

УДК 550.834

СЕЙСМОТЕКТОНИКА АКТИВИЗИРОВАННОЙ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ РАЗЛОМОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕКОРОВОЙ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ $M_s = 7.3$, ПРОИЗОШЕДШЕГО 27 СЕНТЯБРЯ 2003 г. В ГОРНОМ АЛТАЕ (РОССИЯ)¹

© 2021 г. А. Ф. Еманов^{1, *}, А. А. Еманов^{1, 2}, А. В. Фатеев^{1, 2}

¹Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН” – Алтай-Саянский филиал, д. 3 просп. Академика Коптюга, 630090 Новосибирск, Россия

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

*e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Поступила в редакцию 14.05.2020 г.

После доработки 26.09.2020 г.

Принята к публикации 29.09.2020 г.

На основе материалов плотной сети станций, длительных наблюдений и современных методов локализации гипоцентров афтершоков Чуйского землетрясения 2003 г. сформирована объемная структура сейсмически активизированных разломов как поля концентрации афтершоков. Вдоль главной разломной зоны на вертикальном срезе построен разрез как результат сноса афтершоков на вертикальную плоскость. Вдоль разреза афтершоки сконцентрированы с максимальной глубиной очагов ~20 км в центре афтершоковой области и минимальной глубиной по краям. Установлено наличие неравномерности изменения плотности очагов вдоль магистрального сдвигового разлома с ослаблением активности магистральной сдвиговой зоны на участках ее пересечения секущими разломами. Ширина активизированной зоны вдоль магистрального разлома меняется. Ширина активизированной зоны связана с изменением зоны влияния разлома и с расстоянием изменяется от 1–2 до 10 км. Установлена изменчивость наклона активизированного магистрального разрыва, связанная с блоковым строением эпицентральной области. Выявлены и изучены участки оперений и разветвлений на основном разломе. Обнаружены отходящие от основного разрыва горизонтальные сейсмически активизированные слои. На глубине 10–20 км выявлены два слоя: один слой направлен под Чаган-Узунский блок, второй слой подвинут под северо-западный край Курайской впадины. На глубине ~2 км третий горизонтальный слой отходит от магистрального разрыва и подстилается под Северо-Чуйский хребет.

Ключевые слова: Чуйское землетрясение, поле афтершоков, Чаган-Узунский блок, сдвиговая разломная зона, зона динамического влияния разлома, горизонтальный активизированный слой

DOI: 10.31857/S0016853X21010045

ВВЕДЕНИЕ

Чуйское землетрясение 27.09.2003 г., $M_s = 7.3$ произошло в центральной части Горного Алтая с эпицентром на контакте Северо-Чуйского хребта с Чаган-Узунским приподнятым блоком, разделяющим Чуйскую и Курайскую впадины. Плестосейстовая область Чуйского землетрясения расположена на продолжении протягивающихся из Монголии правосдвиговых зон северо-западного простирания. Чуйское землетрясение – крупнейшее землетрясение, произошедшее на террито-

рии Горного Алтая. Кроме главного события, состоявшегося в 11:03 GMT, возникли два сильных афтершока:

– первый афтершок состоялся 27.09.2003 в 18:52 GMT с $M_s = 6.3$;

– второй афтершок состоялся 01.10.2003 в 01:03 GMT с $M_s = 6.7$.

Главное событие и два крупных афтершока приурочены к одной сдвиговой зоне, они обеспечили формирование единой области афтершоковой активности для Чуйского землетрясения. Афтершок 01.10.2003 вызвал значительное удлинение активизации по сдвиговому разлому на северо-запад [5]. В дальнейшем исследовании аф-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016853X21010045 для авторизованных пользователей.

тершоков Чуйского землетрясения кроме нашего авторского коллектива продолжили отечественные и зарубежные исследователи, внесшие большой вклад в изучение региона [2, 27, 29, 33].

Палеосейсмогеологическими исследованиями в Горном Алтае было доказано, что на территории Чуйско-Курайской и Чарышской сейсмогенерирующих зон происходили землетрясения с магнитудами 7.0–7.5 с периодом повторяемости от 1000 до 3000 лет [15].

До Чуйского землетрясения 2003 г. были исследованы крупнейшие землетрясения Монгольского Алтая, произошедшие в XX в. [11, 12, 20, 23], приуроченные к разломным структурам, протягивающимся из Монгольского Алтая на территорию нашей страны в Горный Алтай. В Чуйско-Курайской зоне также до Чуйского землетрясения 2003 г. были выполнены геолого-морфологические исследования блочной структуры [4].

Для мониторинга сейсмичности региона сеть стационарных сейсмологических и временных сейсмических станций в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая была расширена в 2002 г. – от 1 стационарной сейсмологической станции в селе Акташ до 12-ти стационарных сейсмологических станций, в 2003 г. сеть была дополнена тремя стационарными сейсмологическими станциями. Таким образом, на созданном Алтайском сейсмическом полигоне, состоящем из 15-ти стационарных сейсмологических станций, действуют от 10 до 100 временных сейсмических станций, что позволяет проводить высокоточное исследование тектонических разломов, которые были активизированы Чуйским землетрясением 2003 года.

После Чуйского землетрясения, произошедшего 27 сентября 2003 г., были выполнены сейсмогеологические исследования разрывов дневной поверхности и проведено сравнение с разломной тектоникой [10, 16, 17, 27–29, 32, 33].

Многолетние сейсмические исследования в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения стали основой проведения многих исследований от скоростного строения по данным томографии с использованием анализа закономерностей сейсмического режима активизированной области до разработки моделей напряженного состояния по данным по механизмам очагов. Установлено, что афтершоковый процесс испытывает изменения во времени, развиваясь в пространстве.

В статье рассматриваются структуры сейсмически активизированных разломов в эпицентральной области по скоплениям гипоцентров афтершоков и их плотности на единицу объема, при этом землетрясения рассматриваются независимо от их энергии. Наше исследование основано на высокоточных определениях координат гипоцентров. Исследования выполнены по более чем 50-ти тысячам афтершоков, зарегистриро-

ванных в интервале от 2003 до 2009 гг. Данный интервал времени был выбран, поскольку он является интервалом стабильного протекания сейсмической активизации в эпицентральной зоне. Однако после 2010 г. нами отмечены заметные изменения в пространственной структуре землетрясений Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая, но эти наблюдения нами не привлекаются в данное исследование.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объемная структура крупных разломных зон формируется как результат действия многих землетрясений и медленных процессов (процесс крипа) [17]. Сейсмическая активизация, последовавшая за крупным землетрясением, позволяет сопоставить тектонические модели для Горного Алтая с реальным строением активизированных разломов.

Исследования были выполнены в момент, когда произошло переоснащение всей сети сейсмологических станций Алтая на цифровую регистрацию сейсмических событий и также с использованием временных цифровых сейсмических станций. Для получения высокой точности мы использовали:

- плотную сеть стационарных сейсмологических станций, установленных за год до события;
- модель скоростного строения в эпицентральной зоне, полученной по данным для данного региона;
- цифровую фильтрацию и методы определения координат гипоцентров с помощью программы HYPOINVERSE–2000 [30];
- координаты гипоцентров, построенные методом двойных разностей [33, 30];
- скоростную модель и координаты гипоцентров, уточненные методом DD-томографии [35].

Представленный нами сводный каталог афтершоков, составленный для периода 2003–2009 гг., является неоднородным по набору данных, поскольку в первые дни после главного толчка было нарушено электроснабжение и резервных аккумуляторов хватало на несколько дней (Приложение 1). Восстановление стационарной сети и установка временной сети велись одновременно. Удалось избежать остановки наблюдений в эпицентральной зоне, но представительность и точность менялись во времени. За десять дней в эпицентре была развернута сеть, по числу станций в три раза превышавшая период до главного события.

В период представленных в данной статье материалов (от начала октября 2003 г. и до декабря 2009 г.) стационарная сеть в Чуйской зоне состояла из 15-ти стационарных сейсмологических станций, находилась в окружении десятков установленных дополнительных станций сети и вре-

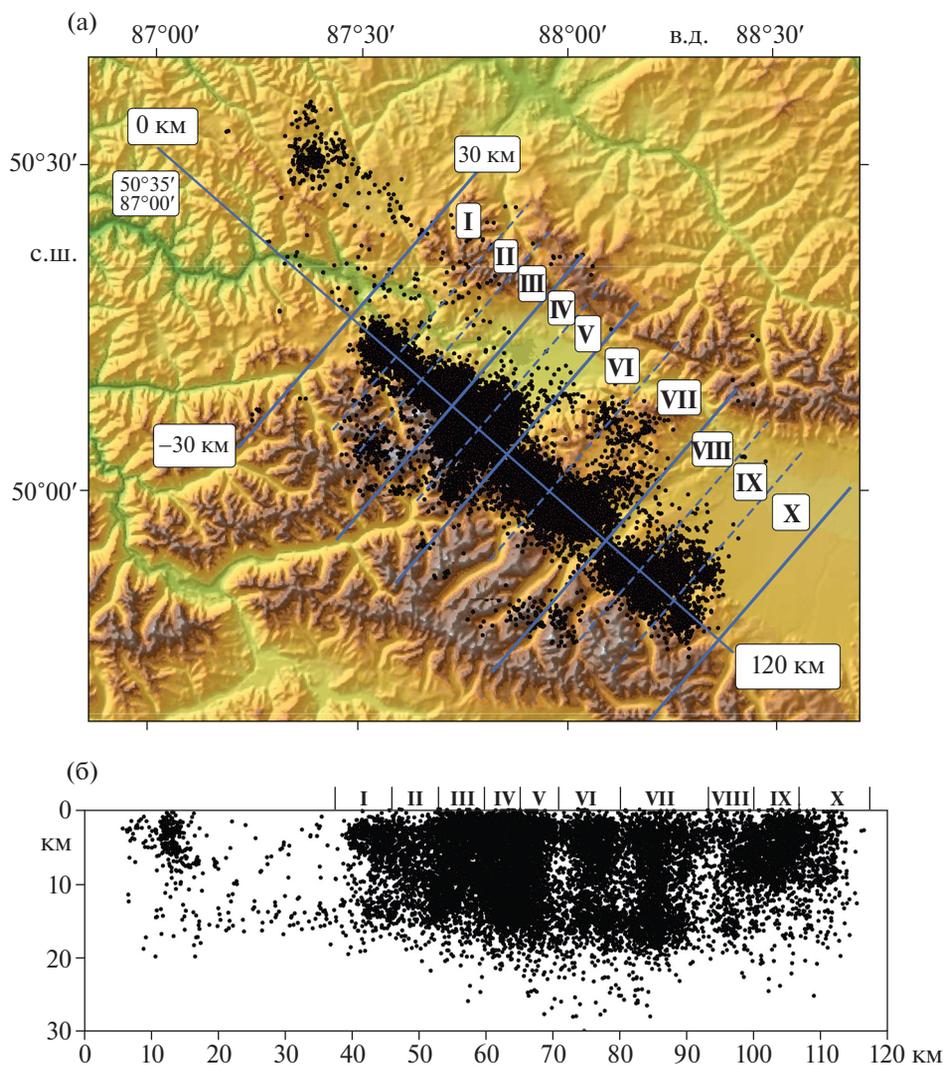


Рис. 1. Поле афтершоков Чуйского землетрясения 2003–2009 гг.
 (а) – карта эпицентров афтершоков Чуйского землетрясения, определенных методом двойных разностей. Показано (римские цифры): положение разрезов I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X.
 (б) – разрез со сносом афтершоков на вертикальную плоскость по линии 0–120 км.

менных станций, расположение которых в эпицентральной зоне изменялось из года в год.

В нашем эксперименте были использованы одновременно от 30 до 100 станций. Конфигурация сети была ориентирована на площадное изменение в афтершоковом процессе, система наблюдений плотная и меняющаяся во времени. Афтершоковый процесс изучался нами до уровня отрицательных магнитуд, при этом в каталоге присутствуют события, которые фиксировались и тремя–пятью станциями в случае надежных вступлений волн на их сейсмограммах (см. Приложение 1).

Мы исследовали положение гипоцентров афтершоков в объеме, при этом мы не рассматривали энергию сейсмотектонических событий. Для получения высокоточных данных произведена повторная обработка сейсмограмм по методу двойных разностей с отбраковкой части данных [33].

Для определения координат гипоцентров не были привлечены регистрационные сейсмические записи на станциях на удалении более 200 км от события и были исключены из обработки события, которые фиксировались менее чем десятью станциями с уверенной регистрацией первых вступлений *P* и *S* волн. Для уточняющей обработки данных было отобрано 20838 афтершоков, для которых получено 141039 связанных пар событий, образующих около 15 миллионов разностных времен вступлений. В результате переопределены координаты гипоцентров 17405 землетрясений.

ОБЪЕМНАЯ СТРУКТУРА РАЗРЫВОВ ПО АФТЕРШОКАМ

Нами составлена карта эпицентров афтершоков и разрез, полученный сносом афтершоков на вертикальную плоскость, на карте показан глав-

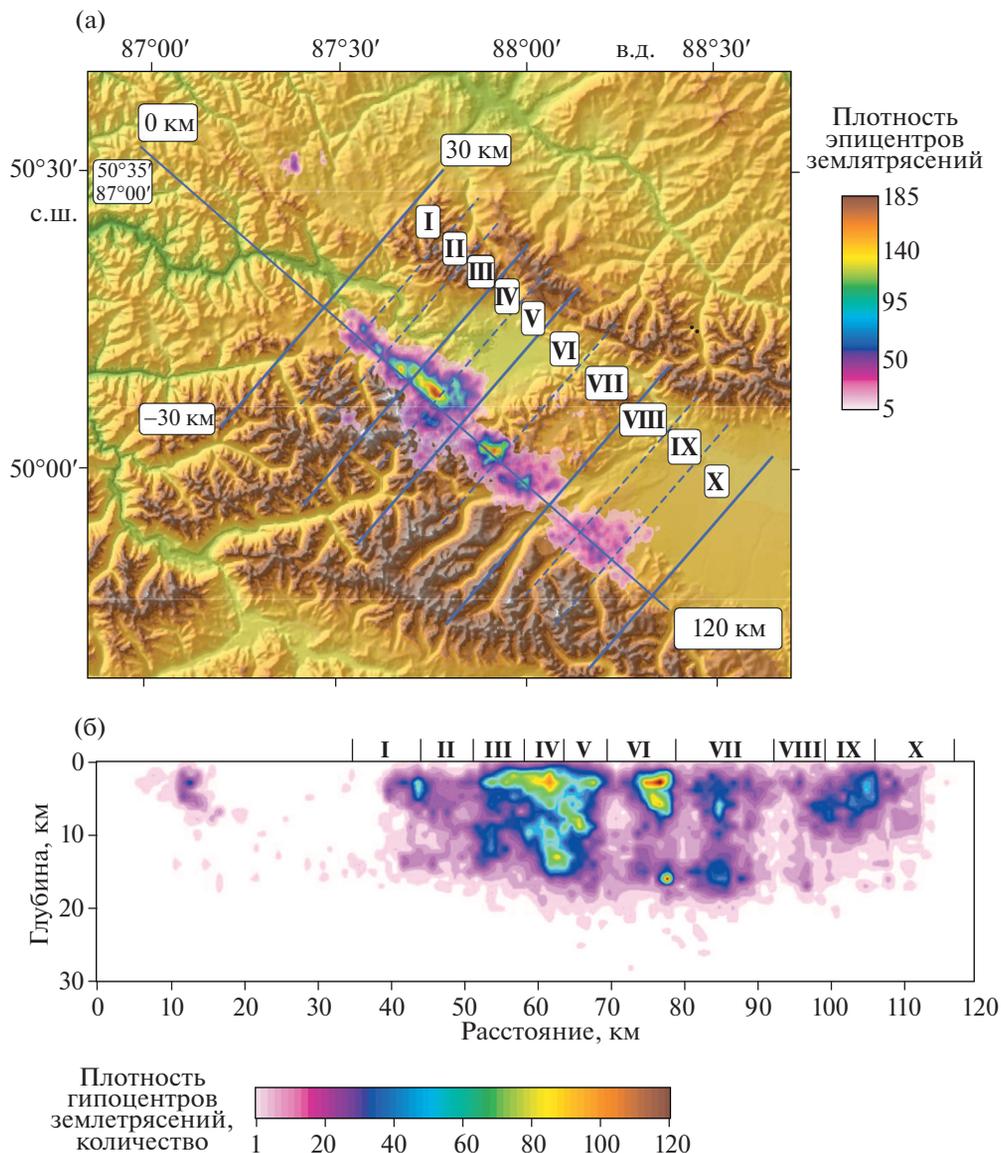


Рис. 2. Плотность афтершоков Чуйского землетрясения.
 (а) – карта плотности афтершоков;
 (б) – разрез вертикальной плоскостью вдоль линии 0–120 км.

ный сдвиг, на котором произошло главное событие, сформирована вытянутая афтершоковая область с меняющейся структурой (рис. 1). В вертикальном разрезе область афтершоков от элемента I до элемента X в вертикальном срезе показана как сегмент диска, заполненный афтершоками. Очаги землетрясений, разместившиеся в разрезе слева от элемента I в Айгулакском и Курайском хребтах – смежных структурах, не относятся к афтершоковой активности. Линии на карте, перпендикулярные линии разреза, являются границами сноса землетрясений в поперечные разрезы (см. рис. 1). Зона влияния глубинного разлома, и в дальнейшем развиваемая как структура разлом-

ных зон, связана с поперечным сечением афтершоковой области [9, 18, 25].

На представленной нами карте плотности афтершоков структура очага землетрясения усредняется при одновременно большей контрастности (рис. 2). Линейная сдвиговая зона Чуйского землетрясения по плотности афтершоков прерывиста, имеет ответвления и обладает структурой, связанной с блоковым строением.

Элементу VI соответствует главный толчок, где находится компактная и плотная область скопления афтершоков, элементы III, IV и V охватывают самые интенсивные и сложные участки афтершокового процесса (см. рис. 2). Эта область сформир-

ровалась под воздействием двух других крупных афтершоков.

В элементах **I**, **II** наблюдается по площади раздвоение линии афтершоков в форме конского хвоста [14]. В элементе **V** наблюдается ответвление от центрального направления двух активизированных разломов – в сторону Северо-Чуйского хребта и Курайскую впадину (см. рис. 2).

Для исследования объемной структуры активизированной области рассмотрены поперечные разрезы (рис. 3), полученные в результате перемещения на вертикальную плоскость афтершоков из выделенного сегмента.

В сечении на разрезах **I**, **II** и **III** активизированный разлом наклонен от Курайской впадины в сторону Северо-Чуйского хребта. На разрезах **II** и **III**, параллельно основному разлому на удалении ~10 км в Северо-Чуйском хребте с меньшей активностью, прослеживается разлом, на разрезе **V** из одной точки формируются три активизированных разлома (см. рис. 3). Горизонтальный разлом на глубине 1–3 км отклоняется в сторону Северо-Чуйского хребта, и сформированы два активизированных разлома: один – с наклоном в сторону Северо-Чуйского хребта, другой – в сторону Курайской впадины.

На разрезах **VI** и **VII** находится почти вертикальная широкая активизированная зона и горизонтальный активизированный слой, уходящий от нее под Чаган-Узунский блок на глубине 15–18 км. Слабая активность формируется на глубине первых километров на удалении около 20 км от линии основного разлома в направлении к Северо-Чуйскому хребту. Разрезы **VIII**, **IX** и **X** проходят по Чуйской впадине, развитие афтершокового процесса здесь происходит преимущественно на глубинах до 10 км (см. рис. 3).

Представленные разрезы плотности гипоцентров позволяют уточнить структуру активизированных Чуйским землетрясением разломов (рис. 4).

На разрезе **I** в соответствии с распределением плотности землетрясений показан узкий разлом с наклоном в сторону Северо-Чуйского хребта, разветвленный на два разлома с доминирующим одним разломом на прямом продолжении активизации.

На разрезах **II**, **III** и **IV** показана смещенная в Северо-Чуйский хребет на глубину 10–15 км слабоактивная разломная зона. На разрезах **II** и **III** главная линейная структура отмечается как узкая линейная активизация с небольшим наклоном в сторону Северо-Чуйского хребта. На разрезе **IV** показана активизированная структура с расширением в нижней части, на разрезе **V** осложнение активизированной разломной структуры получает дальнейшее развитие. В разрезе присутствует горизонтальный активизированный слой на глубине ~2 км, уходящий от магистральной линии активизации в сторону Северо-Чуйского хребта.

Активизированный разлом на продолжении магистральной линии наклонен в сторону Северо-Чуйского хребта. Разлом в виде ответвления в Курайскую впадину имеет наклон от Северо-Чуйского хребта в Курайскую впадину. Разрез **V** соответствует структуре развития афтершоков в плане (см. рис. 2).

Разрезы **VI** и **VII** соответствуют контакту Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Широкая зона расположена в районе главной линии разлома, на глубинах 15–20 км наблюдается широкий горизонтальный сейсмически активный слой, уходящий под Чаган-Узунский блок. На малых глубинах (1–5 км) и на удалении около 20 км от магистральной линии разлома в Северо-Чуйском хребте наблюдается активизированная зона. В Чуйской впадине афтершоки происходят преимущественно на глубинах до 10 км. На разрезах **VIII**, **IX** и **X** формируются вертикальный активизированный разлом и разлом под ~45° к вертикали (см. рис. 2).

СЕЙСМОТЕКТОНИКА

Далеко не все крупные землетрясения соответствуют модели смещения по разлому, в ряде случаев происходят объемные землетрясения [22]. Одно из крупнейших объемных землетрясений в Центральной Азии – Гоби-Алтайское 1957 года, $M_s = 8.1$ [20, 13], при котором система горных хребтов протяженностью более 250 км и при ширине около 30 км поднялась и целиком сместилась. Получены детальные данные о поверхностных деформациях при этом землетрясении, но при этом практически отсутствуют сейсмические данные по афтершокам Гоби-Алтайского землетрясения [20]. В ряду более слабых землетрясений объемного типа находятся:

– Чаганское землетрясение 1862 г., $M_s = 7.5$ [21], при котором мгновенно образовался залив Провал на оз. Байкал;

– Южно-Якутское землетрясение 1989 г., $M_s = 6.6$ [7];

– Урег-Нурское землетрясение 1970 г., $M_s = 7.0$ [11].

Данные об объемной структуре этих землетрясений получены преимущественно из сейсмологических обследований [7, 11, 20, 22].

В условиях Центральной Азии произошли крупные землетрясения, которые относятся к событиям на разломе (плоские):

– Бусингольское 1991 г., $M_s = 6.5$ [11];

– Тувинское 2011 г., $M_L = 6.7$ и Тувинское 2012 г., $M_L = 6.8$, произошедшие на Каахемском разломе, сформировавшие единый афтершоковый процесс [3].

При детальном изучении афтершоков для землетрясений с подвижками вдоль плоскости также

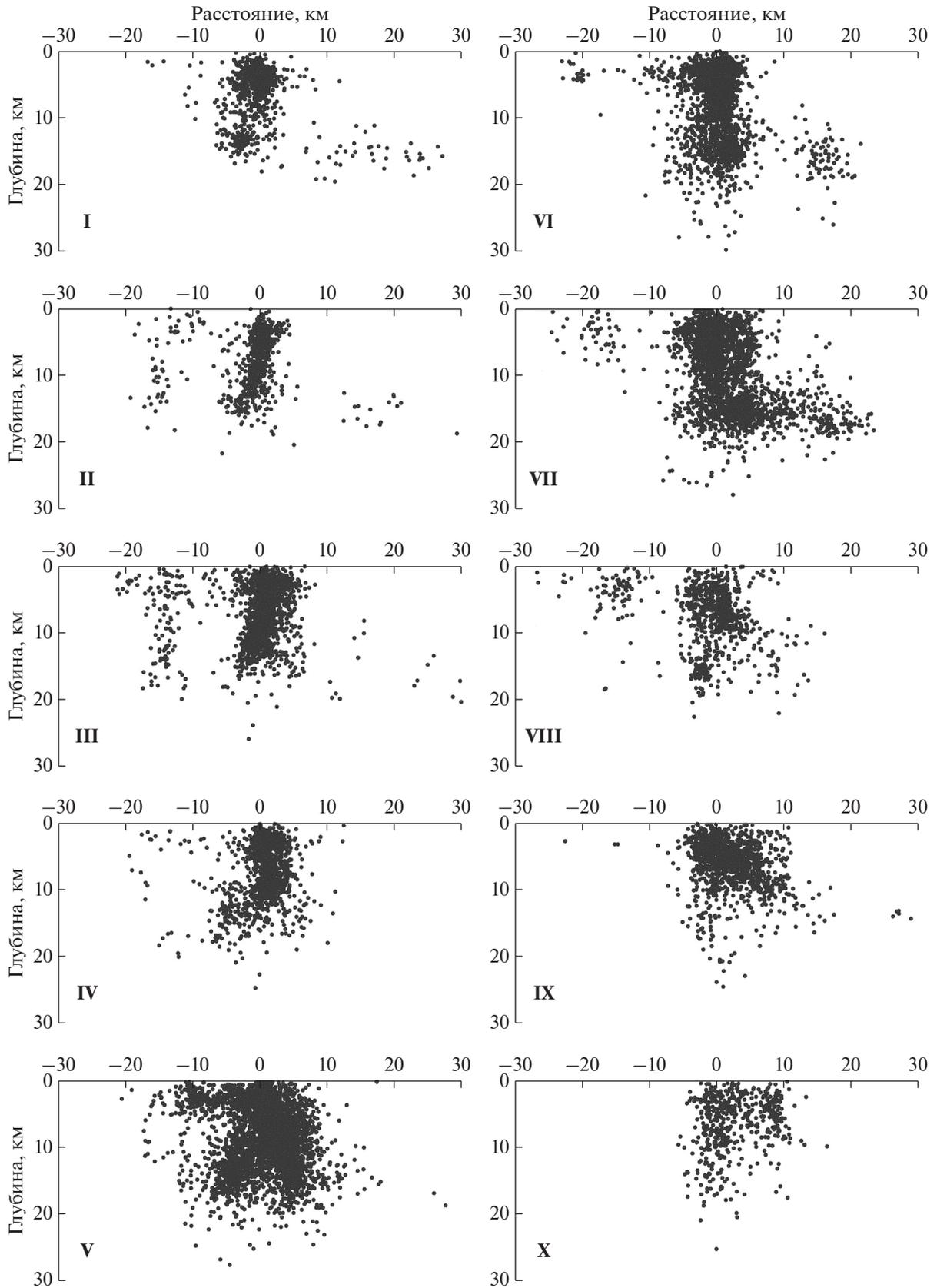


Рис. 3. Разрезы вертикальными плоскостями поперек афтершокового процесса по линиям I–X.

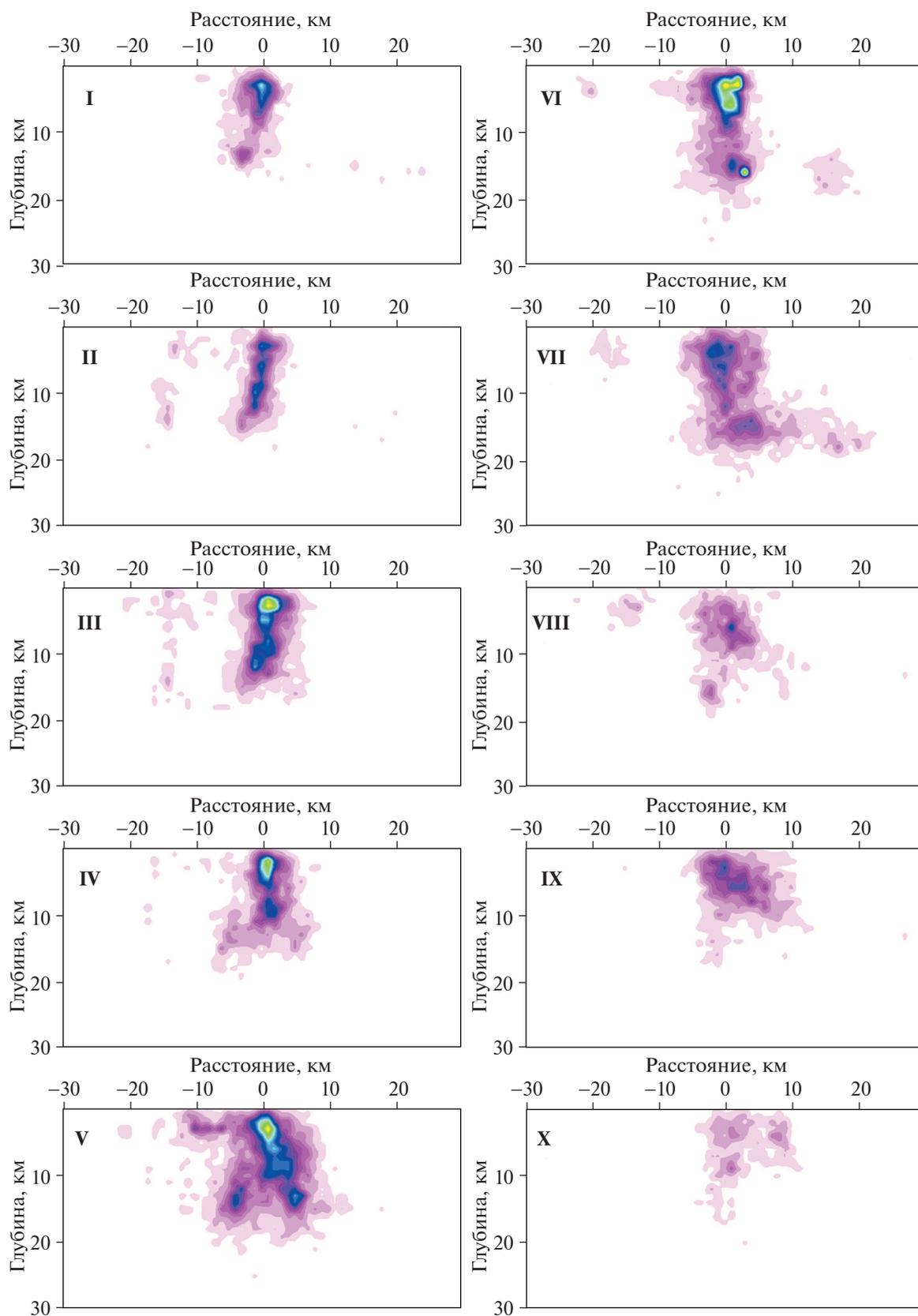


Рис. 4. Разрезы плотности гипоцентров афтершоков в сечениях поперек активизации 2003–2009 гг. по линиям I–X.

выявлены осложнения объемного вида, как кривая разломная зона при Тувинских землетрясениях [3].

Чуйское землетрясение приурочено к сдвиговому разлому, секущему почти перпендикулярно разлом более высокого ранга, который не участвует в сейсмической активизации, вызванной Чуйским землетрясением. Область динамического влияния разлома охватила объемную структуру в его окружении, в которой проявляются следы деформаций, вызванные формированием и развитием данной разломной зоны [25].

Ширина активизированной зоны афтершоковой области меняется вдоль разлома, составляя от 1–2 до 10 км [28]. Мы рассматриваем общие характеристики активизированного магистрального разлома, классификация событий по мелким сопутствующим разломам не проводилась. Кроме магистрального разрыва в афтершоковом процессе наблюдаются активизированные разломы на удалении до 10–15 км в сторону Северо-Чуйского хребта, а также выделяются сейсмически активные разломы оперения.

В афтершоковом процессе Чуйского землетрясения уверенно фиксируются горизонтальные сейсмически активизированные слои. Наиболее ярко выражен сейсмически активный слой на глубинах 10–20 км под Чаган-Узунским блоком, а также сейсмически менее активный аналогичный горизонтальный слой – в районе северо-западного окончания афтершокового процесса. Сейсмически активизированный горизонтальный слой на глубине ~2 км (см. рис. 4, V) уходит в сторону Северо-Чуйского хребта в районе р. Актру.

Было отмечено существование субгоризонтальных сейсмических зон в земной коре, в некоторых случаях была установлена послойная сейсмическая активность в земной коре [26, 21]. Еще более убедительным аргументом горизонтальных разрывных нарушений являются Газлийские землетрясения в Узбекистане 1976 и 1984 гг. [1, 24, 26], когда на дневной поверхности отсутствуют проявления глубинных разломов, соответствующих масштабу землетрясений.

Наиболее выражен слой с горизонтальной сейсмической активизацией под Чаган-Узунским блоком, который примыкает к сдвиговой зоне непосредственно около очага главного события. По полученным геологическим данным, данный блок находился на одном уровне с Чуйской и Курайской впадиной и только в развитии со временем испытал сильное поднятие [4]. Именно под этим блоком наблюдается сейсмически активизированный Чуйским землетрясением горизонтальный слой на глубинах 10–20 км.

Слабо сейсмически активизированный горизонтальный слой расположен на глубинах 10–20 км в северо-западной части Курайской впадины. Именно здесь рельеф впадины выглядит как на-

бор приподнятых блоков [14]. Такое совпадение участков горизонтальной сейсмической активизации глубинных слоев может быть связано со сходством физического состояния недр на этих участках.

Горизонтальный слой афтершоков на глубине около ~2 км, уходящий в горы Северо-Чуйского хребта, зафиксирован в районе разделения афтершокового процесса на три ветви. Две боковые ветви являются непротяженными, как и третья ветвь, к которой относится горизонтальная активизация.

Чуйское землетрясение 2003 г. приурочено к линейной сдвиговой зоне, секущей блоковую структуру и разломы, разделяющие блоки земной коры, существенно отличающиеся по строению, и, таким образом, в афтершоковой активности проявляется объемная структура тектонических нарушений. Землетрясение значительно меньшей магнитуды на сдвиговой зоне формирует вокруг разлома объемную структуру сейсмически активизированных разломов, сформировавшуюся в соответствии с блочным строением эпицентральной зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Детальные сейсмические исследования в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. с большим количеством постоянных и временных сейсмических станций в эпицентральной зоне и за период 2003–2009 гг. с применением современных цифровых алгоритмов уточнения координат гипоцентров позволили установить, что:

- развитие афтершокового процесса неравномерно по плоскости главного разрыва, активизированного Чуйским землетрясением, однако существуют участки без афтершоков, по [19];
- существуют оперения и раздвоения в афтершоковом процессе по длине магистрального разрыва;
- облако афтершоков формирует в плоскости структуру в виде сегмента диска с максимумом глубины ~20 км и минимумом глубин по краям;
- поперечная структура афтершоковой области состоит из сейсмически активизированных разломов и горизонтальных сейсмически активизированных слоев;
- под Чаган-Узунским блоком сформировался горизонтальный сейсмически активизированный слой на глубинах 15–20 км, по площади, охватывающий размеры всего блока и примыкающий к сдвиговой магистральной зоне Чуйского землетрясения;
- в районе р. Актру наблюдается маломощный горизонтальный сейсмически активизированный слой на глубине ~2 км, пододвигающийся под Северо-Чуйский хребет.

Исследование афтершоков показало, что магистральный разрыв изменяется на протяжении 120 км, представляя собой следующее:

- расширение на два сближенных разрыва (северо-западное окончание),
- узкий наклонный в сторону гор разлом,
- систему разнонаклоненных разломов (район р. Актру),
- шириной до 10 км активизированную зону разлома (район Чаган-Узунского блока),
- сочетание вертикального и наклоненного разломов (граница Чуйской впадины и Южно-Чуйского хребта).

К афтершоковому процессу относятся и слабо активизированные разломы в Северо-Чуйском хребте на расстоянии 10–20 км от магистрального разрыва. По блокам I, II и III на глубинах ≥ 10 км наблюдается активизированная область, уходящая под Курайскую впадину, что является проявлением сейсмически активизированного горизонтального слоя.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сейсмическая активность структуры активизированных разломов исследована нами на основе высокоточных эпицентральных работ. Ошибки определения координат событий на плоскости не превышают 300 м и ошибки глубины событий – не более 500 м. По данным палеосейсмологического метода, на территории Горного Алтая землетрясения с магнитудой 7.5 происходят с периодом повторяемости 1–3 тыс. лет [15]. Чуйское землетрясение является одним из ряда наиболее крупных землетрясений Горного Алтая, под воздействием которого активизировалась система разломов, не обладающая высшим рангом среди глубинных разломов Чуйско-Курайской зоны [15]. Афтершоковый процесс выявил объемную структуру активизированной области, при этом плоскость главного сдвига почти вертикальная.

Главный разрыв сопровождался плоскостями вспомогательных разрывов, которые ответвлялись от главной плоскости.

Исследованная афтершоковая область, возникшая в результате произошедшего Чуйского землетрясения, может рассматриваться как сейсмогенерирующий сегмент разлома, по [15]. Структурное построение активизированных разломов с минимальными глубинами афтершоков по краям и максимальными в центре (до 20 км), вероятно, связано с его сдвиговым механизмом. Послойная сейсмичность сочетается с активизацией сдвиговой разломной зоны, которая является вмещающей разлом средой [21, 26].

Северо-западное окончание афтершоковой области расходуется на два разлома и вдоль них происходит быстрое затухание афтершоков. Раз-

двоение происходит на пересечении под прямым углом с разломом меньшего ранга.

Юго-восточное окончание находится в Чуйской впадине, где активизируются разломы на глубине в первые километры в зоне магистрального разрыва, – один разлом является вертикальным, второй разлом уходит под углом 45° в Чуйскую впадину.

В области афтершоков Чуйского землетрясения наблюдается ослабление сейсмической активности в узлах пересечения магистрального разлома с неактивизированными разломами, ориентированными перпендикулярно. Предполагалось на основе изучения афтершоковой активности при других крупных землетрясениях повышение интенсивности возникновения афтершоков [17] в узлах пересечения разломов. Часто разломные зоны отображаются как структуры разрывов, расширяющиеся снизу вверх, по [18, 25], но активизированная структура разломов при Чуйском землетрясении – это частично узкая 1–2 км, слегка наклонная, частично широкая разломная зона ~ 10 км в вертикальном сечении.

ВЫВОДЫ

1. Афтершоковый процесс вдоль разломной зоны на вертикальной плоскости представляет собой сегмент круга с минимальными глубинами (~ 2 км) очагов на краях и максимальными (~ 20 км) в центре. Карты плотности очагов отражают неравномерность сейсмической активности, происходит ее уменьшение на участках пересечения сдвиговой разломной зоны с суб-перпендикулярными разломами. Вдоль магистрального разрыва ширина полосы афтершоков меняется от 1–2 до 10 км.

2. Блоковая структура среды вдоль магистрального разлома отражается в развитии оперений и разветвлений в структуре сейсмически активизированных разломов. Зафиксированы активизированные разломы в структуре Северо-Чуйского хребта на удалении 10–20 км от основного магистрального разлома и параллельные ему.

3. Выявлены горизонтальные сейсмически активизированные слои, которые отходят от основного разрыва. Под Чаган-Узунским блоком на глубине 10–20 км обнаружен первый активизированный слой, под северо-западным склоном Курайской впадины обнаружен второй активизированный слой также на глубине 10–20 км и выявлен на глубине ~ 2 км третий активизированный слой под Северо-Чуйским хребтом.

Благодарности. Авторы благодарны акад. С.В. Гольдину и акад. М.И. Эпову, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск, Россия) за влияние на развитие исследований и поддержку в получении финансирования на полевые работы.

Авторы выражают искреннюю благодарность д. т. н. Ю.И. Колесникову, к. ф.-м. н. Е.В. Лесковой, А.Ю. Семину, А.Г. Филиной, Е.В. Шевкуновой и другим коллегам из Алтае-Саянского филиала ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН” (г. Новосибирск, Россия) за участие в экспериментальных работах по данной теме, которые проводились в 2003–2009 гг. в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения.

Авторы признательны редактору журнала М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва) за тщательное редактирование статьи.

Авторы благодарны рецензенту проф. В.Г. Трифонову (ГИН РАН, г. Москва) и анонимному рецензенту за комментарии, которые позволили улучшить статью.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” по проекту № 0152-2016-0002 и Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН по проекту № 0331-2019-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: Академкнига, 2003. 375 с.
2. *Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнев К.Г., Погребченко В.В.* Очаг и афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г. // *Физика Земли.* № 2. С.85–96.
3. *Аржанникова А.В., Аржанников С.Г.* Сейсмоструктурные исследования в Восточной Туве и землетрясения 27.12.2011 и 26.02.2012 гг. – В кн.: *Тувинские землетрясения 2011–2012 гг.* – Кызыл: ТувИКОРП СО РАН, 2014. С. 10–25.
4. *Дельво Д., Тениссен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А.* Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль // *Геология и геофизика.* 1995. Т. 36. № 10. С. 31–51.
5. *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.
6. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г.* Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970 г., $M_s = 7.0$ (Монгольский Алтай), афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области // *Геология и геофизика.* 2012. Т. 53. № 10. С. 1417–1429.
7. *Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М.* Сейсмоструктурная активизация новейших структур Сибирского кратона // *Геотектоника.* 2018. № 6. С. 36–54.
8. *Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А.* Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // *Геодинамика и тектонофизика.* 2010. Т. 1 № 4. С. 419–440.
9. *Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
10. *Лунина О.В., Гладков А.С., Новиков И.С., Агатова А.Р., Высоцкий Е.М., Еманов А.А.* Сейсмогенные деформации и поля напряжений в разломной зоне Чуйского землетрясения 2003г., $M_s = 7.5$ (Горный Алтай) // *Геотектоника.* 2006. № 3. С. 52–69.
11. *Мак-Калпин Д.П., Роккуэл Т.К., Уэлдон Р. (второй).* Палеосейсмология. – Дж.П. Мак-Калпин (ред.). М.: Научный мир, 2011. Т. 2. Гл. 6 (Палеосейсмология в условиях тектонического сдвига). С. 1–94.
12. *Молнар П., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Демьянович М.Г., Борисов В.А., Ващилов Ю.Я.* Деформация и разрывообразование при сильных землетрясениях в Монголо-Сибирском регионе. – В сб.: *Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона.* – Н.А. Логачев, В.М. Кочетков, Ю.А. Зорин (ред.). – Новосибирск: Наука, 1995. С. 5–55.
13. *Молнар П., Курушин Р.А., Баясгалан А., Хаднат К.В.* Дислокации Гоби-Алтайского (Монголия) землетрясения 1957 г. Новосибирск: СО РАН, 1998. 148 с.
14. *Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Санчаа А.М.* Глубинное строение и характеристики краевых структур Курайской впадины (Горный Алтай) по данным геоэлектрики с контролируемым источником // *Геология и геофизика.* 2014. Т. 55. № 1. С. 119–132.
15. *Рогожин Е.А., Платонова С.Г.* Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 130 с.
16. *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А.* Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения // *Геотектоника.* 2007. № 2. С. 3–22.
17. *Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмоструктуры. М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.
18. *Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: СО РАН – филиал “ГЕО”, 2003. 244 с.
19. *Сим Л.А., Кучай О.А., Рогожин Е.А., Смагличенко Т.А.* Особенности распределения тектонических напряжений вдоль сдвигов (по сейсмологическим и геологическим данным). – В кн.: *Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия.* – Мат-лы Всеросс. совещ. (18–21 августа 2009 г., г. Иркутск, – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т. 2. С. 119–121.
20. *Солоненко В.П., Тресков А.А., Флоренсов Н.А.* Катострофическое Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 г. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 148 с.
21. *Трифонов В.Г.* Неотектоника подвижных поясов. – К.Е. Дегтярев (ред.). – М.: ГЕОС, 2017. (Тр. ГИН РАН. 2017. Вып. 614), 180 с.
22. *Уфимцев Г.Ф.* Проблема объемных землетрясений во Внутренней Азии // *Геология и разведка.* 2004. № 6. С. 12–15.
23. *Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Ласточкин С.В., Балжинням И., Монхоо Д.* Землетрясения и основы

- сейсмического районирования Монголии // Тр. совместной советско-монгольской научно-иссл. геол. экспедиции / В.П. Солоненко, Н.А. Флоренсов (ред.). М.: Наука, 1985. Вып. 41. 224 с.
24. *Шебалин Н.В.* Сильные землетрясения. М.: Акад. горн. наук, 1997. 542 с.
 25. *Шерман С.И.* Сейсмический процесс и прогноз землетрясений. Тектофизическая концепция. Новосибирск: ГЕО, 2014. 359 с.
 26. *Шукин Ю.К., Шебалин Н.В.* Атлас глубинного строения очаговых зон землетрясений. Воронеж: Научная книга, 2016. 102 с.
 27. *Barbot S., Hamiel Y., Fialko Y.* Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 $M_w = 7.2$ Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. B03403. <https://doi.org/10.1029/2007JB005063>
 28. *Deroin J.-F., Buslov M.M.* Geomorphic study of seismically active areas using remote sensing data: Case of the Gorny Altai (Siberia) affected by the 2003 Altai earthquake // *Bull. Soc. Geol. Fr.* 2017. Vol. 188. № 1–2. P. 1–15. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017012>
 29. *Dorbath C., Woerd J.V.D., Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman J.Y.* Geological and seismological field observations in the epicentral region of the 27 September 2003 $M_w = 7.2$ Gorny Altai earthquake (Russia) // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2008. Vol. 98. № 6. P. 2849–2865.
 30. *Klein F.W.* User's Guide to HYPOINVERSE-2000. A Fortran Program to solve for earthquake locations and magnitudes // *US Geol. Surv. Open – file Rep. no. 02-71.* 2002. 123 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2002/0171/pdf/of02-171.pdf> (Accessed May 25, 2020).
 31. *Mattaghi A.A.* Double-difference relocation of earthquake hypocenters along the Southern Flank of the Central Alborz, Iran // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2010. Vol. 100. № 5A. P. 2014–2023.
 32. *Nissen E., Emmerson B., Funning G.J., Mistrukov A., Parsons B., Robinson D., Rogozhin E., Wright T.* Combining InSAR and seismology to study the 2003 Siberian Altai earthquakes – dextral strike-slip and anticlockwise rotations in the Northern India–Eurasia collision zone // *Geophys. J. Int.* 2007. Vol. 169. P. 216–232.
 33. *Tatevossian R.E., Rogozhin E.A., Arefiev S.S., Ovsyuchenko A.N.* Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies // *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 2009. Vol. 316. P. 73–91.
 34. *Waldhauser F.A., Ellsworth W.L.* Double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2000. Vol. 90. № 6. P. 1353–1368.
 35. *Zhang H., Turber C.H.* Double-difference tomography: Method and application to the Hayward fault, California // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2003. Vol. 93. № 5. P. 1875–1889.

Seismotectonic Features of the Spatial Volumetric Structure of Faults Activated with Chuy Earthquake $M_s = 7.3$ Occurred on September 27, 2003 in Mountain Altai (Russia): Results of the Study of the Upper-Crustal Focal Area

A. F. Emanov^{a,*}, A. A. Emanov^{a,b}, A. V. Fateev^{a,b}

^a*Federal Research Center “Unified Geophysical Service of RAS”, Altai-Sayan Branch, bld. 3 Acad. Koptyug prosp., 630090 Novosibirsk, Russia*

^b*Trofimuk Institute for Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, bld. 3 Acad. Koptyug prosp., 630090 Novosibirsk, Russia*

*e-mail: Emanov@gs.nsc.ru

Based on the data from the dense network of seismic stations, long-term observations, and modern methods for locating hypocenters of aftershocks of the Chuy earthquake in 2003, spatial volumetric seismic portrait of seismically activated faults was formed. A cup-shaped structure of the aftershock process with a maximum focal depth of ~20 km in the center of the aftershock region, the presence of uneven changes in the density of the aftershock origins along the main shear fault with the weakening of the activity of the main shear zone at the sections of its intersection with faults were established. The width of the activated zone along the main fault varies from 1–2 to 10 km, which can be explained by the variability of the zone of influence of the fault with distance. Established variability of the slope of the activated main fault linked with the block structure of the epicentral region. The feathering and branching plots on the main fault were identified and studied. Discovered horizontal seismically activated layers extending from the main fault to the side. Two layers are located at a depth of 10–20 km. The first layer is directed under the Chagan-Uzun block, the second layer is under the northwestern edge of the Kurai depression. The third horizontal layer at a depth of ~2 km departs from the main fault to the North Chuy range.

Keywords: Chuy earthquake, aftershock, Chagan-Uzun block, shear fault zone, fault dynamic zone, sub-horizontal activated layer