блоковой геологической среде. Сами блоки разделены зонами ослабленной прочности — разломами, по которым и протекает сейсмический процесс. Размеры блоков определяют их принадлежность к иерархической структуре разноранговых неоднородностей. Существование иерархической структуры геофизической среды было доказано при различных теоретических и натурных исследованиях. В применении к сейсмичности такими работами являются труды М.А. Садовского, В.Ф. Писаренко [1991], а в отношении геологических структур главным образом разломов — С.И. Шермана с соавторами [1983, 2005].

Иерархические свойства поля тектонических напряжений, проявляющиеся в том, что для одной и той же территории по крупным тектоническим нарушениям восстанавливается один тип напряженного состояния, а по более мелким другой, впервые были отмечены Дж.Д. Муди, М.Дж. Хиллом [1960] и затем развиты во многих публикациях других ученых. Важнейшими вкладами в изучение полей тектонических напряжений и их ранговой структуры являются фундаментальные труды М.В. Гзовского [1975] и О.И. Гущенко [1975].

Теоретическая модель среды с иерархически организованным полем тектонических напряжений обоснована Д.Н. Осокиной [1987]. Она рассматривала причины возникновения и условия проявления, а также выделения иерархической структуры поля напряжений.

Известны попытки обнаружить свойство иерархичности поля тектонических напряжений по данным сейсмологии [Гущенко, 1979]. Автор работал с наиболее крупными землетрясениями планеты Земля, выделяя мегарегиональный уровень. Данную публикацию трудно воспринимать как однозначное доказательство иерархичности поля тектонических напряжений по материалам сейсмологии.

В условиях спокойной фоновой сейсмичности любого региона достаточно проблематично набрать высокоточную информацию для исследования иерархических проявлений напряженного состояния земной коры. Интенсивные афтершоковые процессы, зарегистрированные плотной сетью станций, могут быть благодарным материалом для такого рода работ с использованием событий в широком диапазоне энергий. Изучение локальной области по детальным данным подвигает нас к лучшему пониманию процессов, происходящих в обстановках, подобных рассматриваемой.

Исследования по реконструкции напряженно-деформированного состояния земной коры Алтае-Саянской области на основе данных о механизмах очагов сильных землетрясений опубликованы в серии статей [Жалковский и др., 1995; Гольдин, Кучай, 2007; Гольдин, Кучай, 2008, Ребецкий и др., 2009], в которых дается описание полей сеймотектонических деформаций и напряжений с использованием методов, разработанных Ю.В. Ризниченко [1965], С.Л. Юнгой [1990, 1996] и Ю.Л. Ребецким [2007]. В этих и других работах было показано, что земная кора Алтае-Саянской области разбита на многочисленные блоки и находится в состоянии преобладающего сжатия с преимущественной субмеридиональной и субширотной ориентацией главных осей сжатия и растяжения соответственно.

В данной работе исследования по реконструкции современного поля напряжений выполнены с использованием метода катакластического анализа (МКА) [Ребецкий, 1997, 1999, 2001, 2007] на локальном участке Алтая — в Чуйско-Курайской зоне, а точнее в области, охваченной афтершоками Чуйского землетрясения. Эта зона давно вызывала интерес как геологов, так и сейсмологов. По данным о землетрясениях малых энергий, Чуйско-Курайская зона ярко высвечивается в структуре Алтае-Саянской области как район с быстропротекающим тектоническим процессом [Еманов и др., 2005], а проведенные здесь палеосейсмологические исследования в 1990-х годах говорят о высоком сейсмическом уровне в прошлом [Рогожин, Платонова, 2002].

Чуйское землетрясение 2003 г. с магнитудой $M_s = 7.3$ и последовавшие за ним многочисленные афтершоки стали хорошим материалом как для изучения особенностей сейсмического режима, так и для оценки напряженного состояния земной коры этого района. Активно развивавшаяся сеть сейсмических станций позволяла проводить такие исследования с высокой точностью. Особенности сейсмического режима афтершоковой последовательности Чуйского землетрясения посвящена серия работ [Лескова, Еманов, 2006; Еманов и др., 2009]. В этих и других публикациях было показано, что поле афтершоков имеет сложную структуру, зависящую от блокового строения эпицентральной области. Удалось выделить четыре основных элемента структуры афтершоковой зоны с разными характеристиками событий и определить фазы развития во времени и пространстве афтершокового процесса.

В статье представлена попытка выделения локальных полей напряжений на основе данных о положении гипоцентров с точностью локации до сотен метров — первых километров и механизмов их очагов в широком диапазоне энергий, полученных с привлечением станций Алтайского сейсмологического полигона [Еманов и др., 2003] и эпицентральных наблюдений [Еманов и др., 2007, 2010]. Количественный и энергетический диапазон исходных сейсмологических данных позволил выполнить рекон-

трукцию поля тектонических напряжений в узлах сетки 2×2 км. Такая детальность исследования дает возможность оценивать локальные неоднородности поля современных напряжений в пределах рассматриваемой зоны.

МЕТОД КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СОВОКУПНОСТЕЙ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Реконструкция поля современных тектонических напряжений земной коры в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая выполнена по данным о механизмах очагов афтершоков Чуйского землетрясения с использованием метода катакластического анализа совокупностей разрывных нарушений, разработанного и внедренного Ю.Л. Ребецким [1997, 1999, 2001, 2007].

Метод катакластического анализа разрывных нарушений состоит из трех основных этапов реконструкции и, используя общие энергетические положения современной теории пластичности, позволяет производить расчет всех компонентов тензоров напряжений и приращений сеймотектонических деформаций, а также оценивать эффективные параметры прочности хрупких массивов горных пород. В качестве исходного материала для восстановления поля действующих тектонических напряжений используются структурно-кинематические данные о трещинах и разрывах, в нашем случае это механизмы очагов землетрясений.

В данной работе представлены результаты первого этапа реконструкции [Ребецкий, 1997, 1999, 2001, 2007]. На этом этапе осуществляется формирование однородных выборок механизмов очагов землетрясений и рассчитываются параметры, характеризующие эллипсоиды напряжений и квазипластические деформации: ориентацию трех главных осей и их соотношение (коэффициент Лоде—Надаи). Методика создания однородной выборки основана на процедуре суммирования квадрантов сжатия и растяжения для набора фокальных механизмов землетрясений с учетом областей упругой разгрузки и последовательной во времени проверки землетрясений на совместимость и принадлежность одной фазе деформирования.

МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ АФТЕРШОКОВ

Основу каталога механизмов очагов составили 512 землетрясений с магнитудами $M_s = 7.3—0.0$, произошедших в 2003—2009 гг. Для расчетов фокальных механизмов использовались данные, полученные при локации землетрясений программой HYPOINVERSE-2000 [Klein, 2002]. Гипоцентральные решения, а также азимуты и углы выхода луча из очага для каждого наблюдения рассчитывались в рамках слоистой скоростной модели [Лескова, Еманов, 2006]. Затем построение фокальных механизмов выполнялось пакетом программ FPFIT [Reasenber, Oppenheimer, 1985] по знакам первых вступлений. Для каждого события в расчетах участвовало от 10 до 40 наблюдений полярности первых вступлений на станциях Алтае-Саянской региональной сейсмической сети, Алтайского сейсмологического полигона [Еманов и др., 2003] и временных сетей сейсмологических наблюдений АСФ ГС СО РАН в зоне Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2007, 2010]. Для расчета механизмов очагов сильных землетрясений ($M_s > 4$) дополнительно использовались данные волновых форм Байкальской региональной сети и глобальных сейсмических сетей IRIS [<http://www.iris.edu>], таких как IU (GSN — IRIS/USGS), II (GSN — IRIS/IDA), а также сетей Казахстана (НЯЦ РК) (KZ), Киргизии (НС РАН) (KN) и Китая (IC IRIS/China). В каталог фокальных механизмов вошли только те события, для которых имеется однозначное решение плоскости разрыва, а максимальная ошибка определения положения нодальных плоскостей не превышает 15° по любому из параметров.

Фокальные механизмы слабых толчков ($M_s \leq 2.5$) рассчитаны главным образом по записям станций временных сетей эпицентральных наблюдений (2003—2009 гг.). Временные сети станций выставляются в Чуйско-Курайской зоне ежегодно в основном в летний период [Еманов и др., 2007, 2010]. Каждый раз в исследуемом районе дополнительно устанавливались до 30 станций на период регистрации до 3 мес. Как правило, каждый из периодов наблюдений характеризуется своей конфигурацией сети станций, направленной на изучение того или иного участка активизированной зоны. Благодаря чему получены детальные данные о сейсмических событиях и механизмах их очагов отдельных активизированных структур. Смена типа механизмов на окончаниях элементов структуры была выявлена в очагах слабых событий [Лескова, Еманов, 2006].

Рассчитанные механизмы очагов афтершоков с $M_s \geq 4.5$ представлены на рис. 1. Основным типом механизма, реализованного в очаге землетрясений данного диапазона, с учетом геологической обстановки исследуемой зоны является правый сдвиг по плоскости северо-западного простирания, характерный для главного толчка и большинства сильных афтершоков. Исключение составляют взбросовый и поддвигающий механизмы в области, близкой к эпицентру главного толчка, и взбросовый — на границе Курайской впадины и Чаган-Узунского блока.

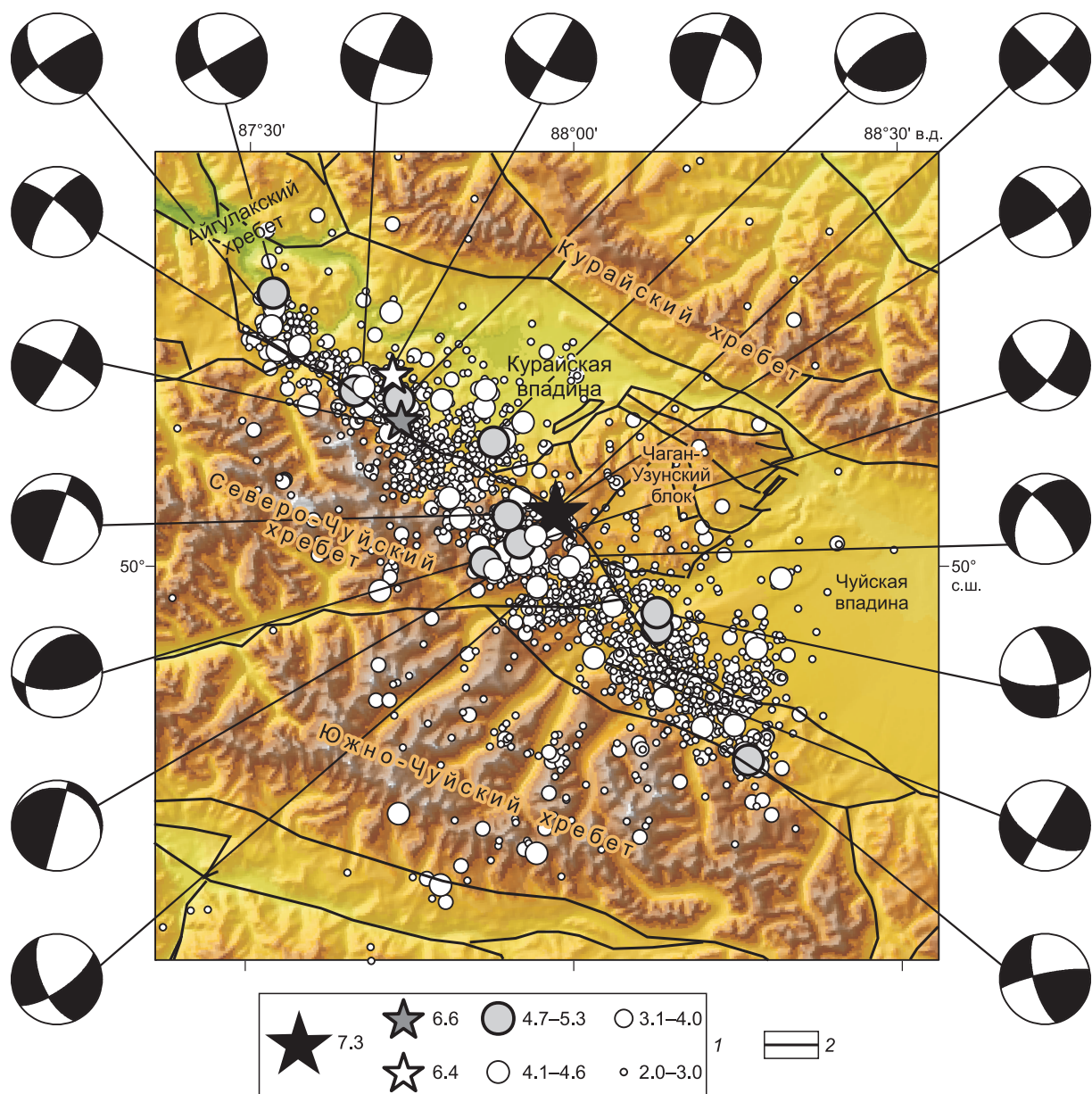


Рис. 1. Чуйское землетрясение и его крупные афтершоки ($M_s > 2$) за период 2003—2009 гг.

1 — эпицентры землетрясений с соответствующей магнитудой; 2 — блокораздельные разломы. Механизмы очагов для афтершоков с $M_s \geq 4.5$ (в проекции нижней полусферы).

ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ

Предварительный анализ исходного каталога механизмов очагов показал, что размер областей упругих разгрузок (~3—4 длины разрыва [Осокина, Фридман, 1987]) представленных землетрясений и плотность их распределения позволяют выполнить реконструкцию напряженного состояния очаговой области в узлах сетки 2×2 км на глубине 8 км — средней для афтершоков всего энергетического диапазона.

Большой разброс по энергии используемых сейсмологических данных дает возможность постановки задачи о построении и выделении локальных полей тектонических напряжений разных масштабных уровней для Чуйско-Курайской зоны. Главный толчок ($M_s = 7.3$) и два крупнейших афтершока ($M_s = 6.4$ и 6.6) были исключены из каталога, используемого для реконструкции локальных полей напряжений, так как их области упругой разгрузки, радиус которых составит порядка 100—300 км, заве-

домо сопоставимы со всей афтершоковой зоной, и их вклад в каждую ячейку сетки расчета будет весьма существенен. При этом для расчета по МКА регионального поля напряжений недостаточно данных по сильным землетрясениям.

В соответствии с [Осокина, 1987], причиной возникновения иерархии полей напряжений служит наличие в объеме различных неоднородностей и отвечающих им локальных полей, а условием обнаружения этой иерархии является использование различных масштабов осреднения. В МКА в качестве масштаба осреднения рассматриваются размеры областей упругих разгрузок [Ребецкий, 2007], которые напрямую зависят от размеров очагов и тем самым от энергии землетрясений и плотности задаваемой сетки расчета.

Нами были проведены расчеты полей тектонических напряжений для нескольких наборов диапазонов магнитуд. Поскольку в МКА при выполнении тектонофизической реконструкции по сейсмологическим данным область осреднения напряжений определяется размером области упругой разгрузки, возрастающей в степенной зависимости от величины магнитуды землетрясения [Ребецкий, 2007], то при выявлении принадлежности событий одному масштабному уровню необходимо в первую очередь определение верхнего предела по энергии вхождения события в выборку. Нижний энергетический предел для разных диапазонов магнитуд выбирался таким образом, чтобы в выборку попадали землетрясения с разбросом по магнитуде в 2—3 единицы (линейный размер одного масштабного уровня).

Как оказалось, при изменении верхнего предела в диапазонах $M_s = 5.3—4.3$ и $3.7—2.8$ наблюдаются относительно стабильные от выборки к выборке картины поля напряжений, в то время как для выборок, в которых верхним пределом являлись землетрясения с $M_s = 4.2—3.8$, проявляется постепенная изменчивость поля, вероятно, характеризующая тем самым переходную зону между двумя соседними масштабными уровнями.

В настоящей работе мы представляем результаты, которые были рассчитаны по землетрясениям двух диапазонов магнитуд: $5.3 \geq M_s \geq 3.8$ (82 афтершока) и $3.7 \geq M_s \geq 1.0$ (420 афтершоков). В соответствии с существующей в тектонофизике градацией тектонических полей напряжений и для удобства изложения будем называть их **локальным** (линейный размер осреднения до первых километров) и **субрегиональным** (линейный размер осреднения десятки километров) уровнями, отвечающих локальной геологической и крупной тектонической структурам соответственно [Ребецкий, 2009].

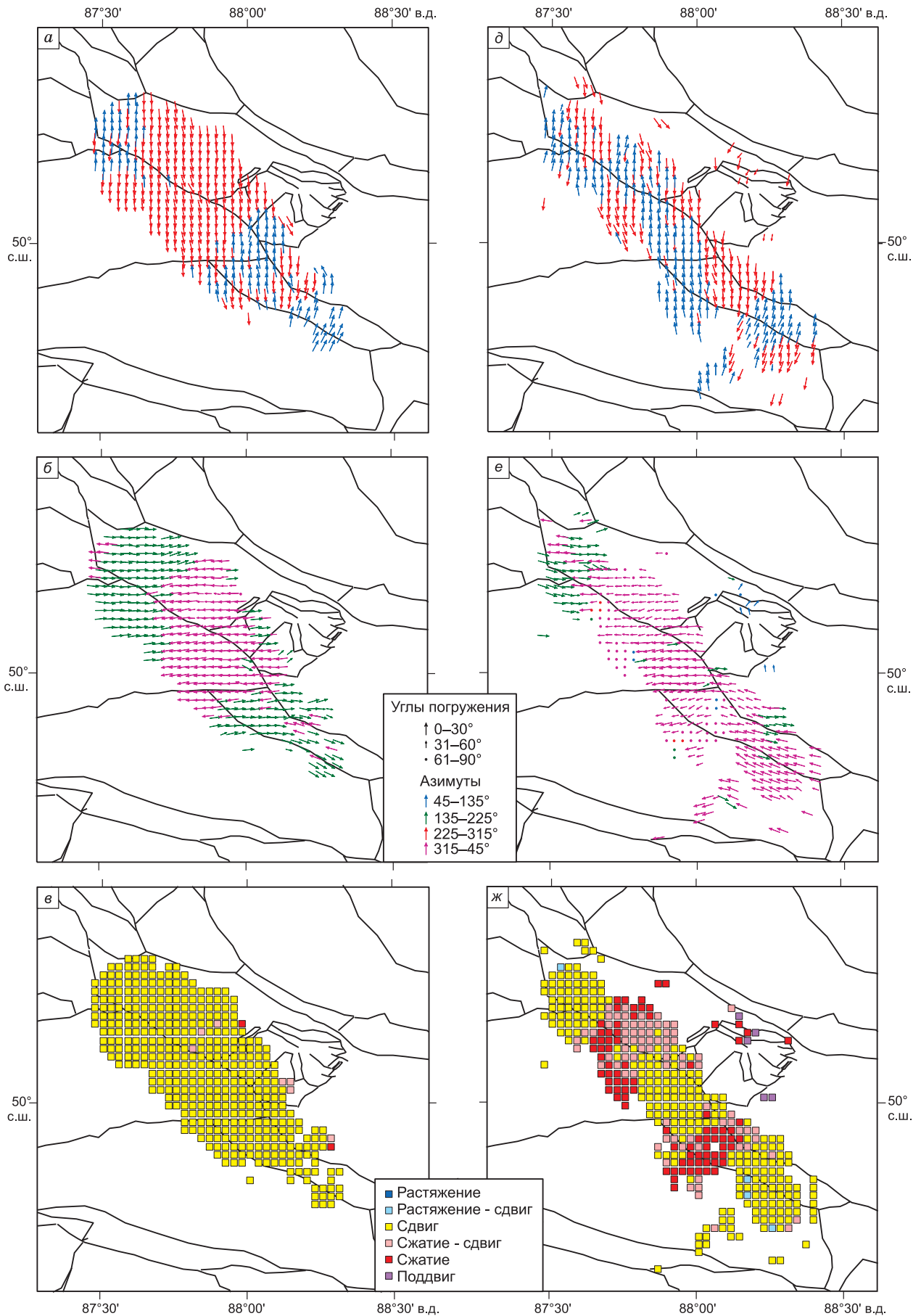
Некоторые результаты первого этапа реконструкции представлены на рис. 2 — проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного сжатия σ_3 и растяжения σ_1 , тип напряженного состояния и коэффициент Лоде—Надаи (μ_σ), определяющего вид тензора напряжений.

Субрегиональный уровень. По результатам реконструкции, выполненной по группе событий с $5.3 \geq M_s \geq 3.8$, оси максимального девиаторного сжатия σ_3 (см. рис. 2, а) преимущественно близгоризонтальны (с углами погружения $0—15^\circ$). В центральной части исследуемой зоны оси σ_3 направлены почти строго на юг (азимуты осей в основном $170—180^\circ$), а на юго-восточном и северо-западном окончаниях зоны выделяются области, в которых оси меняют свою ориентацию на северную, северо-северо-восточную ($350—25^\circ$). Примечательно, что резкая смена ориентации осей максимального девиаторного сжатия происходит в области инструментально определенного положения главного толчка Чуйского землетрясения. При анализе осей максимального девиаторного растяжения σ_1 (см. рис. 2, б) также обнаруживается четкая зона изменения ориентации осей σ_1 на обратную (с восточной на западную), но в области эпицентров двух крупнейших афтершоков — в центральной части Курайской впадины с заходом в Северо-Чуйский хребет. На юго-востоке активизированной области оси σ_3 и σ_1 меняют свою ориентацию на угол до 25° по отношению к основному направлению простирания осей (субмеридиональное для σ_3 и субширотное для σ_1) вдоль активизированной зоны.

Промежуточное главное напряжение σ_2 субвертикально, что в сочетании с субгоризонтальными σ_3 и σ_1 находит свое отражение в типе напряженного состояния — горизонтальный сдвиг вдоль всей афтершоковой области. Лишь в нескольких доменах определен другой тип напряженного состояния (горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом и чистое сжатие) (см. рис. 2, в). Геодинамическая обстановка горизонтального сдвига хорошо согласуется с геологическими данными о наличии сдвигового разлома [Новиков и др., 2008], вдоль которого и распространился афтершоковый процесс. Распределение значений коэффициента Лоде—Надаи, определяющего вид тензора напряжений, не так однообразно (см. рис. 2, г). Мы видим существование зон с положительными (центральная часть Курайской впадины) и отрицательными (в зоне разлома, разделяющего Южно-Чуйский и Северо-Чуйский хребты) значениями коэффициента.

Локальный уровень. Поле напряжений, полученное по группе событий $3.7 \geq M_s \geq 1.0$, характеризуется изменением типа напряженного состояния вдоль исследуемой зоны (см. рис. 2, ж). Выявляются две области горизонтального сжатия и горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом в центральной части границы Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом с заходом в Курайскую впадину и в се-

Рис. 2. Начало.



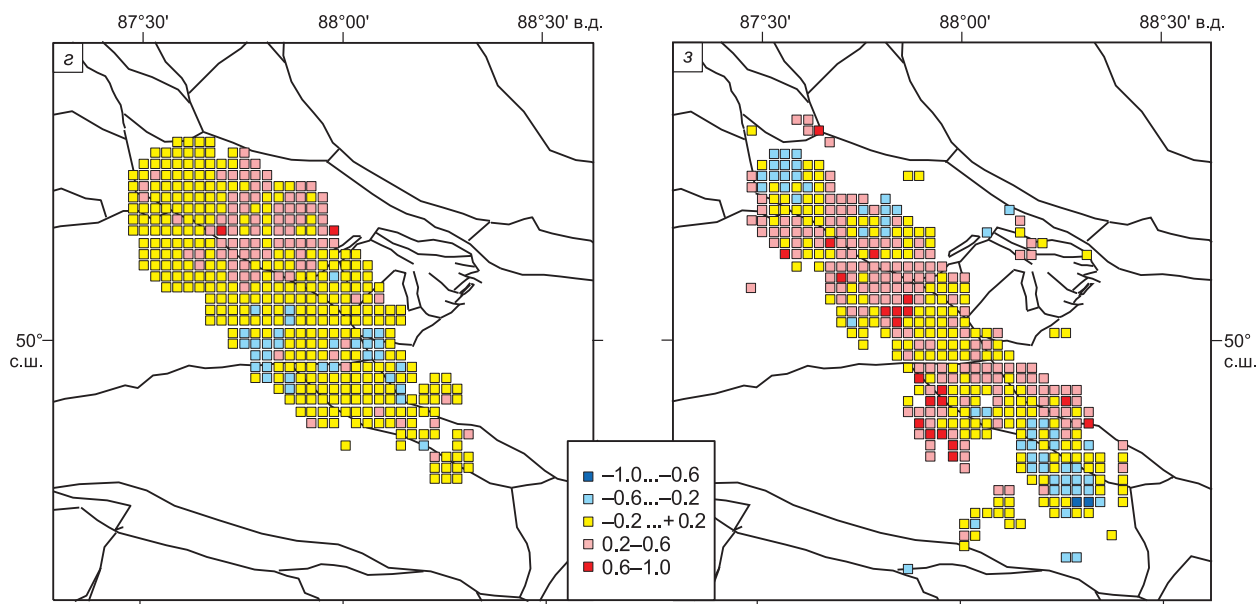


Рис. 2. Результаты первого этапа реконструкции по группе сильных $5.3 \geq M_s \geq 3.8$ (субрегиональный уровень) (а—г) и слабых событий $3.7 \geq M_s \geq 1.0$ (локальный уровень) (д—з).

Проекция на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного сжатия σ_3 (а, д) и растяжения σ_1 (б, е); тип напряженного состояния (в, ж) и вид тензора напряжений — коэффициент Лоде—Надаи μ_σ (з, з).

верной части Южно-Чуйского хребта (вблизи его границы с Северо-Чуйским хребтом). В центральной части афтершоковой зоны и на ее северо-западном и юго-восточном окончаниях определен режим преимущественно горизонтального сдвига за исключением некоторых доменов. В доменах, определенных для северной части Чаган-Узунского блока, тип напряженного состояния — поддвиг и горизонтальное сжатие.

Обстановка горизонтального сжатия подразумевает субвертикальное положение оси максимального девиаторного растяжения σ_1 и субгоризонтальное положение оси максимального девиаторного сжатия σ_3 , что мы и наблюдаем для указанных областей. Ориентация осей сжатия (см. рис. 2, д) субмеридиональна вдоль главного разлома и меняется на окончаниях и по периметру активизированной зоны. Ориентация близгоризонтальных осей растяжения (см. рис. 2, е) преимущественно западного направления в центральной части зоны и северо-западного — на юго-восточном ее окончании.

Распределение коэффициента Лоде—Надаи, полученное в результате реконструкции по группе событий локального уровня (см. рис. 2, з), более хаотично, чем субрегионального (см. рис. 2, з). Присутствуют зоны как с положительными (в основном центральная часть зоны афтершоков), так и с отрицательными (юго-восточное и северо-западное окончания) значениями коэффициента.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение параметров поля тектонических напряжений — важная составляющая в задаче исследования геодинамической обстановки сейсмоактивных геологических структур. При этом тектонические структуры различного масштабного уровня вносят свой вклад в напряженное состояние зоны. Сильные землетрясения, относящиеся к крупным геологическим структурам, несут информацию о характеристиках напряженного состояния среды в целом, в то время как слабые события указывают на более мелкие неоднородности в земной коре.

Полученные в результате реконструкции параметры полей напряжений для групп событий двух энергетических уровней позволяют говорить о выявлении иерархических закономерностей напряженного состояния земной коры в Чуйско-Курайской зоне. При этом в обоих случаях речь идет о локальных полях напряжений. Для оценки регионального поля исследуемой зоны должны использоваться данные о главном толчке и крупнейших афтершоках.

В механизмах очагов сильных землетрясений отражается разрушение больших масштабных геологических структур. Можно предполагать, что на следующем (более низком) иерархическом уровне геологическая структура более раздроблена, и эта раздробленность должна отражаться в изменении ти-

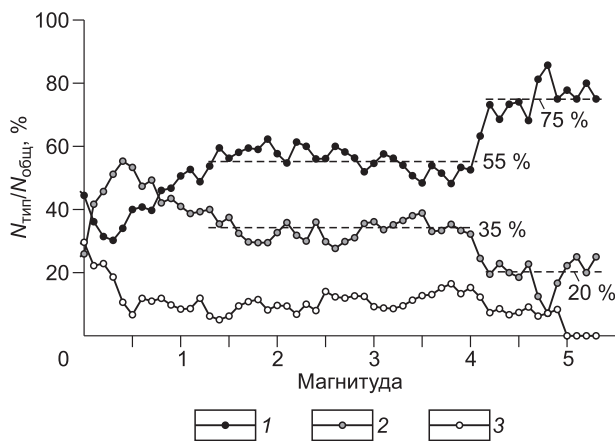


Рис. 3. Отношение числа землетрясений ($N_{\text{тип}}/N_{\text{общ}}$) с определенным типом механизма очага ($N_{\text{тип}}$) от общего числа событий ($N_{\text{общ}}$) для каждой магнитуды в окне $M \pm 0.2$.

1 — сдвиги, 2 — взбросы, 3 — сбросы.

сах, по углам погружения главных осей напряжения на сдвиги, взбросы и сбросы, минуя промежуточные типы [Лескова, Еманов, 2006]. Затем рассчитывалось процентное отношение числа землетрясений с определенным типом механизма очага ($N_{\text{тип}}$) от общего числа событий ($N_{\text{общ}}$) для каждой магнитуды. Для сглаживания и набора статистики фактически вычислялось значение $N_{\text{тип}}/N_{\text{общ}}$ для каждой магнитуды в скользящем окне $M \pm 0.2$ с шагом $0.1 M$ (рис. 3). К тому же размер окна в ± 0.2 — $0.3 M$ также соответствует точности определения магнитуд.

Из рисунка видно, что для событий в диапазоне магнитуд 4.2 — 5.3 характерным является сдвиг (около 75% от общего числа), взбросов порядка 20% ; начиная с $M_s = 4.0$ соотношение сдвигов и не сдвигов меняется и составляет примерно 55% и 35% соответственно и остается таковым до значения магнитуды 1 — 1.5 . Последующая нестабильность в графиках ниже магнитуды 0.5 позволяет только предполагать наличие еще одного иерархического уровня, но для однозначного утверждения этого недостаточного количества данных. При этом относительное число сбросов фактически не меняется во всем представленном ряду данных ($0.5 \leq M_s \leq 4.9$) и составляет в среднем 10% .

Таким образом, были выявлены два основных интервала стабильного соотношения числа землетрясений в зависимости от типа механизмов очагов: $1.3 \leq M_s \leq 4$ и $4.2 \leq M_s \leq 5.3$. Точка, соответствующая магнитуде $M_s = 4.1$, является как бы переходной между двумя уровнями. Эти интервалы с точностью до величины погрешности определения магнитуд соотносятся с выделенными независимо локальными полями напряжений, что может свидетельствовать о возможности применения данного подхода к анализу фокальных механизмов и выделению на их основании масштабных уровней поля тектонических напряжений.

Рассмотренные особенности напряженного состояния земной коры очаговой области Чуйского землетрясения, полученные по механизмам сильных событий, характеризуют общее поле напряжений афтершоковой зоны, о чем свидетельствует практически неизменный на протяжении всей зоны тип напряженного состояния — горизонтальный сдвиг, хорошо согласующийся с геологическими представлениями о наличии сдвигового разлома, вдоль которого и распространился афтершоковый процесс. При этом проявляются локальные изменения, такие как смена ориентации осей сжатия в районе эпицентра главного толчка Чуйского землетрясения и осей растяжения в области двух крупнейших афтершоков на противоположную, и их разворот на угол до 25° на юго-восточном окончании афтершоковой области.

Несколько хаотичная ориентация осей главных напряжений и существование зон горизонтального сжатия и сжатия со сдвигом (в Курайском хребте на границах Южно-Чуйского с Северо-Чуйским хребтов и Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом) на фоне горизонтального сдвига (в центральной части и окончаниях активизированной зоны), рассчитанных на основе механизмов очагов слабых событий, свидетельствует о локальном уровне поля напряжений. Отклонение осей от субгоризонтальной ориентации обусловлено структурными особенностями исследуемой области.

Проследим пространственную связь локального поля напряжений с поэлементным строением афтершоковой области. На рис. 4 одновременно нанесены тип напряженного состояния (геодинамический режим), изолинии плотности землетрясений и границы четырех основных элементов структуры, по [Еманов и др., 2009]. Расчет плотности эпицентров сейсмических событий производился на основе высокоточных данных о положении землетрясений в узлах сетки 2×2 км с перекрытием 1 км. Изолинии проведены с шагом 50 , начиная с 10 .

Согласно рис. 4, зоны преимущественно горизонтального сжатия находятся в переходных областях между двумя элементами: I и II, III и IV. Элемент II структуры афтершоковой области пространственно располагается в зоне горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом в центральной части и го-

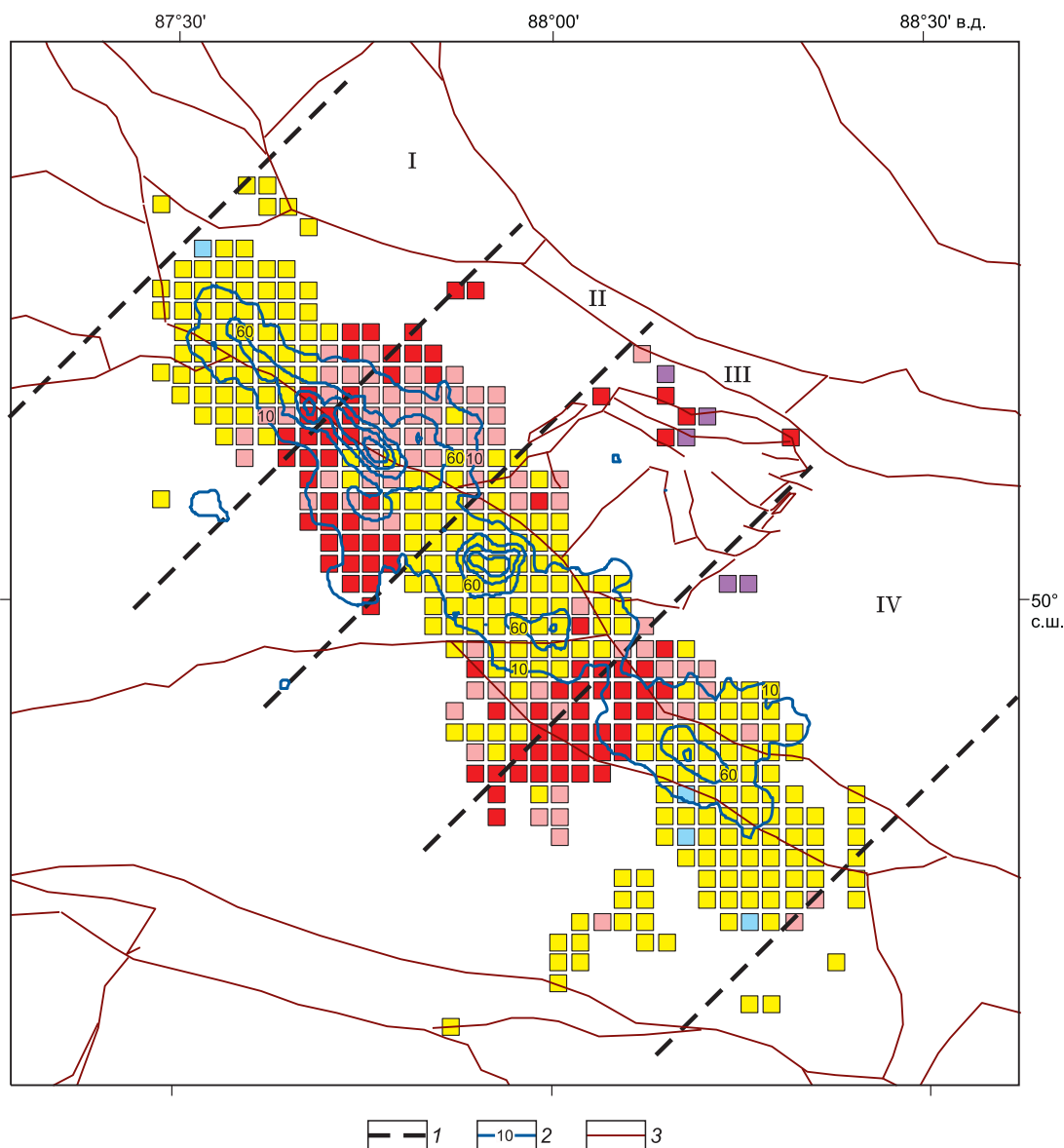


Рис. 4. Сравнение результатов реконструкции (тип напряженного состояния локального уровня поля напряжений) с пространственной структурой афтершоковой области.

1 — границы элементов структуры (I—IV), по [Еманов и др., 2009]; 2 — изолинии плотности землетрясений; 3 — разломы. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2, в, ж.

ризонтального сжатия на южном его окончании. Именно этот элемент стал «стартовым» для удлинения афтершоковой области на северо-запад в результате афтершока 1 октября 2003 г. с магнитудой $M_s = 6.6$ [Еманов и др., 2009].

Изменение типа механизмов очагов было отмечено в нашей работе [Лескова, Еманов, 2006], когда мы говорили о приуроченности механизмов очагов афтершоков к элементам структуры. В данном случае показана взаимосвязь элементов структуры афтершоковой области с тектоническим полем напряжений.

В результате проведенного исследования показана роль иерархичности структуры геологической среды и необходимость выделения ее масштабных уровней в задачах восстановления поля тектонических напряжений.

Современные возможности изучения сейсмичности в огромном диапазоне энергий с использованием плотных сетей станций позволяют быстро накопить информацию о сейсмичности региона на разных иерархических уровнях, а разработки и постоянное совершенствование программных комплексов для расчета полей тектонических напряжений таких, как метод катакластического анализа Ю.Л. Ребец-

кого [2007], позволяют быстро и качественно производить расчеты. Но при этом появляется необходимость более аккуратного подхода к анализу исходного сейсмологического материала и к формированию выборок землетрясений для осреднения.

Детальная информация о характере напряженно-деформированного состояния земной коры на разных масштабных уровнях необходима при решении целого ряда научных и практических задач, связанных с изучением сейсмического режима, моделированием очага сейсмического события и процессов, сопровождающих землетрясения, а также с выявлением факторов воздействия опасных природных ситуаций на гражданские и промышленные объекты.

ВЫВОДЫ

На основе детального изучения афтершокового процесса Чуйского землетрясения с использованием временных сетей станций установлена иерархия поля тектонических напряжений для событий разных энергий: для афтершоков с $5.3 \geq M_s \geq 3.8$ вся область проявляет себя как однородная по типу напряженного состояния (горизонтальный сдвиг), а для землетрясений с $3.7 \geq M_s \geq 1.0$ тип напряженного состояния для этой же области изменяется в соответствии с блоковой структурой.

По данным о сильных землетрясениях отмечается смена ориентации осей сжатия в районе эпицентра главного толчка Чуйского землетрясения и осей растяжения в области двух крупнейших афтершоков на противоположную.

Поворот осей сжатия и растяжения на угол до 25° на юго-восточном окончании зоны отмечается как по сильным, так и по слабым афтершокам.

Авторы выражают благодарность Ю.Л. Ребечкому за предоставленную программу, подробные объяснения по основам метода катакластического анализа и полезные обсуждения, А.Ф. Еманову — за конструктивные замечания и неоценимую помощь на всех стадиях исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке программы РАН ОНЗ-7 (проект 4), фундаментальных исследований Президиума РАН (проект 4.1), интеграционных проектов СО РАН № 54, 100.

ЛИТЕРАТУРА

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 536 с.

Гольдин С.В., Кучай О.А. Сеймотектонические деформации Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы коллизивно-блочной геодинамики // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 692—723.

Гольдин С.В., Кучай О.А. Сеймотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика, 2008, т. 11, № 1, с. 5—13.

Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Докл. АН СССР, 1975, т. 225, № 3, с. 557—560.

Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М., Наука, 1979, с. 26—51.

Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика, 2009, т. 12, № 1, с. 29—36.

Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Семин А.Ю., Рубцова А.В., Демидова А.А. Детальные сейсмологические исследования эпицентральной зоны Чуйского землетрясения 27.03.2003 г., $M_s = 7.3$ (Алтай) и района будущего водохранилища Чибитской ГЭС // Землетрясения России в 2008 году. Обнинск, ГС РАН, 2010, с. 97—101.

Еманов А.Ф., Колесников Ю.И., Селезнев В.С., Еманов А.А., Филина А.Г., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Болдырев М.А., Кабанник А.В., Корабельщиков Д.Г., Лескова Е.В., Янкайтис В.В., Ярыгина М.А. Алтайский сейсмологический полигон: начальный этап становления и первые результаты // Проблемы сейсмологии III тысячелетия: Материалы международной геофизической конференции, г. Новосибирск, 15—19 сентября 2003 г. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, с. 138—144.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Физическая мезомеханика, 2005, т. 8, № 1, с. 49—64.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмический мониторинг в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (Алтай) // Землетрясения России в 2005 году. Обнинск, ГС РАН, 2007, с. 53—60.

Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 20—30.

Лескова Е.В., Еманов А.А. Характер деформаций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27 сентября 2003 г., $K = 17$, Горный Алтай) по данным анализа фокальных механизмов афтершоков // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 1, с. 51—55.

Муди Дж.Д., Хилл М.Дж. Сдвиговая тектоника // Вопросы современной зарубежной тектоники. М., Изд-во иностр. лит., 1960, с. 265—333.

Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (11), с. 1139—1149.

Осокина Д.Н. Об иерархических свойствах тектонического поля напряжений и деформаций в земной коре // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., Наука, 1987, с. 136—151.

Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., Наука, 1987, с. 74—119.

Ребецкий Ю.Л. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии и Океании // Докл. РАН, 1997, т. 354, № 1, с. 101—104.

Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Докл. РАН, 1999, т. 365, № 3, с. 392—395.

Ребецкий Ю.Л. Принципы мониторинга напряжений и метод катакластического анализа совокупностей сколов // Бюл. МОИП. Сер. геол. 2001, т. 76, № 4, с. 28—35.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М., ИЦК «Академ-книга», 2007, 406 с.

Ребецкий Ю.Л. Тектонофизические основы изучения напряжений и деформаций в земной коре // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы первой молодежной тектонофизической школы-семинара, г. Москва, 21—24 сентября 2009 г. М., ИФЗ РАН, 2009, с. 231—257.

Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Сычева Н.А. Метод катакластического анализа разрывных нарушений и результаты расчетов современного напряженного состояния вблизи границ плит и для внутриплитовых складчатых орогенов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции, г. Москва, 13—17 октября 2008 г. М., ИФЗ РАН, 2009, с. 340—366.

Ризниченко Ю.В. О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры. М., Наука, 1965, с. 56—63.

Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М., ОИФЗ РАН, 2002, 130 с.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М., Наука, 1991, 96 с.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск, Наука, 1983, 112 с.

Шерман С.И., Сорокин А.П., Савитский В.А. Новые методы классификации сейсмоактивных разломов литосферы по индексу сейсмичности // Докл. РАН, 2005, т. 401, № 3, с. 395—398.

Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М., Наука, 1990, 192 с.

Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии // Изв. РАН. Физика Земли. 1996, № 12, с. 37—58.

Klein F.W. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. Open-File Report, 02-171. U.S. Geol. Surv., 2002, 123 p.

Reasenber P.A., Oppenheimer D. FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. Open-File Report, 85-739. U.S. Geol. Surv., 1985, 109 p.