

УДК 550.34

МЕХАНИЗМЫ АФТЕРШОКОВ 2004–2005 гг. И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ АЛТАЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 г.

© 2012 г. Х.М. Омар, С.С. Арефьев, Ю.Л. Ребецкий

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

Алтайское землетрясение 27 сентября 2003 г. – сильнейшее среди произошедших на территории России в последние десятилетия. В очаговой зоне землетрясения летом 2004 и 2005 гг. Лабораторией сильных землетрясений ИФЗ РАН были установлены 12 цифровых сейсмических станций, зарегистрировавших за два полевых сезона более 2 тыс. афтершоков. Для определения механизма очагов афтершоков по знакам первых вступлений *P*-волны и реконструкции напряжений было отобрано 110 событий, каждое из которых зарегистрировано на восьми и более станциях.

Показано, что основным геодинамическим режимом в районе исследований является режим горизонтального сжатия и сдвига в вертикальной плоскости, характерный для глыбовых механизмов горообразования.

Ключевые слова: механизмы афтершоков, напряжения.

Введение

Алтайское землетрясение 27 сентября 2003 г.¹ – сильнейшее на территории Центральной России за последние десятилетия – произошло вдоль Курайского и Южно-Чуйского разрывов, активизировав сейсмогенные структуры в пределах восточной части Ануйско-Чуйского синклинория и южных участков Холзунско-Чуйского антиклинория. Гипоцентр землетрясения находился в пределах юго-западного сегмента Чаган-Узунского блока. По данным Геофизической службы РАН землетрясение имело магнитуду $M_s=7.3$ (Сейсмологическая обсерватория Гарвардского университета дает значение $M_w=7.0$). Протяженность разрывов на поверхности, установленная по результатам сеймотектонического обследования района землетрясения [Рогожин и др., 2004], составляет около 65 км. По результатам анализа афтершоковой последовательности этого землетрясения [Арефьев и др., 2006] определены размеры его очага: длина разрыва достигает 75 км, максимальная ширина – 20 км, вертикальная протяженность – 17 км; установлено, что средняя подвижка по разрыву в очаге составила 2.5 м.

С 25 июля по 01 сентября 2004 г. 12 цифровых сейсмических станций, размещенных Лабораторией сильных землетрясений ИФЗ РАН в очаговой зоне Алтайского землетрясения, зарегистрировали более 1.5 тыс. афтершоков. Для создания каталога механизмов очагов землетрясений из них были отобраны записи 82 афтершоков, записанных с хорошим качеством десятью и более станциями.

Наблюдения в очаговой зоне были продолжены в 2005 г. С 11 августа по 14 сентября те же станции зарегистрировали около 500 афтершоков. Для определения их механизмов были отобраны 28 событий, зарегистрированных на восьми и более станциях.

¹ В работах новосибирских сейсмологов, например в [Гольдин и др., 2004], исследуемое землетрясение именуется Чуйским.

Таким образом, в суммарный каталог механизмов очагов афтершоков Алтайского землетрясения вошли 110 событий, зарегистрированных в 2004–2005 гг.

Ранее в исследуемом регионе были выполнены работы по изучению сейсмического режима, предшествовавшего Алтайскому землетрясению 2003 г. [Лутиков, Донцова, Юнга, 2004 а,б], и изучалось напряженное состояние перед ним по данным о механизмах очагов [Гольдин, Кучай, 2008].

Цель настоящей работы – представление результатов определения механизмов афтершоков Алтайского землетрясения 2003 г., изучение сейсмогенной структуры его очаговой области и анализ напряженного состояния в период афтершоковой последовательности.

Тектоника и сейсмичность района исследований

Область подготовки Алтайского землетрясения лежит в пределах Алтае-Саянской горно-складчатой области, входящей в Урало-Монгольский (Центрально-Азиатский) складчатый пояс, который протягивается от Урала до побережья Тихого океана и занимает промежуточное положение между горно-складчатыми системами Средней Азии (Тянь-Шань и Памир) и системами Байкальского рифтогенеза. Структуры, в пределах которых находилась область подготовки землетрясения (Горный Алтай и Салаиро-Ануйско-Чуйская складчатая система), отличаются сложным геологическим строением. Составными элементами мегантиклинория Горного Алтая на севере являются Талицкий антиклинорий и Чарышский синклинорий; в центральной его части находятся Теректинский блок и Коргонский грабенсинклинорий; южнее расположен Холзунско-Чуйский антиклинорий. Складчатые и разрывные структуры сооружений Горного Алтая в основном имеют северо-западное простирание; только в южной части (в Холзунско-Чуйском антиклинории) преобладает субширотное простирание складок.

Предоставленные в работе [Трифонов и др., 2002] данные позволяют выделить группу наиболее крупных активных на современном этапе разрывных структур, среди которых представлены как разломы с выраженной взбросовой компонентой смещения, так и разломы с преимущественно сдвиговой компонентой. Крупные разрывные структуры со сбросовой компонентой смещения наблюдаются в северном и южном обрамлениях Алтая. Описание активных разрывов Алтае-Саянской горно-складчатой области дается в работах [Аржанников, 2003; Мирошниченко и др., 2003; Имаев и др., 2006; Аржанников, Аржанников, 2006].

Скорость сдвиговых смещений вдоль большинства крупных разломов Монгольского Алтая и Саян по данным GPS-геодезии [Саньков и др., 2006] оценивается в 1–4 мм/год. Поле векторов горизонтальных смещений свидетельствует о косо́й конвергенции (со скоростью около 6 мм/год) блоков Монгольского Алтая, выделяемых по системам разломов.

Согласно данным, приводимым в [Трифонов и др., 2002], в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения выделяются Южно-Чуйский и Курайский разломы, погружающиеся соответственно на юг и юго-запад под Северо-Чуйский хребет и ограничивающие с юга Курайскую и Чуйскую межгорные впадины. Сарасинско-Курайский разлом является продолжением Курайского к северу. Южно-Чуйский разлом имеет взбросовую кинематику смещения, в то время как Курайский и Сарасинско-Курайский являются сбросами. Курайско-Чуйская система разломов представляет собой пологие надвиги, погружающиеся под Курайский хребет и ограничивающие Чуйскую впадину с северо-востока.

Геофизические данные [Баталева и др., 2007] дают основания говорить о наличии жесткого приподнятого Чаган-Узунского блока, разделяющего фрагмент Ануйско-Чуйского синклинория на Курайскую и Чуйскую впадину. Согласно концепции

С.В. Гольдина, высказанной им в серии устных докладов, малое вращение этого блока по часовой стрелке стало источником напряжений, реализовавшихся в очаге Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г. По геофизическим данным, представленным в названной выше работе, в коре Курайской и Чуйской впадин выделяется двумерная структура проводящих объектов с осью однородности, ориентированной в запад–северо-западном направлении. Эта структура состоит из корового проводящего субгоризонтального слоя, залегающего на глубине 20 км, и субвертикальных проводников, распространяющихся от поверхности до проводящего слоя. Наблюдается приуроченность крупных разломных зон к выходам наклонных и субвертикальных электропроводящих зон и совпадение ориентации электромагнитных параметров с азимутами простираения главных разломов. Эти же данные позволяют говорить о повышенной флюидонасыщенности горных пород Чуйской и Курайской впадин, разломов, имеющих преимущественно юго-западное погружение, и о наличии на глубине около 20 км флюидонасыщенного слоя мощностью до 10 км. В нижней коре и подкоровой литосфере непосредственно под гипоцентром Алтайского землетрясения 2003 г. прослеживается обширная область пониженного электрического сопротивления. У разломов, выделяемых по геофизическим данным, с глубиной изменяются углы погружения – если в верхней части коры на глубинах до 1 км разломы крутые и субвертикальные, то в интервале глубин от 1 до 7 км становятся более пологими (углы падения 45–60°).

Исследуемый район – Чуйская и Курайская впадины с расположенным между ними Чаганузунским блоком – находится в западной части Алтая. Первые сведения о сейсмичности района относятся к середине XVIII века [Татевосян, 2003]. Среди известных событий выделяются следующие наиболее крупные землетрясения: Монгольское 1761 г., Болнайское 1905 г. с зоной разрывов на поверхности до 320 км, Монголо-Алтайское 1931 г. с длиной разрывной зоны в 200 км [Новый..., 1977], Зайсанское 1990 г. [Юнга, Рогожин, 2000; Дядьков, Кузнецова, 2008], Бусингольское 1991 г. [Гольдина, Кучай, 2008].

Алтайское землетрясение с магнитудой $M_s=7.3$, произошедшее в 2003 г., вполне соответствует прогнозным оценкам по карте ОСР-97 [Комплект..., 1999].

Исходные данные и методы обработки

Полевые наблюдения 2004–2005 гг.

Схема расположения станций временной сети, созданной Лабораторией сильных землетрясений ИФЗ РАН в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения, представлена на рис. 1.

Наблюдения проводились с использованием четырех автономных станций, созданных в ИФЗ РАН на базе цифрового 24-битного сейсмического автоматического регистратора СЕЙСАР-1 с датчиками типа СМ и КМВ; восьми станций, входящих в радиотелеметрическую систему регистрации землетрясений производства США с датчиками типа СМ и КМВ; пяти автономных акселерографов *SMACH* производства Швейцарии.

Полевые наблюдения показали в целом хорошую работоспособность всего аппаратного комплекса. Ряд сбоев в работе отдельных станций не повлиял на функционирование всей системы. Следует подчеркнуть, что в условиях высокой сейсмической активности можно быстро выявлять слабые места в организации наблюдений и в работе аппаратного комплекса и оперативно их устранять.

Как уже отмечалось выше, в 2004 г. с конца июня по начало сентября было зарегистрировано более 1500 событий [Арефьев и др., 2006]; в 2005 г. – около 500. Надо заметить, что снижение сейсмической активности в очаге Алтайского землетрясения происходило гораздо медленнее, чем это бывает обычно после землетрясений такого уровня.

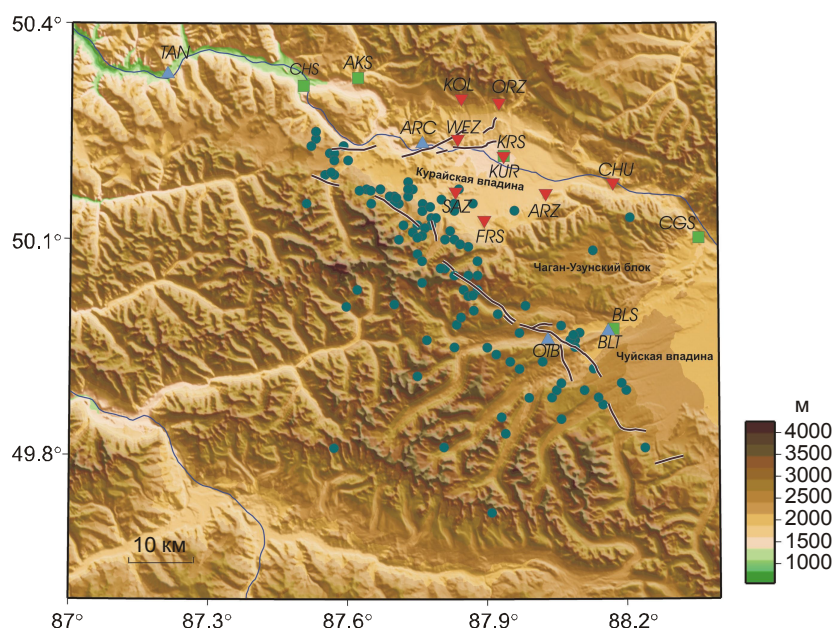


Рис. 1. Схема расположения в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения 2003 г. станций временной сети, созданной Лабораторией сильных землетрясений ИФЗ РАН, и эпицентров 110 афтершоков, отобранных для определения механизмов их очагов. Красные треугольники – станции телеметрической регистрации, синие – станции СЕЙСАР-1; зеленые квадраты – акселерографы *SMASH*. Кружки – эпицентры афтершоков. Прерывистые линии – разрывы на поверхности по [Рогожин и др., 2004]

Метод обработки. Сейсмограммы размечались и обрабатывались с помощью программы *seipick*. Результаты обработки сохранялись в файле *pils*, который затем переводился в формат *Нуро71* с помощью программы *pil2hur*. Для расчета гипоцентров землетрясений по программе *Нуро71* использовалась 12-слойная скоростная модель, представленная в табл. 1 [Арефьев и др., 2005].

Таблица 1. Скоростная модель коры района исследований

	Слой											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глубина (H , км)	0	2	4	8	10	13	18	23	32	37	42	51
Скорость (V_P , км/с)	4.5	5.67	5.83	5.86	6.01	6.25	6.56	6.7	6.8	6.9	7.1	8.2

Отметим, что большинство станции временной сети расположено к северо-востоку от облака зарегистрированных афтершоков. Однако наличие станции *ОТВ* в крайней западной части Чуйской межгорной впадины к югу от Чаган-Узунского блока (см. рис. 1) позволяет считать хорошим окружение станциями для значительной части афтершоков. Максимальные значения *RMS* для рассчитанных гипоцентров афтершоков не превышали 0.2. Результаты локации афтершоков показали, что их расположение в пространстве находится в хорошем соответствии с выходом разрыва в очаге землетрясения на дневную поверхность (см. рис. 1), представленным в работе [Рогожин и др., 2004].

Данные о распределении гипоцентров событий за оба года наблюдений в слоях коры, характеризующихся разными скоростями сейсмических волн, приведены в табл. 2. Отметим, что наибольшее число гипоцентров (35) приходится на глубины 4–8 км, где скорость $V_P=5.83$ км/с. Самым глубоким был очаг землетрясения, зарегистрированного 14.08.2004 г. в 09:51:26 с магнитудой $M_L=3.9$, – очаг расположен на глубине 17.2 км, где $V_P=6.25$ км/с; тип механизма данного очага определен как взбросовый.

Таблица 2. Распределение гипоцентров в слоях коры

Глубина (H , км)	0–2	2–4	4–8	8–10	10–13	13–18
Скорость (V_p , км/с)	4.5	5.67	5.83	5.86	6.01	6.25
Число гипоцентров	7	18	35	16	19	15

Для определения механизмов афтершоков использовалась созданная А.В. Ландером программа *FA* [Комплекс..., 2004]. Выше уже было отмечено, что сейсмостанции расположены с одной стороны от афтершоковой области, что влияет на качество определения механизмов анализируемых событий. В связи с этим нами при определении механизмов использовались только те события, для которых удавалось достаточно уверенно выделять нодальные плоскости. На рис. 2 приведен пример решения с помощью программы *FA* обратной задачи сейсмологии – определения механизма очага по знакам вступления P -волны – для двух афтершоков. В результате применения программы *FA* были получены данные о простирании и падении двух нодальных плоскостей, а также о направлениях подвижек вдоль них.

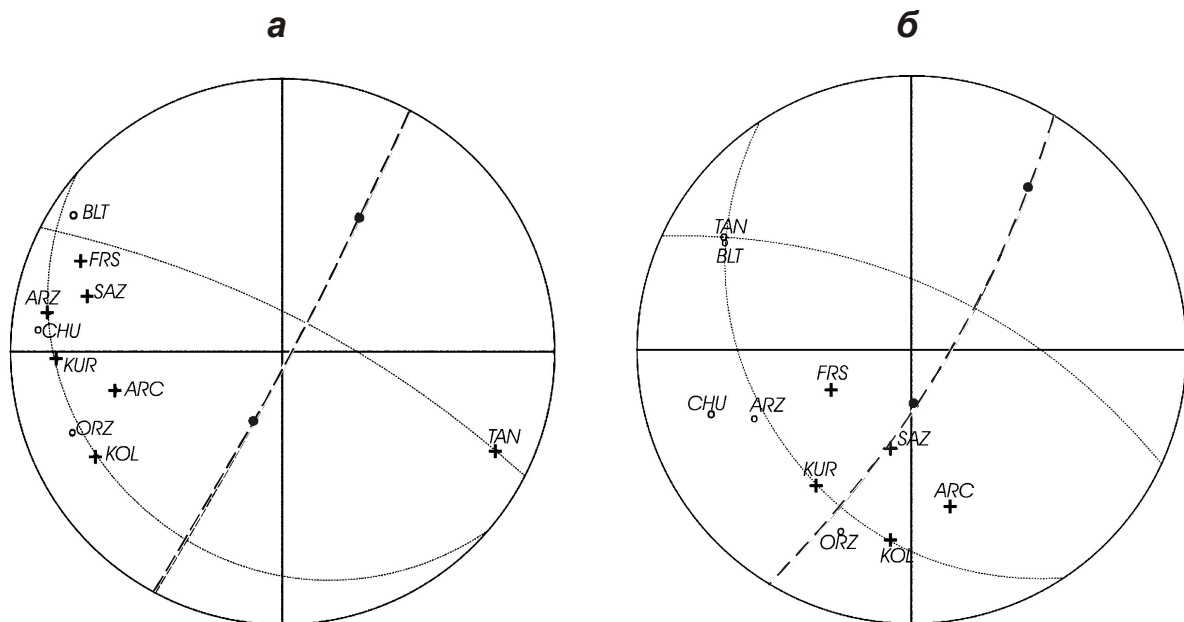


Рис. 2. Пример определения механизмов очагов по знакам первых вступлений P -волны для двух афтершоков, зарегистрированных 25.06.2004 г. в 16:47:17 с $M_L=2.7$ (а) и 25.06.2004 г. в 17:41:09 с $M_L=2.8$ (б). Крестиками отмечены первые вступления волны растяжения, кружочками – волны сжатия. Тонкие линии – нодальные плоскости; утолщенная пунктирная линия – плоскость, содержащая главные оси сжатия и растяжения (выход осей отмечен двумя черными точками)

Видно, что для первого афтершока (рис. 2, а) механизм очага отвечает взбросу. Обе его нодальные плоскости достаточно закреплены: положение пологой плоскости ограничивают шесть станций, субвертикальной – три; возможности для вариаций плоскостей незначительны. Для второго события (рис. 2, б) более пологая плоскость также хорошо закреплена (пять станций), но субвертикальная имеет определенную свободу положения – ее простирание может измениться на $25\text{--}30^\circ$, но вариации погружения ограничены требованием выполнения ортогональности пологой нодальной плоскости. Это означает, что установленный тип механизма – взброс – останется неизменным.

Механизмы очагов афтершоков Алтайского землетрясения

Типизация механизмов афтершоков. Для разделения механизмов очагов афтершоков по типам (сдвиг, взброс, сброс) использовались и стандартная, принятая в сейсмологии классификация по углам погружения главных осей напряжения (табл. 3), и схема разделения, применяемая, как правило, для выделения различных геодинамических режимов деформирования при анализе напряженного состояния [Ребецкий, 2007].

Таблица 3. Типизация механизмов очагов землетрясений по углам погружения главных осей напряжения

Углы погружения	Сдвиги	Взбросы	Сбросы
Ось сжатия	$<45^\circ$	$\leq 45^\circ$	$\geq 45^\circ$
Ось растяжения	$<45^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\leq 45^\circ$

С использованием табл. 3 было получено следующее распределение по типам механизмов очагов афтершоков, зарегистрированных в ходе полевых работ:

2004 г.: *взбросы* – более половины (61%) от общего числа событий (50 событий); *сбросы* – 26 событий (32%); *сдвиги* – 6 событий (7%);

2005 г.: *взбросы* – 18 событий (64%); *сбросы* – 6 событий (22%); *сдвиги* – 4 (14%).

Представленное на рис. 3 пространственное распределение афтершоков с механизмами разных типов показывает, что механизмы очагов, характеризующиеся как сдвиги, находятся только в средней части исследуемого района – вблизи Чаган-Узунского блока (рис. 3, в), а взбросы (рис. 3, а) и сбросы (рис. 3, б) распространены по всей территории. На рис. 3, г показаны эпицентры афтершоков из каталога механизмов на фоне усредненной топографии в масштабе 5–8 км. Можно видеть, что сильные афтершоки сконцентрированы в коре Курайской и Чуйской впадин и не попадают в область ближайшего окружения Чаган-Узунского блока

Следует заметить, что схема типизации механизмов очагов по табл. 3 очень упрощенная. Как отмечалось выше, возможен и другой подход, иллюстрируемый рис. 4. Трехмерный рисунок дан в аксонометрии, взгляд наблюдателя направлен вдоль октаэдрической оси. На поверхности октанта показаны линии, разделяющие ее на шесть секторов. Первые три сектора выделяются конусами с углами 30° , проведенными вокруг трех главных осей, и соответствуют трем основным типам механизмов: сектор 1 (*сброс*) – ось *T* субгоризонтальна, ось *P* субвертикальна; 3 сектор (*сдвиг*) – ось *N* субвертикальна; сектор 5 (*взброс*) – ось *P* субгоризонтальна, ось *T* субвертикальна. Три других типа механизмов землетрясений являются промежуточными: секторы 2 и 4 – сочетание сдвига со сбросом или с взбросом; сектор 6 – взрез вдоль субвертикальной нодальной плоскости или поддвиг по субгоризонтальной.

Если использовать подход, представленный на рис. 4, то распределение событий по типам механизмов будет несколько иным, чем полученное выше. Из событий 2004 г. к *взбросам* будут отнесены 33 афтершока (40%); к *сбросам* – 13 афтершоков (16%), *сдвигам* – 6 афтершоков (7%). При этом число афтершоков с промежуточными типами механизмов (между взбросом и сдвигом или сбросом и сдвигом) составит около 6% (5 событий). На этом фоне резко выделяется *взрез*, тип механизма, для которого наклон осей *P* и *T* к горизонту близок к 45° ($\pm 15^\circ$) – таких событий 25, что составляет 30% от общего их числа.

В результате типизации механизмов афтершоков по схеме, приведенной на рис. 4, а, число “чистых” сбросов сократилось вдвое по сравнению с результатами, полученными с использованием табл. 3 – с 32% до 16%. Число взбросов уменьшилось на треть, а число промежуточных (взрезных) механизмов оказалось сопоставимым с взбросами.

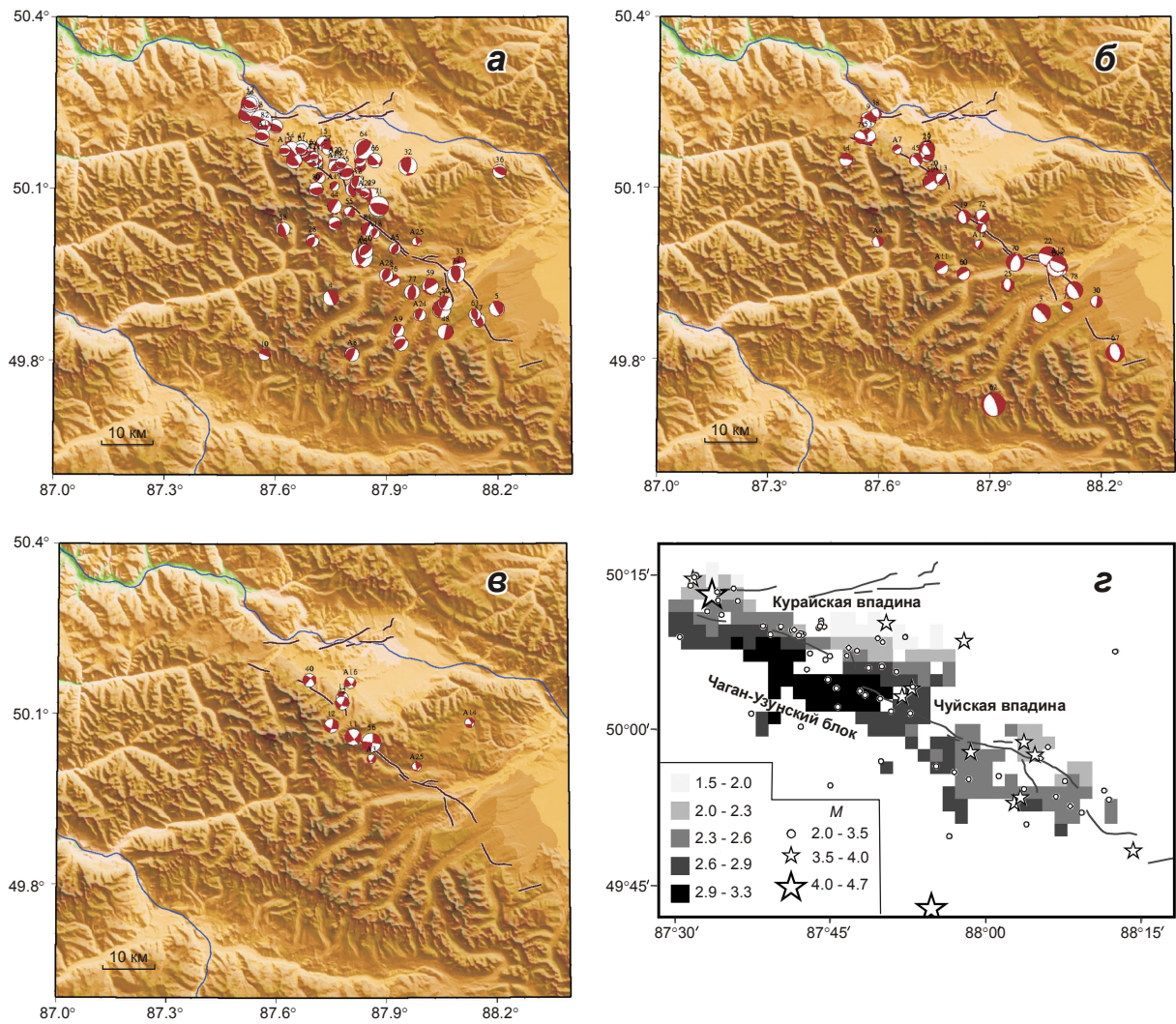


Рис. 3. Пространственное распределение в исследуемом районе афтершоков с разными типами фокальных механизмов: *а* – взбросы, *б* – сбросы, *в* – сдвиги, *г* – распределение эпицентров афтершоков на фоне усредненной (5–8 км) топографии (шкалу см. на рисунке). *M* – магнитуды событий. Здесь и далее для изображения на карте эпицентров и механизмов очагов землетрясения использована программа *GMT*

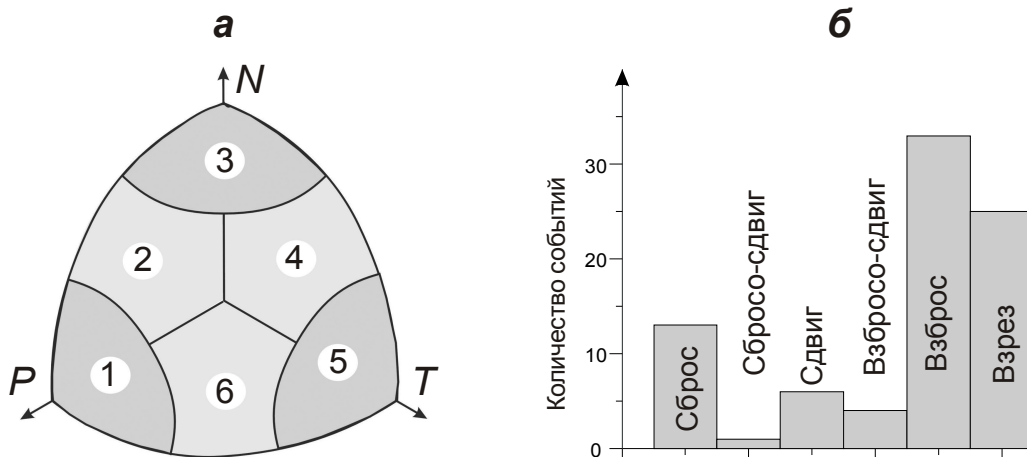


Рис. 4. Схема типизации механизмов афтершоков в зависимости от ориентации оси на зенит внутри октанта, образованного тремя осями напряжений, сброшенных в очагах землетрясений (*а*), и результаты типизации по ней механизмов очагов рассматриваемых афтершоков (*б*). *P* – ось сжатия, *T* – ось растяжения, *N* – ось промежуточного напряжения. Пояснения см. в тексте

Взрезовым механизмам отвечает субвертикальное положение одной из нодальных плоскостей с возможным отклонением от строгой вертикальности на 15° . Такого типа трещины могут формироваться в достаточно мощной по ширине зоне разлома, имеющей общее вертикальное погружение [Шерман, Борняков, Буддо, 1983; Семинский, 1986; Борняков, 1988].

Самыми сильными в 2004 и 2005 гг. были афтершоки, зарегистрированные 12.08.2004 г. в 16:51:44 ($M_L=4.6$, тип механизма очага – сброс; очаг на глубине 7 км в слое с $V_P=6.25$ км/с); второй – 27.06.2004 г. в 09:28:58 ($M_L=4.2$, тип механизма очага – взброс; глубина очага – 7 км, $V_P=6.25$ км/с)

Вся область исследований была разделена нами на три сегмента: северо-западный (запад Курайской впадины), центральный (вблизи Чаган-Узунского блока) и юго-восточный (запад Чуйской впадины). Для каждого из этих сегментов на рис. 5, а, б, в приведены карты механизмов очагов афтершоков за 2004–2005 гг. На рис. 5, г представлены механизмы очагов афтершоков по данным сейсмологической обсерватории Гарвардского Университета.

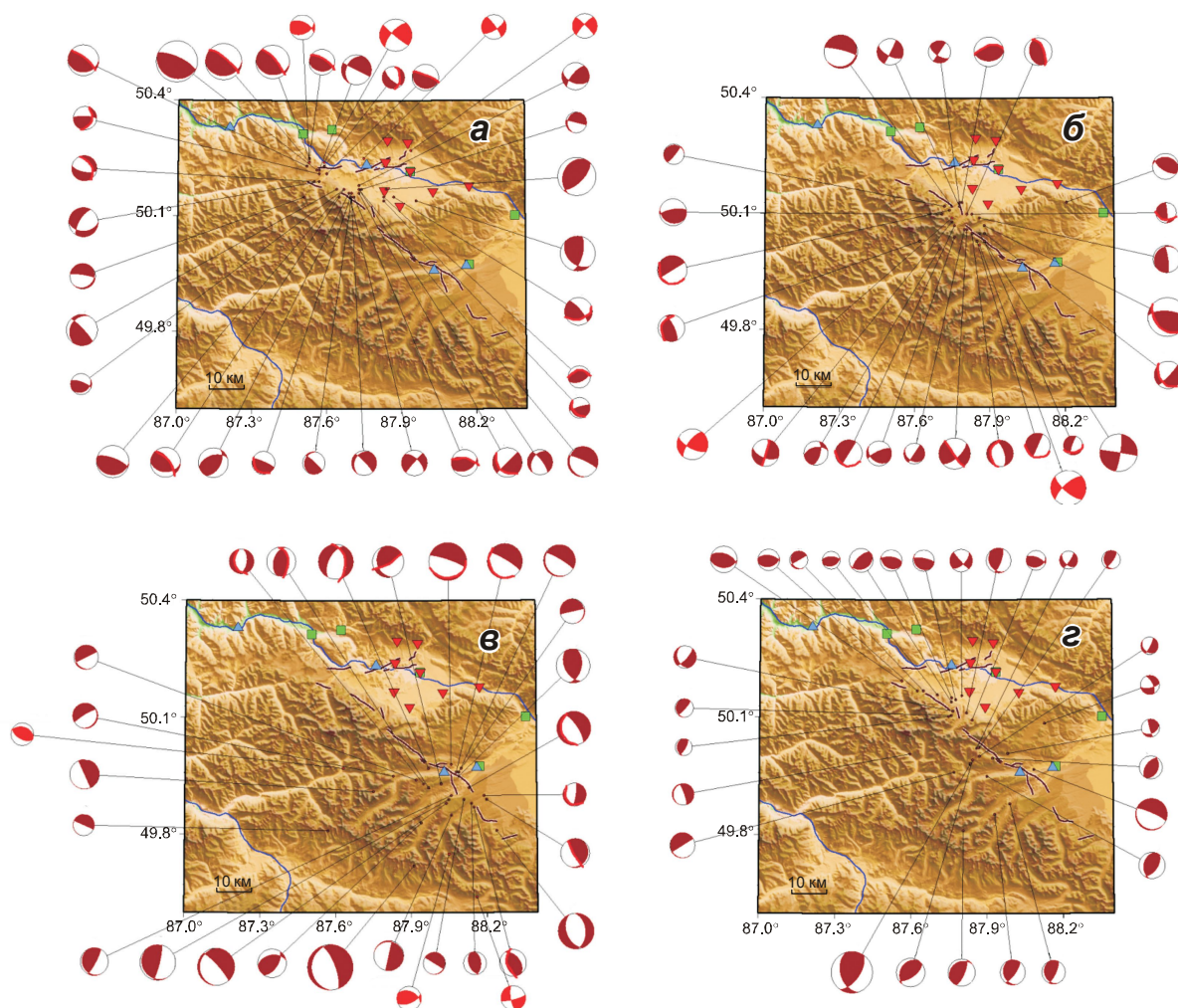


Рис. 5. Карты механизмов очагов афтершоков на Алтае 2004–2005 гг. (темно-красная заливка) и механизмов очагов афтершоков по данным сейсмологической обсерватории Гарвардского университета (ярко-красная заливка) с выделенной нодальной плоскостью (жирная дуга), которая согласно алгоритму МКА представляет собой плоскость очага афтершока: а – северо-западный сегмент; б – центральный сегмент; в – юго-восточный сегмент; г – карта механизмов очагов афтершоков за 2005 г.

Анализ 110 афтершоков, зарегистрированных в 2004–2005 гг., позволил установить для каждого из трех сегментов следующие типы механизмов очагов.

Северо-западный сегмент: *взбросы* – 28 событий (70%); *сбросы* – 10 событий (25%); *сдвиги* – 2 события (5%).

Центральный сегмент: *взбросы* – 19 событий (54%); *сбросы* – 8 событий (23%); *сдвиги* – 8 события (23%).

Юго-восточный сегмент: *взбросы* – 21 событие (60%); *сбросы* – 14 событий (40%).

На рис. 5, *г* отдельно приведена карта механизмов очагов афтершоков, зарегистрированных станциями временной сети в 2005 г.

Типизация механизмов очагов, выполненная по данным Гарвардской сейсмологической обсерватории с использованием табл. 3, дала следующие результаты: *сдвиги* – 6 механизмов; *взбросы* – 3; механизмы очага основного толчок 27.09.2003 г. и двух сильнейших афтершоков 27.09.2003 г. и 01.10.2003 г. – *сдвиги правосторонние*.

Отметим, что ранее в работах сейсмологов ГС СО РАН для Алтайского землетрясения уже были выполнены расчеты фокальных механизмов афтершоков [Еманов и др., 2007; Лескова, Еманов, 2006; Еманов и др., 2009]. При этом использовались сейсмические записи стационарной сети сейсмических станций Алтае-Саянского региона и Алтайского сейсмологического полигона, которые позволяли рассчитывать механизмы очагов землетрясений зоны Алтайского землетрясения, начиная с магнитуды 3.1 (энергетический класс – 9.6).

В работе [Еманов и др., 2008] общий анализ геодинамического режима в афтершоковой последовательности представлен по данным о крупных афтершоках с энергетическим классом более 10.5. Более детальный анализ выполнялся на основе фокальных механизмов 183 событий афтершоковой серии с большим разбросом по энергетическим характеристикам ($K=4-17$). По представленным на рис. 6 данным ГС СО РАН можно судить, что в центральной части структуры фокальные механизмы показывают сдвиг по простиранью, который с учетом нанесенных разломов может считаться правым сдвигом вдоль зоны активизации. С восточного края механизмы показывают взброс, а с западного – две группы механизмов взбросового и сбросового типа. Можно предположить, что на западном крае данной структуры активизировалась мелкая блоковая структура.

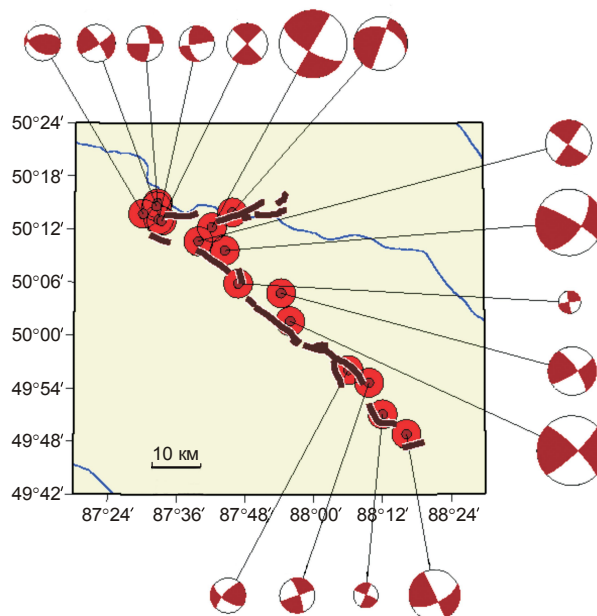


Рис. 6. Фокальные механизмы 16 крупных событий по данным ГС СО РАН [Еманов и др., 2008]

Типизация механизмов афтершкков в [Еманов и др., 2008] проводилась согласно табл. 3. Основным механизмом очагов афтершоков Алтайского землетрясения, учитываемые нанесенные разломы, является правый сдвиг (см. рис. 6). Изменение вида фокальных механизмов наблюдается на концах разломной зоны (особенно они разнообразны на ее юго-восточном окончании). Механизмы очагов афтершоков Алтайского землетрясения разделились по типам следующим образом: *сдвиги* – 52% от общего числа событий; *взбросы* – 35%; *сбросы* – 13%.

Результаты реконструкции напряжений

Реконструкция напряжений в области афтершоковой последовательности Алтайского землетрясения выполнялась с использованием автоматизированной программы *STRESS_seism*, которая реализует алгоритм метода катакластического анализа (МКА) разрывных смещений [Ребецкий, 2007]. В настоящей статье представлены результаты реконструкции напряжений, выполненной на базе данных о 82 афтершоках из каталога событий, зарегистрированных в 2004 г. В основе МКА лежат положения теории пластичности, требующие уменьшения внутренней упругой энергии при реализации каждого разрыва и достижения максимума диссипации этой энергии на совокупности разрывных смещений для истинного (искомого) тензора напряжений. МКА состоит из четырех этапов, позволяя оценить не только ориентацию главных осей тензора [Ребецкий, 1999, 2001], но и величины напряжений [Ребецкий, 2003, 2005, 2007, 2009а,б]. В данной работе был реализован только первый этап и получены данные об эллипсоиде напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций [Костров, 1974]. В процессе реконструкции определение напряжений осуществлялось в квазиоднородных доменах коры на основе выделения для них однородных выборок механизмов очагов афтершоков при минимальном числе из 6 землетрясений; общее число таких доменов составило 198.

Из рис. 7, в следует, что оси алгебраически минимального главного напряжения – максимального девиаторного сжатия σ_3 в коре Курайской впадины (северо-западный сегмент афтершоковой области) – имеют стабильное, практически одинаковое простирание в северо-восточном направлении (юго-западном), ортогональное простиранию разрывов. Оси σ_3 погружаются в северо-восточном направлении. Подобное направление простирания здесь (см. рис. 7, а) имеют и оси алгебраически максимального напряжения, и максимального девиаторного растяжения σ_1 . При этом они погружаются более круто в направлении на юго-запад. Таким образом, оси σ_1 и σ_3 в коре Курайской впадины имеют близкое простирание, но погружаются в диаметрально противоположных направлениях.

Подобная ситуация с определенным постоянством и близостью к северо-восточному направлению простирания этих осей отмечается в коре концевой восточной части афтершоковой области (Чуйская впадина), но здесь более крутое погружение имеют уже оси σ_3 . Различием двух участков состоят в том, что оси двух главных напряжений имеют разное погружение: оси σ_3 погружаются на юго-запад, а σ_1 – на северо-восток. Отметим, что оси промежуточного главного напряжения ориентированы в пределах обоих рассмотренных участках параллельно простиранию разрывов на поверхности исследуемой области и испытывают пологое погружение на восток–юго-восток и юго-восток.

При приближении к границе Курайской впадины и Чаган-Узунского блока оси максимального сжатия начинают разворачиваться, их простирание меняется с северо-восточного на запад–северо-западное и сохраняется таким практически до границ этого блока и Чуйской впадины. Оси σ_3 погружаются здесь на восток–юго-восток. Так же, как и на двух ранее рассмотренных участках коры, простирание осей σ_1 параллельно

простирацию осей σ_3 , но их погружение противоположно, т.е. происходит в запад–северо-западном направлении. Эта закономерность приводит к тому, что в коре Чуйской впадины оси промежуточного главного напряжения σ_2 испытывают плавный разворот от юго-восточного направления до юго-западного с одновременной сменой погружения.

В коре участка Чаган-Узунского блока (особенно в западной его части) оси σ_1 и σ_2 имеют менее стабильную ориентацию, чем σ_3 . Здесь ось σ_1 может изменять свою ориентацию от субвертикальной до пологой. Вновь стабильная ориентация всех главных осей наблюдается в коре Чуйской впадины к востоку от ее границы с Чаган-Узунским блоком. Оси σ_3 в восточной части коры этого участка имеют сначала простираание, параллельное разрывам поверхности, а затем разворачиваются, становясь ортогональными к разрывам.

На рис. 7, г показано районирование исследуемого участка коры по значениям угла погружения оси максимального сжатия. Видно, что вся область делится на три сегмента: западный (кора Курайской впадины) со средней крутизной погружения (30–45°); центральный (кора вблизи Чаган-Узунского блока) с самым пологим погружением (менее 15°); восточный (кора Чуйской впадины) с достаточно крутым погружением (более 45°).

Необходимо отметить аномальное простираание оси максимального сжатия, параллельное простираанию разрывов в коре Курайского хребта, на участке южнее основного облака афтершоков. Возможно, этот участок определяет напряженное состояние коры вдали от очага Алтайского землетрясения.

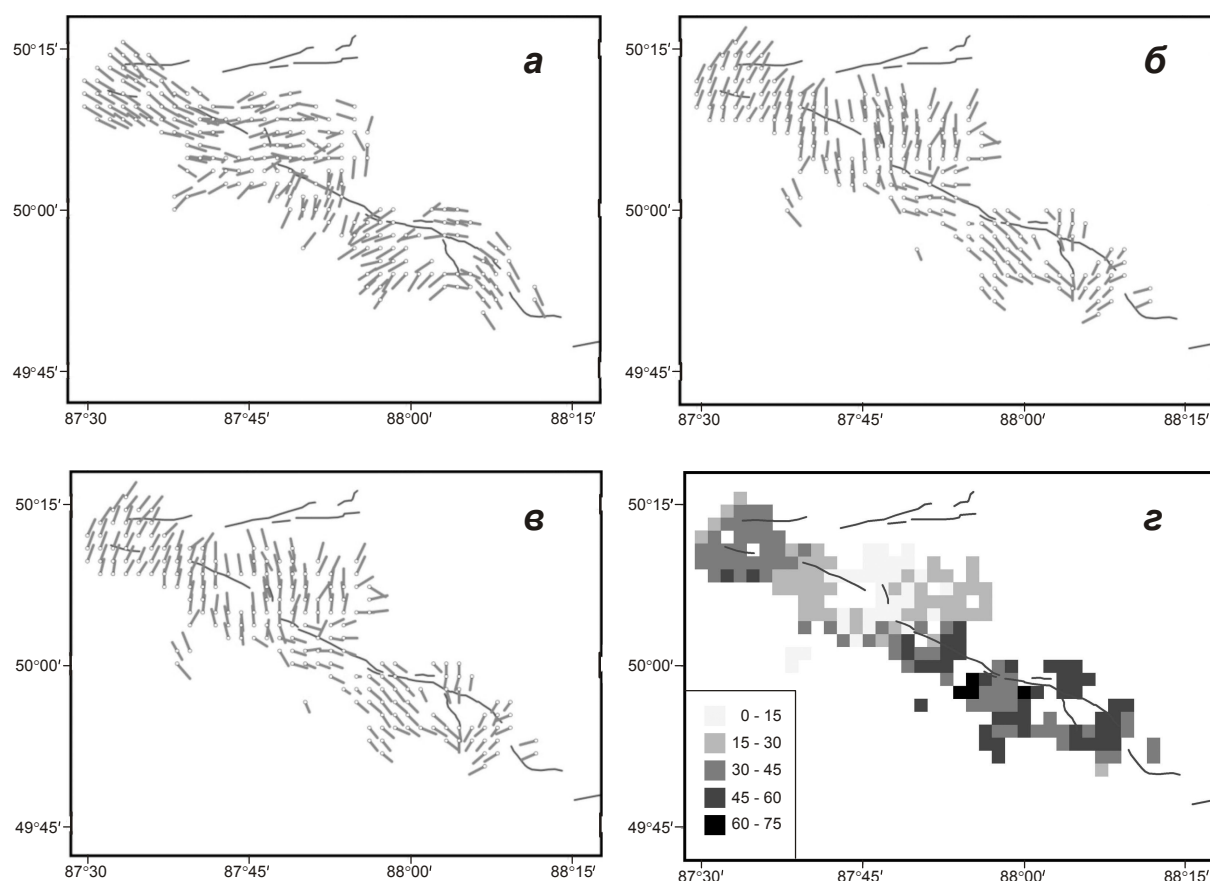


Рис. 7. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений σ_1 (а), σ_2 (б), σ_3 (в) и районирование исследуемой территории по величине угла погружения оси максимального сжатия σ_3 (г). Интенсивность заливки соответствует разным углам погружения оси σ_3 (см. шкалу)

Применяемый метод катакластического анализа при расчете параметров эллипсоида напряжений независимо, но связано определяет и параметры эллипсоида приращений сейсмотектонических деформаций [Ребецкий, 2007]. Эти данные позволяют оценить, насколько схожи названные эллипсоиды. Степень их схожести характеризуется скалярным параметром, распределение которого для коры исследуемой области представлено на рис. 8. Как видно из распределения данного скалярного параметра, на участке коры Чаган-Узунского блока отмечаются наибольшие различия в параметрах обсуждаемых эллипсоидов.

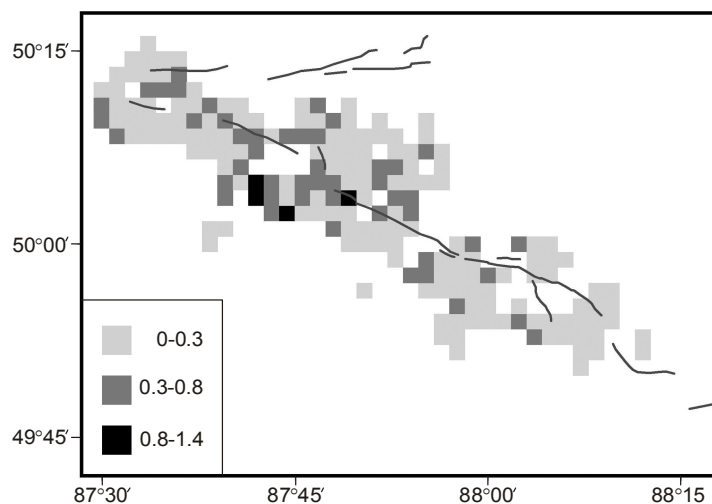


Рис. 8. Районирование коры по степени анизотропии – различие эллипсоидов напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций. Интенсивность заливки соответствует разным значениям коэффициента анизотропии (см. шкалу)

Отмеченные выше особенности ориентации главных осей напряжений отразились в районировании афтершоковой области по геодинамическим режимам, иллюстрируемом рис. 9, *а*. Здесь выделяются три разнохарактерных режима. Первый, охватывающий северо-западный сегмент афтершоковой области (кора Курайской впадины), отвечает горизонтальному сжатию и сдвигу в вертикальной плоскости. Второй, отвечающий коре Чаган-Узунский блока, содержит режимы горизонтального сжатия и его сочетания с горизонтальным сдвигом. Третий, захватывающий кору Чуйской впадины, сочетает режим сдвига в вертикальной плоскости с горизонтальным сжатием и растяжением. Отметим, что режим вертикального сдвига является пограничным между режимами горизонтального растяжения и сжатия и определяет ориентацию осей главных напряжений σ_1 и σ_3 – эти оси лежат в вертикальной плоскости и наклонены к горизонту под углами, близкими к 45° . Такому геодинамическому режиму отвечают механизмы землетрясений взрезового типа (см. рис. 4, *а*).

Как следует из рис. 9, *б*, основной вид тензора напряжений – это чистый сдвиг и смежные виды с небольшой компонентой одноосного сжатия и растяжения. Отметим, что в коре вблизи Чаган-Узунского блока ряд тензоров напряжений определяется как близкий к одноосному сжатию.

На рис. 10 представлена ориентация и величины компонент тензора напряжений в системе координат, связанной с осью на зенит и латеральной плоскостью. Видно, что оси максимального латерального сжатия в коре вблизи Чаган-Узунского блока субортгональны простиранию разломов. В сравнении с корой Чуйской и Курайской впадин здесь прослеживаются максимальные сжатия (интенсивность серого тона линий отражает интенсивности горизонтального сжатия). В коре Чуйской впадины напряжения ориентированы параллельно простиранию разрывов, что определяет ориентацию

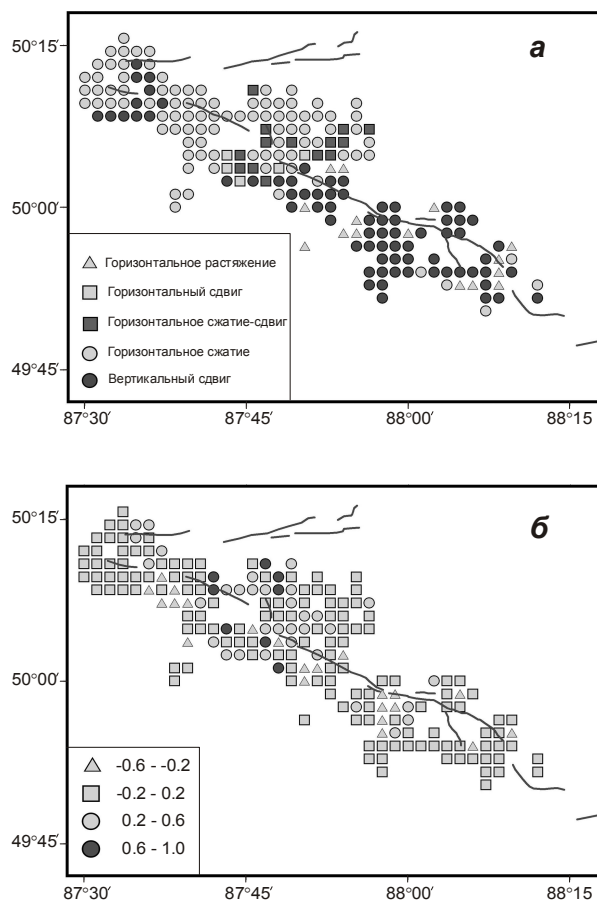


Рис. 9. Районирование афтершоковой области по геодинамическому режиму (а) и виду тензора напряжений – коэффициенту Лодэ–Надаи (б). Условные обозначения на б – разные значения коэффициенту Лодэ–Надаи

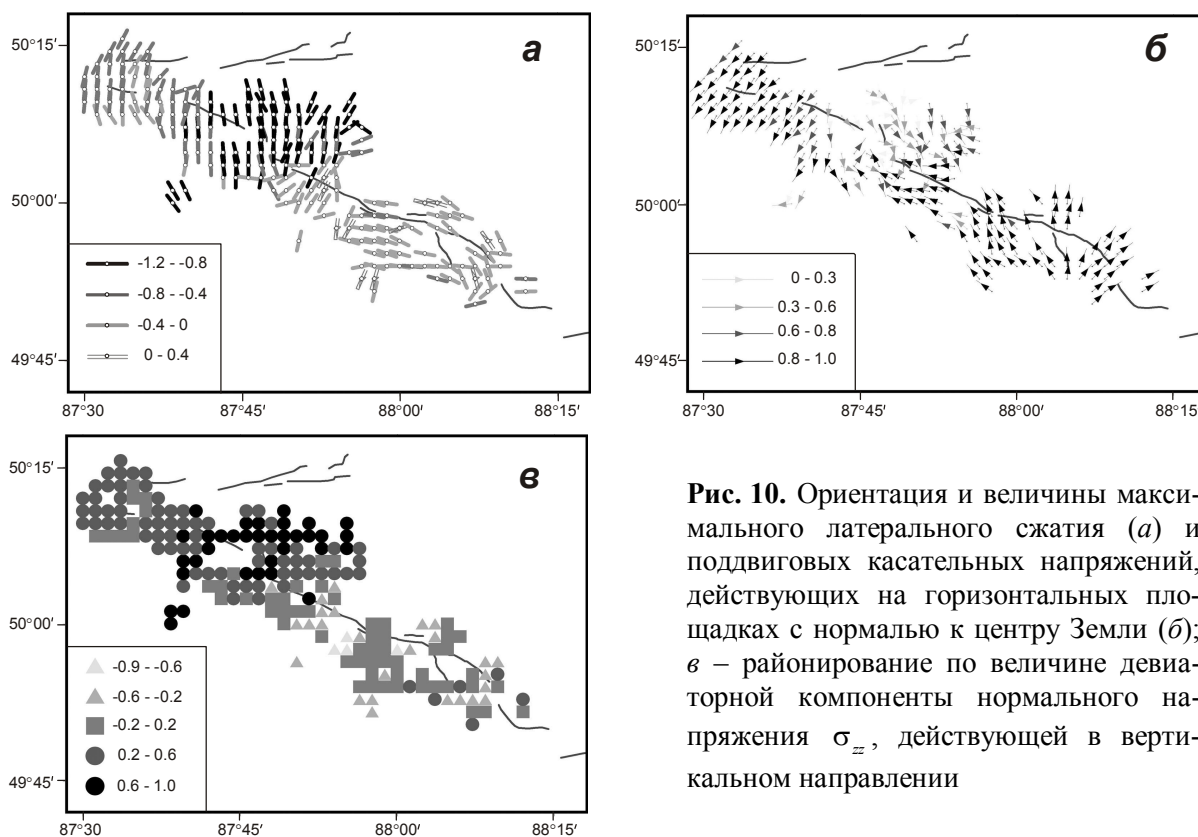


Рис. 10. Ориентация и величины максимального латерального сжатия (а) и подвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормалью к центру Земли (б); в – районирование по величине девиаторной компоненты нормального напряжения σ_{zz} , действующей в вертикальном направлении

минимального сжатия ортогонально им. В коре Курайской впадины оси максимального сжатия ортогональны разрывам так же, как и для Чаган-Узунского блока, но величина сжатия здесь существенно меньше.

Ориентация поддвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках делит всю афтершоковую область на три участка. В коре Курайской впадины эти касательные напряжения достаточно большие (близки к максимальным касательным) и ориентированы на юго-запад, а в коре Чуйской впадины расходятся веером от меридионального направления на северо-запад и северо-восток. В коре вблизи Чаган-Узунского блока напряжения наименее интенсивны и ориентированы более хаотично. Но все-таки на этом участке можно выделить кольцевую компоненту в распределении поддвиговых касательных напряжений, возможно определяющую вращательную (по часовой стрелке) компоненту в деформациях Чаган-Узунского блока [Стефанов, 2009].

Согласно данным рис. 10, в кора Чуйской впадины испытывает небольшое вертикальное укорочение (отрицательные значения вертикальной компоненты девиаторных напряжений), а кора Курайской впадины – небольшое вертикальное удлинение. Наибольшее вертикальное удлинение коры отмечено в окрестностях Чаган-Узунского блока.

Уже после первого этапа реконструкции МКА позволяет из двух нодальных плоскостей выбрать одну, которая является очагом землетрясения. Теория такого подхода связана с кулоновыми напряжениями, имеющими наибольшие значения плоскостей трещин, находящихся вблизи плоскости внутреннего скола. По результатам анализа около 50% афтершоков имели одну из нодальных плоскостей вблизи плоскости скалывания, что позволило выбрать для них очаги. Для таких землетрясений на карте механизмов очагов землетрясений для 82 афтершоков, зарегистрированных в исследуемом районе с 25.06.2004 по 30.08.2004 гг. (см. рис. 5), реализованная плоскость показана жирной линией. В северо-западном сегменте (см. рис. 5, а) углы простираения большинства реализованных плоскостей составляют от 295° до 320° , углы падения – от 36° до 73° при подвижке от 92° до 107° . В центральном и юго-восточном сегментах (см. рис. 5, б, в) определены плоскости подобной и субортогональной ориентации.

Основные результаты. Выводы

Точная локализация афтершоков Алтайского землетрясения 2003 г. показала, что их расположение в пространстве находится в хорошем соответствии с положением выхода на дневную поверхность разрыва в очаге землетрясения [Рогожин и др., 2004].

Полевые наблюдения, проведенные в очаговой зоне в 2004–2005 гг. свидетельствуют о снижении сейсмической активности в районе: если в 2004 г. с июня по начала сентября было зарегистрировано более 1500 афтершоков, то в 2005 г. – около 500.

Большая часть гипоцентров зарегистрированных событий сосредоточена на глубине 4–8 км, где скорость P -волн составляет 5.83 км/с. Самый глубокий очаг имеет событие, зарегистрированное 14.08.2004 г. в 09:51:26 с $M_L=3.9$ ($H=17.2$ км, $V_P=6.25$ км/с; тип механизма – взброс).

Результаты реконструкции природных напряжений, выполненной по данным о механизмах очагов афтершоков, показали, что по характеру напряженного состояния коры исследуемый район может быть разделен на три зоны – Курайскую, Чаган-Узунскую и Чуйскую.

Установлено, что основным геодинамическим режимом является режим горизонтального сжатия и сдвига в вертикальной плоскости, характерный для глыбовых механизмов горообразования. Важная характеристика поля напряжений афтершокового процесса – смена ориентации осей главных напряжений при переходе от одной зоны к

другой, источником которой, вполне вероятно, может быть массив Чаган-Узунского блока [Стефанов, 2009].

В коре Чаган-Узунского блока наблюдается усиление латерального сжатия, ортогонального к простиранию сейсморазрывов на поверхности, а в коре Чуйской впадины – его сильное падение. Следствием такого распределения сжатия является то, что породы Чаган-Узунского блока испытывают интенсивные деформации вертикального удлинения.

Градиентные характеристики поля напряжений определяют вращение Чаган-Узунского блока по часовой стрелке. Подобный характер кинематики при неправильной в плане форме блока может объяснить изменения латерального сжатия вдоль простирания поверхностных сейсморазрывов.

Результаты сейсмологических и тектонофизических исследований свидетельствуют о необходимости длительного слежения за сейсмогенной обстановкой в районе Чуйско-Курайских впадин. Закономерности пространственной и временной изменчивости поля природных напряжений следует рассматривать как типичную ситуацию для сейсмических областей орогенов со сводово-глыбовым режимом формирования поднятий.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность А.В. Ландеру за помощь в определении механизмов очагов афтершоков на основе разработанной им программы, благодарят всех сотрудников Лаборатории сильных землетрясений ИФЗ РАН, принимавших участие в полевых работах на Алтае, а также анонимного Рецензента за сделанные замечания, исправление которых способствовало улучшению работы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-05-00361).

Литература

- Арефьев С.С., Быкова В.В.* Алтайское землетрясение 2003 г.: очаг и афтершоки // Тезисы докладов Всероссийской конференции “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. М., 2008. Т. 2. С.211–213.
- Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Погребченко В.В.* О геометрии очаговой зоны Алтайского землетрясения 27 сентября 2003 г. // Геофизические исследования. 2005. Вып. 1. С.16–26.
- Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г., Погребченко В.В.* Очаги и Афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 года // Физика Земли. 2006. № 2. С.85–96.
- Арефьев С.С., Погребченко В.В., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г.* Предварительные результаты сейсмологических наблюдений в эпицентральной зоне. Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. // Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С.61–67.
- Аржанников С.Г.* Основные активные разломы, кинематика и сильные палеоземлетрясения Восточной части Алтае-Саянской горной области // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Труды Всероссийского совещания, Иркутск, ИЗК СО РАН, 26–29 августа 2003 г. Новосибирск: Изд-во СО РАН филиал “Гео”, 2003. С.241–248.
- Аржанников С.Г., Аржанников А.В.* Позднее-кайнозойские сейсмогенные деформации на юго-западе Сибирской платформы // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения: Материалы XII международной конференции, Воронеж, 18–23 сентября 2006 г. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2006. С.43–48.

- Баталева Е.А., Баталева В.Ю., Рыбин А.К., Сафронов И.В. Глубинная геоэлектрическая модель рамповой структуры Чуйской впадины Горного Алтая по данным магнитотеллурического зондирования // *Фундаментальные проблемы геотектоники: Материалы XI тектонического совещания*. М.: Геос, 2007. Т. 1. С.67–70.
- Борняков С.А. Динамика развития деструктивных зон межплитных границ (результаты моделирования) // *Геология и геофизика*. 1988. № 6. С.3–10.
- Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмоструктурные деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // *Физическая мезомеханика*. 2008. № 11. С.5–13.
- Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // *Докл. РАН*. 2004. Т. 395, № 4. С.534–536.
- Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др. Чуйское (Алтайское) землетрясение 2003 г.: Материалы сейсмологического изучения. Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С.55–60.
- Дядьков П.Г., Кузнецова Ю.М. Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // *Физическая мезомеханика*. 2008. № 11. С.19–25.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Особенности строения эпицентральной зоны Чуйского (Горный Алтай) землетрясения по данным метода сейсмической томографии с двойными разностями // *Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума 12–16 сентября 2005 г.* Академгородок, г. Новосибирск. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2005. С.45–50.
- 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., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Агатова А.Р. Чуйское землетрясение (Горный Алтай, 27 сентября 2003 г., $M_s=7.3$) и неотектоническая структура Афтершоковой области // *Геодинамика и Геоэкология высокогорных регионов в XXI веке*. Вып. 3. Сборник материалов третьего Международного симпозиума 30 октября – 6 ноября 2005 г. Москва-Бишкек, 2008. С. 50–56.
- 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.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Мельников А.И. Архитектоника Алтайского региона и ее потенциальная сейсмическая опасность // *Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения*. Материалы XII международной конференции, Воронеж, 18–23 сентября 2006 г. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2006. С.220–223.
- Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // *Отчет: Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.2003–31.12.2003)*. РАН, ГС, Камчатская ОМСП, г. Петропавловск-Камчатский, 2004. 396 с.
- Комплект карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / Уломов В.И., Шумилина Л.С. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.
- Костров Б.В. Сейсмический момент, энергия землетрясений и сейсмическое течение горных масс // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1974. № 1. С.23–40.
- 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.
- Лисейкин А.В., Соловьев В.М. Глубинное строение очаговой зоны Чуйского (Горный Алтай) землетрясения по данным от афтершоков. Активный геофизический мониторинг литосферы Земли // *Материалы 2-го Международного симпозиума 12–16 сентября 2005 г.* Академгородок, г. Новосибирск. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С.308–312.

- Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Юнга С.Л. Сейсмологический анализ землетрясения на Горном Алтае 27.09.2003 г. Исследования в области геофизики. М: ОИФЗ РАН, 2004. С.99–108.
- Лутиков А.И., Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Юнга С.Л. Сейсмологический анализ Алтайского землетрясения 2003 г. // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ОИФЗ РАН, ГС РАН, 2004. С.38–49.
- Мирошниченко А.Н., Леви К.Г., Лухнев А.В., Саньков В.А. Разломные системы центральной Азии: Напряженно-деформированное состояние и потенциальная опасность // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы: Труды всероссийского совещания, Иркутск, ИЗК СО РАН, 26-29 августа 2003 г. Иркутск: Изд-во СО РАН, филиал Гео, 2003. С.102–106.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 506 с.
- Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических 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 // БМОИП. Сер. Геол. 2001. Т. 76, вып. 4. С.28–35.
- Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 2003. Т. 3, № 2. С.237–241.
- Ребецкий Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27, № 1. С.39–54.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л. Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // Докл. РАН. 2009а. Т. 428, № 3. С.397–402.
- Ребецкий Ю.Л. Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический журнал. 2009б. Т. 31, № 2. С.93–106.
- Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 130 с.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Бурканов Е.Е., Платонова С.Г. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С.25–37.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Радзименович Н.А., Мельникова В.И., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бурчевкая М.А., Кале Э., Девершиер Ж., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Современные деформации земной коры Западной Монголии по данным GPS геодезии и сеймотектоники // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке: Сборник материалов Международного симпозиума 30 октября–6 ноября 2005 г. Москва; Бишкек: Изд-во НС РАН Бишкек, 2006. С.108–113.
- Семинский К.Ж. Анализ распределения опережающих разрывов при формировании крупных дизъюнктивов // Геология и геофизика. 1986. № 10. С.9–18.
- Стефанов Ю.П. Численное моделирование процессов деформации в геологических средах за пределом упругости // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы Первой молодежной тектонофизической школы-семинара, 21-24 сентября 2009 г., ИФЗ РАН, г. Москва. М.: ИФЗ РАН, 2009. С.216–222.
- Татевосян Р.Э. Макросейсмические исследования в России: Очерки геофизических исследований. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С.73–89.
- Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизонного пояса. М.: Геос, 2002. 224 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: СО Наука, 1983. 112 с.
- Юнга С.Л., Рогожин Е.А. Сейсмичность, механизм очагов землетрясений и сеймотектонические деформации в пределах активных блоков литосферы. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С.383–420.

CMT CATALOG. 2008. Global Centroid Moment Tensor database (formerly Harvard CMT catalog). Available at: <http://www.globalcmt.org>

Lee W.H., Lahr J.C. *HYP071* (revised; a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquake. 2005. Open file report. N 75-311. <http://pubs.er.usgs.gov/pubs/ofr/ofr/75311>

Tatevossian R.E., Rogozhin E.A., Arefiev S.S., Ovsyuchenko A.N. Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies // Geological Society, London, Special Publications 2009. V. 316. P.73–91.

Сведения об авторах

ОМАР Халед Махди – аспирант, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: khaledo78@yahoo.com

АРЕФЬЕВ Сергей Сергеевич (1952–2012) – доктор физико-математических наук, в момент написания статьи заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

РЕБЕЦКИЙ Юрий Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: reb@ifz.ru

MECHANISMS OF AFTERSHOCKS OF 2004–2005 YEARS AND STRESS-STATE IN THE SOURCE REGION OF ALTAI, 2003, EARTHQUAKE

Kh.M. Omar, S.S. Arefiev, Yu.L. Rebetskiy

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

Abstract. The Altai earthquake of September 27, 2003 is the strongest on the territory of Russia in the recent decades. During 2004 and 2005 field campaigns more than 2000 events were registered by 12 digital seismic stations established in the region of the Altai earthquake by Laboratory of the strong earthquakes of the Schmidt IPE RAS. We selected 110 aftershocks recorded by at least 8 stations to determine focal mechanisms of aftershocks from the first motion polarity of the P-waves and to reconstruct of stress-state.

The main geodynamic regime in the studied area are shown to be the horizontal compression and vertical shear, which are indicative of block mountain formation mechanisms.

Keywords: aftershocks mechanisms, stress.