

УСТОЙЧИВЫЕ СТРУКТУРЫ АФТЕРШОКОВ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 ГОДА

Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В.

Аннотация

На основе исследований с плотными сетями станций исследованы афтершоки Чуйского землетрясения 2003 года. Более 50 тысяч афтершоков представлены как карты плотности очагов и на основе сопоставления их с разрывами дневной поверхности, с блоковой структурой очаговой области и тектоникой. Крупная сдвиговая деформация, сформировавшаяся при Чуйском землетрясении, сопровождается вытянутым вдоль неё пространственно прерывистым афтершоковым процессом. Карты плотности афтершоков за длительный период по своей структуре отличаются от сейсмической активности афтершоковой области начального периода. Наблюдается взаимосвязь блоковой структуры эпицентральной области со структурой афтершокового процесса. Узлы пересечения разломов с афтершоковой областью характеризуются пониженной афтершоковой активностью. Развитие афтершокового процесса только частично приурочено к блокоразделяющим разломам, а чаще афтершоковый процесс смещен относительно этих разломов или в виде ответвлений уходит в сторону.

Ключевые слова:

Чуйское землетрясение, афтершоки, физика очага землетрясения, разрывы поверхности, тектонические структуры

УСТОЙЧИВЫЕ СТРУКТУРЫ АФТЕРШОКОВ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 ГОДА

А.Ф. Еманов¹, А.А. Еманов^{1,2}, А.В. Фатеев^{1,2}

¹ – Алтай-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск, Россия;

² – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. На основе данных, полученных в ходе экспериментов с плотными сетями станций, исследованы афтершоки Чуйского землетрясения 2003 года. Карты плотности очагов более 50 тысяч афтершоков сопоставлены с разрывами дневной поверхности, с блоковой структурой и тектоникой очаговой области. Крупная сдвиговая деформация, сформировавшаяся при Чуйском землетрясении, сопровождается вытянутым вдоль неё пространственно прерывистым афтершоковым процессом. Карты плотности афтершоков за длительный период по своей структуре отличаются от сейсмической активности афтершоковой области начального периода. Наблюдается взаимосвязь блоковой структуры эпицентральной области со структурой афтершокового процесса. Узлы пересечения разломов с афтершоковой областью характеризуются пониженной афтершоковой активностью. Развитие афтершокового процесса только частично приурочено к блокоразделяющим разломам; во многих случаях афтершоковый процесс смещен относительно этих разломов или уходит в сторону в виде ответвлений.

Ключевые слова: Чуйское землетрясение, афтершоки, физика очага землетрясения, разрывы поверхности, тектонические структуры.

Чуйское землетрясение 2003 года с $M_s=7.3$ в Горном Алтае произошло в условиях блоковой структуры по размерам структур меньшим, чем длина афтершоковой области. Эпицентр землетрясения находится в центре сети сейсмологических станций Алтайского сейсмологического полигона, созданного за год до Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2003б]. Наличие плотной сети станций с удачной конфигурацией в эпицентральной зоне

позволило получить высокоточную и детальную информацию об афтершоках Чуйского землетрясения [Гольдин и др., 2004].

Афтершоковые процессы крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области длятся годы и даже десятилетия [Еманов А.Ф. и др., 2003а; 2006]. На Алтайском сейсмологическом полигоне ежегодно в летний период разворачивались сети временных станций для более детального изучения сформировавшейся после крупного землетрясения активизированной эпицентральной области [Гольдин и др., 2004; Еманов А.А. и др., 2005; 2009; 2014; Арефьев и др., 2004; 2006]

В данной работе преследуется цель постичь взаимосвязи тектонической структуры эпицентральной области с особенностями протекания сейсмической активизации, вызванной Чуйским землетрясением, а также сравнить особенности афтершокового процесса данного землетрясения с афтершоковыми процессами других землетрясений Евразии [Арефьев, 2003; Шебалин, 1997; Рогожин и др., 2011; Рогожин, 2012; Еманов А.Ф. и др., 2003а; 2006].

Экспериментальные данные

На рис. 1 представлена сеть стационарных сейсмологических станций в Алтае-Саянской горной области в 2003 году, когда произошло Чуйское землетрясение. Кругом обозначен Алтайский сейсмологический полигон, на территории которого до 2002 года работало всего три сейсмологических станции. В Горном Алтае к моменту землетрясения создана самая плотная сеть сейсмологических станций. В то же время немало станций находится в ближайшем окружении полигона, что позволяет существенно расширять информацию о землетрясениях. Представительность регистрации позволяет фиксировать землетрясения с магнитудой 3 и более всей региональной сетью станций (рис.1). Сейсмичность Горного Алтая до и после Чуйского землетрясения изучалась с высокой точностью. Отличительной особенностью афтершоковых процессов в Алтае-Саянской горной области является большая длительность: как правило, сейсмичность эпицентральной области крупного землетрясения превышает фоновый уровень в течение десятилетий [Еманов А.Ф. и др., 2003б; 2006]. Для наблюдения за афтершоковым процессом ежегодно, начиная с 2002 года, в Чуйско-Курайской зоне в летнее время выставлялись временные сейсмологические станции. В соответствии с решаемыми задачами ежегодно сеть изменялась. На рис.2 представлены варианты конфигурации сети станций полигона.

Главный толчок Чуйского землетрясения произошёл на границе Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Было установлено, что в первой своей фазе развития

(первые дни после землетрясения) афтершоковый процесс охватывал именно этот блок [Гольдин и др., 2004], и лишь во второй фазе развития афтершоковый процесс вытянулся в линейную область вдоль юго-западных границ Чуйской и Курайской впадин.

Отличительными особенностями экспериментальных данных об афтершоках Чуйского землетрясения являются:

- Высокая детальность и точность исследований, обеспеченная большим количеством сейсмических станций в эпицентральной зоне и современными методами обработки с постоянным уточнением результатов.
- Исследования в большом диапазоне энергий. Плотные системы наблюдений, методическая культура эксперимента и высокоточная современная аппаратура обеспечивают регистрацию событий малых энергий.
- Длительный период экспериментальных работ (более 15 лет), что позволяет видеть афтершоковый процесс в развитии и повышать точность интерпретации за счёт увеличения количества информации.
- На данный момент каталог афтершоков Чуйского землетрясения – это более 50 тысяч событий.

На рис. 3 видно, что область афтершокового процесса охватывает выделенные еще в 2003 году структуры [Гольдин и др., 2004]. В данной работе рассмотрены результаты, полученные в период с 2003 по 2009 гг. Данный выбор обусловлен прежде всего тем, что в дальнейшем начинают происходить изменения в структуре сейсмичности, требующие отдельного исследования.

Ошибки в определении координат и глубин землетрясений, представленных на рис. 3 составляют в большинстве случаев менее 1 км. В обработке использовалась программа HYPOINVERSE-2000 [Waldhauser F., Ellsworth, 2000] и слоистая скоростная модель. Более подробно с определением координат гипоцентров афтершоков Чуйского землетрясения можно познакомиться в работе [Еманов и Лескова, 2005]. По рис. 3 трудно анализировать закономерности структуры афтершокового процесса. Значительный массив событий при большом количестве регистрирующих станций позволяет более детально исследовать структуру афтершокового процесса, но при этом следует помнить, что в эпицентральных областях крупнейших землетрясений наблюдения проводились в течение короткого периода сразу после основного события [Шебалин, 1997; Арефьев, 2003]. Представленные в данной работе исследования выполняются на основе многолетних наблюдений в эпицентральной области Чуйского землетрясения. Сведения об афтершоковом процессе начального периода можно найти в работах [Гольдин и др., 2004; Арефьев и др., 2004;

Еманов А.А. и Лескова, 2005; Еманов А.А. и др., 2009; Dorbath и др., 2008; Nissen и др., 2007; Barbot и др., 2008].

Структура афтершоковой области и блоковое строение

Применение более современных методов обработки к данным многолетних наблюдений позволяет обеспечить высокую разрешённость и получить новые данные. С использованием метода двойных разностей достаточно детально представлена структура афтершоковой области и её развитие во времени [Еманов А.А. и др., 2009]. Следующим этапом было применение методов DD-томографии [Waldhauser, Ellsworth, 2000], когда с каждым событием уточняется и скоростная модель и координаты гипоцентра землетрясения.

На рис. 4 представлена карта плотности афтершоков Чуйского землетрясения за период более шести лет. Без сомнения, уточняющая обработка и представление данных в таком виде дают возможность лучше видеть структуру афтершокового процесса и его связь с блоковым строением Чуйско-Курайской зоны. Ясно, что получено новое видение развития афтершоковой активности Чуйского землетрясения, позволяющее оценивать взаимосвязь тектонического строения с активностью эпицентральной зоны.

Обозначения основных блоков, активизированных в период афтершокового процесса, представлены на рис.5. Прямоугольник на карте полностью охватывает афтершоковый процесс. Линия АВ приблизительно соответствует центральной линии вытянутой оси афтершокового процесса. Линия CD характеризует перпендикулярное направление, в котором представлены структуры, в то или иное время активизации участвующие в сейсмическом процессе. Цифры по осям – расстояние в км. Цифра 0 – эпицентр Чуйского землетрясения.

Первый крупный афтершок, ближайший к эпицентру Чуйского землетрясения произошёл 27.09.2003г. 18:52 GMT ($M_w = 6.4$), второй – 01.10.2003г. 01.03 GMT ($M_w = 6.6$). Представленные на рис. 5 афтершоки, оказывали существенное влияние на пространственное развитие афтершокового процесса в первые дни после главного события. Детальное рассмотрение развития процесса в начальный период его развития представлено в работах [Гольдин и др., 2004; Еманов и Лескова, 2005; Еманов А.А. и др., 2009].

Карта плотности афтершоков более длительного периода (рис. 4) позволяет детализировать структуру, сформировавшуюся в начальный период развития афтершокового процесса, и даёт представление об устойчивых закономерностях

активности за шестилетний период. В упомянутых выше работах было выделено четыре элемента афтершоковой области. Рассмотрим изменения структуры за более длительный период. Первый элемент (если смотреть с юго-востока) касался афтершокового процесса в окраине Чуйской впадины. На рис. 4 он так и выявляется как устойчивая область афтершокового процесса, контрастно отделяющаяся от основного процесса участком с пониженной плотностью афтершоков. Данный участок прилегает к блокораздельному разлому. При этом участок с пониженной активностью существенно расширился (рис. 4).

Следующий по направлению к северо-западу элемент афтершоковой области – это контакт Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Именно к этому элементу относится главный толчок Чуйского землетрясения. На карте плотности афтершоков данный элемент не выглядит как единое целое. Он представляет собой два участка с повышенной плотностью афтершоков, разделённых долиной реки Кускунур, протекающей по разломной зоне. Ещё раз отмечается, что пониженная плотность афтершоков приурочена к секущей афтершоковый процесс разломной зоне. В районе Чаган-Узунского блока оба элемента компактные.

Следующая особенность, выявившаяся за длительный период, – это то, что участок от активной зоны эпицентра и практически до р.Актру оказался участком с пониженной афтершоковой активностью.

От р.Актру сформировался тройственный элемент афтершоковой области с протяженной центральной ветвью и короткими боковыми ветвями. К этому элементу относится крупный афтершок с $M_w = 6.4$. Центральная ветвь в своём северо-западном окончании пространственно изгибается в сторону Курайской впадины (рис. 4).

Дальнейшее развитие продолжилось сильнейшим афтершоком с $M_w = 6.7$ [Еманов А.А. и др., 2009], сформировавшим новый элемент афтершокового процесса – от долины р.Куркуреквдоль контакта Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом до середины приподнятого блока северо-западного окончания Курайской впадины (рис. 4). Уже в начальный период существования афтершокового процесса с использованием метода двойных разностей на окончании афтершоковой области выявлена структура типа «конского хвоста» [Еманов и Лескова, 2006]. В соответствии с рис.4 северо-западное окончание активизированной области сформировалось как разветвлённый преимущественно на две ветви процесс.

Представленная на рис. 4 карта плотности афтершоков характеризуется интересной структурой и при этом охватывает довольно разнородную по строению земную кору с явно выраженным блоковым строением. Высокая точность определения координат событий в районе Алтайского сейсмологического полигона [Еманов А.Ф. и др., 2003б;

2009] обеспечивает возможности детального сопоставления данных в районе Чуйского землетрясения с результатами изучения тектоники и геоморфологии.

На рис. 6 представлены данные о разрывах дневной поверхности [Рогожин и др., 2007] в сравнении с картой плотности афтершоков. Разрывы дневной поверхности – прерывистый и ветвящийся процесс, далекий от полного соответствия с афтершоковой активностью. Данный факт говорит о том, что Чуйское землетрясение и главные его два афтершока неравномерно разгрузили напряжённое состояние участка земной коры, охваченного Чуйским землетрясением. Афтершоковый процесс начального периода, имевший несколько иную структуру, анализировался раньше [Еманов и Лескова 2005; 2006; Еманов А.А. и др. 2009]. Юго-восточное окончание афтершоковой области увязывается с поперечным к ней разрывом. На данном участке невысокая афтершоковая активность, и в то же время присутствует разрыв дневной поверхности при главном событии. Ближайший к нему разрыв у борта Чуйской впадины изогнут от ориентировки вдоль афтершокового процесса к направлению почти поперёк афтершокового процесса. Данный разрыв огибает участок наибольшей сейсмической активности в Чуйской впадине (Рис. 6).

Как минимум четверть элемента афтершокового процесса в Чуйской впадине не приурочено к разрыву дневной поверхности. Судя по характеру разрывов и по плотности афтершоков в Чуйской впадине, мы наблюдаем активизацию в ограниченной для развития очаговой области зоне.

По афтершоковой активности в районе Чаган-Узунского блока выделялся один элемент [Еманов А.А. и др. 2009], а по плотности событий выявилось его разделение на два элемента. Разрывы дневной поверхности, хотя их также два, не ограничены областью этих элементов. При выходе из Чаган-Узунского блока в Чуйскую впадину образовался разрыв с разветвлениями. Разрыв начинается в юго-восточном элементе в районе Чаганского блока, порождает три ветви, две из которых выходят в Чуйскую впадину через малоактивные области и соприкасаются с районом повышенной афтершоковой активности в Чуйской впадине. Второй разрыв в районе Чаган-Узунского блока прямолинеен и средней своей частью примыкает к активизированной в афтершоковом процессе эпицентральной зоне Чуйского землетрясения. Разрыв не совпадает с границами элемента. Он пересекает под углом долину р.Кускунур, протекающую по разлому. В другом направлении разрыв выходит в угол Курайской впадины, пересекая неактивную в афтершоковом процессе область и заканчивается около сейсмически активной области на границе Курайской впадины с Северо-Чуйским хребтом около р.Актру.

У р.Актру по карте плотности событий сформировались три расходящихся элемента. Одна короткая ветвь афтершоковой активности уходит в Северо-Чуйский хребет. Именно эта ветвь могла бы быть продолжением разрыва дневной поверхности, идущего от главного события, но впереди ограничение в виде мощного горного массива и выход на вершину высотой около 4000м. Ветвь обрывается, и короткий разрыв дневной поверхности картируется под другим углом к длинной оси афтершокового процесса (рис. 6). Параллельно этому разрыву развивается ещё одна ветвь повышенной афтершоковой активности, уходящая в Курайскую впадину. Развитие в этом направлении быстро завершается. Следующий разрыв дневной поверхности идёт по границе Северо-Чуйского хребта с Курайской впадиной. Около него развивается длинная и наиболее активная ветвь афтершокового процесса. Лишь в северо-западном окончании этого элемента разрыв проходит дальше, а афтершоковая область при повороте в сторону Курайской впадины завершается.

Следующий элемент афтершоковой области начинается от долины р.Куркурек и до р.Маашей (Мажой) – это узкая прямолинейная ветвь. Долина р.Маашей перпендикулярно сечёт афтершоковый процесс, и за ней афтершоковый процесс распадается на две выраженные ветви (рис. 6), которые в скором времени обрываются. Разрывы дневной поверхности на северо-западном окончании афтершоковой области не совпадают с линией афтершокового процесса. Один разрыв уходит в горы, и целая серия разрывов практически пересекает Курайскую впадину.

Из анализа карты плотности афтершоков за период 2003-2009гг. следует, что, во-первых, прерывистая структура разрывов дневной поверхности и прерывистая структура зон повышенной афтершоковой активности не имеют полного соответствия; во-вторых, за длительный период картина афтершоковой активности становится более неоднородной с ярко выраженными участками повышенной и пониженной активности и при неполном соответствии разрывов активным зонам можно полагать, что при Чуйском землетрясении главное событие и два крупнейших афтершока неравномерно сняли напряжения с эпицентральной области; в-третьих, при Чуйском землетрясении наблюдается ветвящаяся структура как разрывов дневной поверхности, так и зон повышенной афтершоковой активности, не совпадающих друг с другом.

На рис. 7 зоны афтершоковой активности сравниваются с блокораздельными разломами, выделенными по данным морфотектоники [Новиков, 2004; Новиков и др., 2008]. Разломная зона между Северо-Чуйским и Южно-Чуйским хребтами по рангу в данной зоне Алтая наиболее значима. Чуйское землетрясение своими структурами почти перпендикулярно сечёт эту разломную зону. В Чуйской впадине кроме разломной зоны

вдоль Южно-Чуйского хребта выделена разломная зона, субпараллельная ей внутри впадины. Наибольшая афтершоковая активность наблюдается между этими разломными зонами с небольшим выходом во внутренний блок Чуйской впадины.

Блокоразделяющая разломная зона между Северо-Чуйским хребтом и Чаган-Узунским блоком смещена от двух зон афтершоковой активности в северо-восточном направлении.

Блокоразделяющий разлом между Курайской впадиной и Северо-Чуйским хребтом проходит через центральные ветви зон афтершоковой активности.

По рис. 7 можно сделать заключения. Во-первых, сдвиговая активизация при Чуйском землетрясении не связана с разломом высшего ранга и сечёт его под углом, близким к прямому. Во-вторых, афтершоковый процесс в половине случаев не увязывается с блокоразделяющими разломами.

На рис. 8 представлено разделение речной сетью афтершокового процесса. Сопоставление речной сети со структурой афтершоков представляет интерес ввиду приуроченности рек к зонам тектонических разломов. Чуйское землетрясение приурочено к границе горных хребтов со впадинами с двух сторон Чаган-Узунского блока. Реки текут с хребтов во впадины и соответственно пересекают поперёк зону афтершокового процесса. На юго-восточном окончании афтершоковой области наибольшая плотность афтершоков наблюдается между реками Ирбисту и Елангаш. Вновь повышение плотности афтершоков наблюдается между реками Елангаш и Чаган. Приграничная область Чуйской впадины с Чаган-Узунским блоком практически является разрывом в афтершоковом процессе. Именно здесь проходит Чарышко-Теректинский глубинный разлом, не активизированный Чуйским землетрясением.

Сейсмически активизированные области вблизи границы Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом разделены рекой Кускунур. Долина реки, приуроченная к разлому, малоактивна.

За границей Чаган-Узунского блока, вдоль которой течёт р.Тетё, сформировалась ещё одна широкая сейсмически малоактивная зона до р.Актру. В этой зоне, как и с другой стороны Чаган-Узунского блока, не наблюдается сейсмической активности не только в разломной зоне, но и в блоках между двумя речными долинами.

Далее за долиной р. Актру вновь зоны наибольшей сейсмической активности наблюдаются в блоках между речными долинами. Фактически афтершоковый процесс ослабляется на пересечениях с разломными зонами (речными долинами) и усиливается в блоках с целиковым строением.

Прежде чем объединить полученные представления об особенностях афтершокового процесса Чуйского землетрясения в тезисной форме, представим информацию об афтершоковом процессе более ранней стадии.

- Средняя сейсмическая активность, оцениваемая по карте плотности афтершоков за 2003-2009гг., является мерой закономерностей разрядки напряжённого состояния в очаговой области Чуйского землетрясения. Повышенная афтершоковая активность соответствует участкам с большим нарушением равновесного состояния среды.

- Карта плотности афтершоков за период 2003-2009гг. существенно иначе отражает структуру афтершокового процесса Чуйского землетрясения, чем публикации по структуре начального периода [Гольдин и др., 2004; Еманов А.А. и Лескова 2005; 2006; Еманов А.А. и др. 2009; Арефьев и др., 2004; Сим и др., 2009; Рогожин и др., 2011], что объясняется изменениями во времени пространственной структуры.

- В более ранних работах уже выделялись элементы в структуре афтершоковой области [Еманов А.А. и др. 2009] и прерывистость афтершокового процесса вдоль активизированной сдвиговой зоны [Сим и др., 2018]. Структура афтершокового процесса, представленная в данной работе, имеет существенные отличия от структуры ранней стадии и одновременно наблюдается частичное сходство.

- Значимые отличия в структуре афтершокового процесса обнаруживаются практически во всех выделявшихся элементах.

- Афтершоковый процесс в районе стыка Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом со временем разделился на две активные области, и при этом даже близкая к главному событию активная область смещена в сторону Северо-Чуйского хребта. Важные изменения произошли в афтершоковом процессе с обеих сторон Чаган-Узунского блока. Плотность афтершоков на выходе сдвиговой области в Чуйскую впадину в значительной степени снижена. Ещё более значительное снижение плотности афтершоков произошло при выходе сдвиговой области в район Курайской впадины. Если в начальный период развития афтершокового процесса (2003-2004гг.) намечался узкий разрыв активности на границе Чаган-Узунского блока, то со временем сформировалась широкая область пониженной активности от Чаган-Узунского блока до р.Актру. Следует отметить, что в начале развития афтершокового процесса угол Курайской впадины около Чаган-Узунского блока отличался высокой сейсмической активностью.

- Около р.Актру начинается самый активный по плотности афтершоков ветвящийся элемент. Он уже описан в тексте и отличается от сейсмичности начального

периода чёткостью структурных линий и их увязанностью с тектонической структурой, которые трудно было проследить в начальной стадии процесса (2004-2005гг).

- В Чуйской впадине наиболее активные зоны со временем отодвинулись от Чаган-Узунского блока и лучше увязываются с разрывами дневной поверхности при главном событии, чем это было в начальный период.

В целом о развитии афтершокового процесса Чуйского землетрясения по усреднённым во времени данным можно сказать, что:

- Крупная сдвиговая деформация, сформировавшаяся при Чуйском землетрясении, сопровождается вытянутым вдоль неё пространственно прерывистым афтершоковым процессом.

- Карты плотности афтершоков за длительный период по своей структуре отличаются от сейсмической активности афтершоковой области начального периода. Тем не менее, мы наблюдаем взаимосвязь блоковой структуры эпицентральной области со структурой афтершокового процесса.

- Отмечаются участки магистральной подвижки, в пределах которой разрыв поверхности и линия афтершоковой активности совпадают, а также участки разрыва поверхности без афтершоковой активности. В афтершоковом процессе Чуйского землетрясения обнаружены структуры ответвлений от основного разрыва дневной поверхности.

- Развитие афтершокового процесса только частично приурочено к блокоразделяющим разломам, а чаще афтершоковый процесс смещен относительно этих разломов или в виде ответвлений уходит в сторону.

- Магистральную линию афтершокового процесса неоднократно пересекают разломные зоны. Участки пересечения разломов менее сейсмичны, чем участки прохождения разрывом целиковых зон.

- На выходе магистрального разрыва за пределы Чаган-Узунского с обеих сторон сформировались широкие области пониженной афтершоковой активности.

Полученная структура афтершоковой активности вполне увязывается с блоковым строением эпицентральной области, но имеет ряд особенностей, которые отличают афтершоки Чуйского землетрясения от представлений, полученных при изучении других землетрясений. Структура, высвеченная по результатам длительных наблюдений, позволяет анализировать среднюю составляющую процесса. Но при этом не следует забывать о том, что процесс изменчив во времени. Блоковая структура области была явно отмечена при обнаружении иерархии нарядённого состояния и её изменений во времени [Лескова и Еманов 2013; 2014].

Сравнение Чуйского землетрясения с крупными землетрясениями Евразии

В ряде случаев афтершоковые процессы крупных землетрясений исследовались с использованием временных сетей станций при организации эпицентральных экспедиций [Шебалин, 1997; Арефьев, 2003, Арефьев и др. 2008; Бхатачарая и др. 2009; Дорбат и др., 2004; Маничандра Сануджам и др. 2009; Мельникова и др. 2012].

Исследования афтершоков Дагестанского землетрясения [Шебалин, 1997] позволили сделать следующие выводы: 1. Афтершоки не заполняют всю плоскость главного разрыва, они разделились на две группы: вблизи гипоцентра главного толчка и вблизи западного края разрыва. 2. Афтершоки этих групп закономерно отличаются друг от друга. Афтершоковый процесс каждой из групп протекал разными путями. 3. В центральной части афтершоки возникали в течение относительно короткого времени, и среди них преобладали относительно сильные толчки. Афтершоки последствия происходят в разбитой главным событием среде. 4. В краевой области заметное преобладание слабых афтершоков и длительно не спадающая сейсмическая активность. Афтершоки развития происходят в неподготовленной, неупорядочено раздробленной среде.

При обобщении результатов эпицентральных исследований с временными сетями станций [Арефьев, 2003] у автора сформировались представления об афтершоках крупных землетрясений: 1. Эпицентральные исследования очаговых зон сильных землетрясений позволили наметить ряд эффектов, которые пока не могут считаться достоверно установленными. 2. Облако афтершоков располагается односторонне относительно линии разрыва, а сам разрыв не всегда происходит по разлому высшего для данной зоны ранга (Спитакское, 1988; Нефтегорское, 1995). 3. Предполагается опасным, когда хаотическая миграция сводится к концентрации афтершоков на одном из краёв очаговой зоны (Ташкентское, 1971). 4. Если размеры афтершоковой области аномальны (особенно в сторону уменьшения) относительно энергии события, то это может быть прогностическим признаком для сильного афтершока.

Совместный анализ разрывов дневной поверхности с тектоникой и афтершоковыми процессами позволил автору [Рогожин, 2012] сформировать следующие представления о развитии очаговых зон сильных землетрясений: 1. Степень сложности очага сильного землетрясения связана с магнитудой землетрясения, а особенности сейсмогенной подвижки определяются геодинамическими характеристиками сейсмоактивного региона. 2. В результате детальных исследований обычно удаётся выявить тектонический разлом,

дизъюнктивный узел или блок коры, в котором размещается очаг. 3. Сильные землетрясения с $M > 6.0$ демонстрируют приуроченность очагов к местам сочленения или пересечения крупных разломов. При этом первичные сейсмодислокации и облака афтершоков обрисовывают плоскости разломов, образующих такие дизъюнктивные узлы. В случае Газлийских землетрясений плоскости сейсмогенерирующих подвижек оконтуривают в недрах грани объёмного блока коры. 4. При изучении эпицентральных областей ряда сильных землетрясений Северной Евразии было установлено, что при выходе очага сильного сейсмического события ($M > 6.5$) на поверхность возникшие сейсморазрывы могут следовать сразу нескольким плоскостям разломов, образующих дизъюнктивный узел или ограничивающих блок в земной коре (Спитакское, 1988; Суусамырское, 1992; Нефтегорское, 1995; Чуйское, 2003; Олюторское, 2006). Это явление распространено в зонах сильных континентальных землетрясений. 5. Очаги сильных и сильнейших землетрясений представляют собой устойчивые структуры в геологической среде; их положение обусловлено особым сочетанием геолого-геофизических условий.

Сопоставление глубинного строения, макросейсмических и сейсмологических наблюдений в очаговых зонах крупнейших землетрясений Евразии [Щукин и Шебалин, 2016], выполненных ещё в XX веке и опубликованных только сейчас, позволяют видеть обоснование нетрадиционного взгляда на очаг крупного землетрясения. Осуществлялось сопоставление данных о разломах и данных о глубинном строении очаговых зон с макросейсмическими данными и сейсмологическими данными. Авторы делают выводы, что: 1. «Очаги» предпочитают контакты блоков среды с контрастными скоростными свойствами; 2. Обнаружено «подтягивание» очагов в сторону более прочных (высокоскоростных) неоднородностей к волноводам (внутри к кровле или к их подошве); 3. На Кавказе 40% землетрясений напрямую не связаны с разломами. Для Газлийских землетрясений 1976 и 1984 гг. в Кызылкумской пустыне десятки исследователей так и не нашли существенных следов прошедших катастроф. 4. Роль латеральных неоднородностей в тектонически расслоенной среде играла не меньшую роль в сейсмогенных процессах, чем блоково-разломная тектоника.

Ярким примером сложной структуры разрывов земной коры при землетрясениях является Гоби-Алтайское землетрясение 1957 года, $M_s = 8.1$ [Солоненко и др. 1960; Молнар и др., 1998]. Особенно сложна структура разрывов гор Ихэ-Богдо, эти горы не только обрезаны мощными трещинами с юга и севера, но и иссечены крупными трещинами по всей территории. Клиновидные опускания и поднятия резко изменили рельеф местности. В горной цепи Гурбан-Богдо горные массивы поднимались и смещались к востоку. Смещение происходило с перекосом как в горизонтальной, так и в

вертикальной плоскости. Общая длина крупных трещин достигает 700км. Сейсмодислокации отличаются многообразием форм. Установлено 15 типов сейсмодислокаций. К сожалению, при прекрасном исследовании многочисленных разрывов поверхности нет информации об афтершоковом процессе.

В эпицентральной зоне Урэг-Нурского землетрясения 1970 года $M_s = 7.0$ были выполнены как сейсмологические исследования, так и сейсмогеологические [Цибульчик, 1975; Растворова и Цибульчик, 1984; Хилько и др., 1985; Еманов А.Ф. и др., 2006; 2012]. При Урэг-Нурском землетрясении основной толчок вызвал разрывы вокруг достаточно небольшого блока горы Цагдул-Ула, а афтершоковый процесс развивается от этого блока в сторону хр.Цаган-Шибету. В 1975 году от эпицентра в сторону хр.Цаган-Шибету сформировалась вторая линейная цепь афтершоков под углом к первой. Важной особенностью афтершокового процесса Урэг-Нурского землетрясения является приуроченность афтершоков не к главным блокоразделяющим разломам, а к внутриблочным разрывам более низкого порядка.

Уникален афтершоковый процесс Бусингольского землетрясения 1991 года $M_s = 6.5$ [Еманов и др., 2003а; 2017а] в Восточной Туве. Возникшая в момент главного события пульсирующая активизация продолжается уже два десятилетия.

Бусингольское землетрясение произошло в горном обрамлении одноимённой впадины (рис.9а), в Шишхидском нагорье, на разломе из оперения Бусингольского разлома, на границе Алтае-Саянской горной области с Байкальской рифтовой зоной. Афтершоковый процесс охватил и главный разлом, и оперяющий. Длительная пульсирующая активизация обязана своим существованием оперяющему разлому. На рис. 9б представлено развитие во времени на оперяющем разломе. Прямоугольник на рис. 9а – это полоса, в пределах которой очаги сносятся на центральную линию, и на рис.9б землетрясения размещены на плоскости, где по горизонтали расстояние по оперяющему разлому от эпицентра главного события в двух направлениях, а по вертикали время в годах. С момента Бусингольского землетрясения процесс развивался от главного события по оперяющему разлому в сторону впадины. В последующие годы фиксировались афтершоки на оперяющем разломе со смещением активности вглубь Шишхидского нагорья. Практически ежегодно наблюдались кратковременные усиления активности, и только в 2003 году пульсирующей активности не наблюдалось, но с конца 2004 года мы наблюдаем обновление пульсирующей активности данного разлома. Удивительным является то, что активность процесса в районе Бусингольского землетрясения затухала в момент Чуйского землетрясения при расстоянии между эпицентрами более 700км.

Афтершоковый процесс уникален пульсирующим проявлением на многие годы. Он привязан к разломам, оперяющему и основному.

Тувинские землетрясения 27.12.2011($M_L=6.7$) и 26.02.2012($M_L=6.8$) произошли на Каахемском разломе в районе хр. Академика Обручева [Еманов А.Ф. и др., 2014]. Первое землетрясение – сдвиг по разлому, а второе – взброс на этом же разломе. Сдвиг остановился на повороте Каахемского разлома почти на 90 градусов, а остатки накопившейся энергии высвободились взбросом на этом же разломе южнее первого события. Сформировался единый афтершоковый процесс для двух крупных землетрясений.

Даже по столь краткому описанию афтершоковых процессов крупных землетрясений понятно, что единой схемы для них нет, и каждое из крупных землетрясений уникально по структуре разрывов и протеканию афтершокового процесса. Для Чуйского землетрясения детально исследованы как разрывы дневной поверхности, так и афтершоковый процесс. Это позволяет с высокой точностью выяснить закономерности развития очага землетрясения в условиях Алтая.

Важными вопросами в физике очагов крупных землетрясения являются:

1. Приуроченность крупных землетрясений и активных зон афтершоков к узлам с пересечениями разломов.
2. Вопрос об устойчивости структуры афтершоков вдоль плоскости разрыва, а также о сложности структуры афтершоков и её увязанности со структурой разрывов дневной поверхности и с блокоразделяющими разломами.
3. Медленные и быстрые изменения в структуре афтершокового процесса.

Чуйское землетрясение (главное событие) произошло на границе Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Приуроченность к разломной зоне или к зоне влияния глубинного разлома [Шерман, 2014] присутствует, но узла пересекающихся разломов в эпицентре главного события нет. В целом сдвиговая зона, вдоль которой произошла подвижка, не является структурой высшего ранга для Горного Алтая.

Интенсивный афтершоковый процесс прерывист вдоль плоскости разрыва. Узлы пересечения разломов с афтершоковой областью характеризуются пониженной афтершоковой активностью. Развитие афтершокового процесса только частично приурочено к блокоразделяющим разломам, а чаще афтершоковый процесс смещен относительно этих разломов или в виде ответвлений уходит в сторону.

Афтершоковый процесс устойчив по своей структуре, но в отдельные периоды испытывает значимые изменения. Особенно сильные изменения структуры наблюдались в

начальный период формирования афтершокового процесса [Еманов А.А. и др. 2009], но в последующие годы структура стала устойчивой до второго десятилетия XXI века, когда начала проявлять себя сейсмичность смежных структур [Еманов и др. 2017б], но этот вопрос – тема отдельного исследования.

В Алтае-Саянской горной области по особенностям взаимодействия афтершоковой активности с тектоникой эпицентральной области Чуйское землетрясение ближе всего к Урэг-Нурскому землетрясению и в значительной степени отличается от Бусингольского и Тувинских.

При анализе обобщений афтершоковых процессов в исполнении других авторов можно утверждать, что для Чуйского землетрясения нет возможности разделить афтершоки на нормальные афтершоки и афтершоки разгрузки. По напряжённому состоянию, рассчитанному по механизмам очагов, наблюдался эффект иерархии по энергии событий [Лескова и Еманов, 2013]. Пространственное развитие афтершокового процесса было, но после крупного афтершока, а в дальнейшем мы наблюдали преимущественно устойчивый в пространстве и времени процесс, данные о котором анализируются в этой работе.

Отмеченное смещение афтершоков односторонне относительно разрывов [Арефьев, 2003] при Чуйском землетрясении выполняется только частично. Имеются области одностороннего смещения афтершоковой активности относительно разрывов и области совпадения афтершоковой активности с разрывами и области разрывов без афтершоков.

Выводы

- Сдвиговая деформация, сформировавшаяся при Чуйском землетрясении, сопровождается вытянутым вдоль неё пространственно прерывистым афтершоковым процессом. Отмечаются участки магистральной подвижки, в пределах которой разрыв поверхности и линия афтершоковой активности совпадают, а также участки разрыва поверхности без афтершоковой активности. Развитие афтершокового процесса только частично приурочено к блокоразделяющим разломам; во многих случаях афтершоковый процесс смещен относительно этих разломов или уходит в сторону в виде ответвлений.
- Карты плотности афтершоков за длительный период по своей структуре отличаются от сейсмической активности афтершоковой области начального периода. В 2003 году быстрые изменения в структуре афтершоковой области были вызваны крупным афтершоком, а за период с 2003 до 2009 г. афтершоковый процесс испытывал медленные изменения.

- Чуйское землетрясение произошло в районе границы двух блоков земной коры: Чаган-Узунского и Северо-Чуйского. Эпицентр не является узловой точкой пересечения крупных разломов. Магистральную линию афтершокового процесса неоднократно пересекают разломные зоны. Участки пересечения разломов менее сейсмичны, чем участки прохождения разрывом целиковых зон.

По особенностям развития афтершоковый процесс Чуйского землетрясения уникален в ряду крупных землетрясений Евразии, что указывает на особенность геодинамических условий Горного Алтая.

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.

ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003, 375 с.
- 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 Алтайского землетрясения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ РАН, 2004, с. 61-67.
- Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнёв К.Г., Погребченко В.В. Очаг и афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 года // Физика Земли № 2, 2006, с. 85-96.
- Бхатачарая П.М., Каял Д.Р., Арефьев С.С. Исследование структуры очаговых зон плато Шиллонг-Микир в Северо-Восточной Индии // Геофизические исследования, 2009, т. 10, № 1, 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 // Доклады академии наук, 2004, т. 395, № 4, с. 534-536.

- Дорбат К., Арефьев С.С., Рогожин Е.А. Глубинная структура очаговой зоны Спитакского землетрясения по сейсмотомографическим данным // Физика Земли, 2004, № 8, с. 41-55.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Горный Алтай) землетрясения // Геология и геофизика, 2005, т. 46, № 10, с. 1065-1072.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Строение эпицентральной зоны Чуйского (Горный Алтай) землетрясения по данным метода сейсмической томографии с двойными разностями // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 1, 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., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Колесников Ю.И. Мониторинг развития сейсмичности в эпицентральной области Чуйского землетрясения 27.09.2003($M_s=7.3$, Горный Алтай) / Геофизические методы исследования земной коры. Материалы всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Н.Н.Пузырёва (8-13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014, с. 134-137.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г. и др. Пространственно-временной анализ сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Проблемы сейсмологии III -го тысячелетия: Материалы междунар. геофиз. конф., г. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003, с. 73-86 а.
- Еманов А.Ф., Колесников Ю.И., Еманов А.А., Филина А.Г., Подкорытова В.Г., Фатеев А.В., Ярыгина М.А. Изучение землетрясений малых энергий на локальной сети Алтайского сейсмологического полигона // Напряжённо-деформированное состояние и сейсмичность литосферы: Труды Всерос. Собрания., г. Иркутск, 26-29 авг. 2003 г. – Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2003, с. 324-326 б.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 1, с. 33-43.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Фатеев А.В., Филина А.Г. Чуйское землетрясение 27 сентября 2003 года с $M_w=7.3$, $K_p=17$ (Горный Алтай) // Землетрясения Северной Евразии в 2003 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009, с. 326-343.

- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г. Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970г., $M_S = 7.0$ (Монгольский Алтай), афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 10, с.1417-1429.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г. Тувинские землетрясения 27.12.2011(ML=6.7) и 26.02.2012(ML=6.8) и геомеханическая модель развития взаимосвязанной активизации / Геофизические методы исследования земной коры. Материалы всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Н.Н.Пузырёва (8-13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014, с. 138-140.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. Тектоническая интерпретация сейсмических процессов Тувы по фоновой сейсмичности и по афтершоковым процессам крупнейших землетрясений // В сборнике: Триггерные эффекты в геосистемах Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием. Под редакцией В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна, 2017, с. 90-98 а.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В. Об изменении сейсмического режима в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая в 1963-2016 гг. // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017, т. 2, № 3, с. 41-45 б.
- Лескова Е.В., Еманов А.А. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 1, с. 113-123.
- Лескова Е.В., Еманов А.А. Некоторые свойства иерархической модели напряжённого состояния эпицентральной зоны Чуйского землетрясения 2003г. // Физика Земли, 2014, № 3, с. 92-102.
- Маничандра Сануджам, Арум Курам, Сомесвар Рой, Джнана Р. Каял, Арефьев С.С. Геодинамика Индо-Бирманского хребта: сейсмологические данные // Геофизические исследования, 2009, т. 10, № 4, с. 5-16.
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008г. с $M_w = 6.3$ на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли, 2012, № 7-8, с. 42-62.
- Молнар П., Курушин Р.А., Баясгалан А., Хаднат К.В. Дислокации Гоби-Алтайского (Монголия) землетрясения 1957г. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1998, 148 с.
- Новиков И. С. Морфотектоника Алтая / Науч.ред. Е. В. Девяткин, Г. Ф. Уфимцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004, 313 с.

- Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталёв В.Ю., Рыбин А.К., Баталёва Е.А. Система новейших разрывных нарушений Горного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика, 2008, т. 49, № 6, с. 1139-1149.
- Растворова В.А., Цибульчик И.Д. Урэг-Нурское землетрясение 15.V.1970 г. в Северо-Западной Монголии // Вопросы инженерной сейсмологии, 1984, вып. 25, с. 120-124.
- 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.
- Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д., Захаров В.С., Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсяченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза. М.: Светоч Плюс, 2011, 368 с.
- Рогожин Е.А. Очерки региональной сеймотектоники. – М.: ИФЗ РАН, 2012, 340 с.
- Сим Л.А., Кучай О.А., Рогожин Е.А., Смагличенко Т.А. Особенности распределения тектонических напряжений вдоль сдвигов (по сейсмологическим и геологическим данным) // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия.: Материалы Всероссийского совещания (г.Иркутск, 18-21 августа 2009г.). – В 2-х т. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009, т. 2. с. 119-121.
- Сим Л.А., Лескова Е.В., Кучай О.А., Еманов А.А. О проверке полевых методов реконструкции тектонических напряжений с помощью анализа механизмов афтершоковых событий Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003г. // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI научно-практической Щукинской конференции с международным участием. М.: ИФЗ РАН, 2018, с. 344-348.
- Солоненко В.П., Тресков А.А., Флоренсов Н.А. Катострофическое Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 г. – М: Госгеолтехиздат, 1960, 148 с.
- 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 // Труды Совместной советско-монгольской научно-исследовательской геологической экспедиции. – М.: Наука, 1985, вып. 41, 224 с.

- Цибульчик И.Д. Некоторые результаты исследований напряженного состояния в очагах землетрясений Алтая и Саян // Сейсмичность Алтае-Саянской области. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1975, с. 48-56.
- Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. Избранные труды. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997, 542 с.
- Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений. Тектофизическая концепция. – Новосибирск.: Изд-во ГЕО, 2014, 359 с.
- Щукин Ю.К., Шебалин Н.В. Атлас глубинного строения очаговых зон землетрясений. – Воронеж: «Научная книга», 2016, 102 с.
- Dorbath C., J. van der Woerd, Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman J.V. Geological and seismological field observations in the epicentral region of the 27 September 2003 Mw 7,2 Gorny Altai earthquake (Russia) // Bull. Of the Seismological Society of America, December 2008, Vol. 98, No. 6, doi: 10.1785/120080166, P. 2849-2865.
- Edwin Nissen, Brian Emmerson, Gareth J. Funning, Anatoly Mistrukov, Barry Parsons, David P. Robinson, Eugene Rogozhin and Tim J. Wright 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) 169, p. 216–232.
- Sylvain Barbot, Yariv Hamiel and Yuri Fialk Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 Mw7.2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology // Journal of geophysical research, 2008, Vol. 113, B03403, doi:10.1029/2007JB005063.
- Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and Application to the Northern Hayward fault, California // Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, Vol. 90, № 6, p. 1353-1368.

УСТОЙЧИВЫЕ СТРУКТУРЫ АФТЕРШОКОВ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 ГОДА

Рис. 1. Сейсмологические станции в Алтае-Саянской горной области и в прилегающих территориях в 2003 году.

Рис. 2. Примеры временных сетей сейсмологических станций Алтайского сейсмологического полигона. Блокораздельные разломы даны по [Новиков, Поспеева, 2017].

Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений с $K_p \geq 2$ в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая за период с 2003 по 2009 гг. Блокораздельные разломы даны по [Новиков и др., 2008].

Рис. 4. Карта плотности афтершоков Чуйского землетрясения с 27.09.2003 по 31.12.2009. Блокораздельные разломы даны по [Новиков, Поспеева, 2017].

Рис. 5. Блоковая структура Чуйско-Курайской зоны и эпицентры главного события и двух крупнейших афтершоков. Блокораздельные разломы даны по [Новиков, Поспеева, 2017].

Рис. 6. Сопоставление разрывов дневной поверхности по [Рогожин, 2012] с плотностью афтершоков Чуйского землетрясения.

Рис. 7. Сопоставление афтершоковой активности (2003-2009гг.) с блокоразделяющими разломами по [Новиков и др., 2008].

Рис. 8. Сопоставление карты плотности афтершоков с речной сетью.

Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений (а) и пространственно-временной анализ сейсмичности (б) Бусингольской впадины за период 1991–2007гг. Звездочкой обозначен эпицентр Бусингольского землетрясения 1991г. (К – энергетический класс) [Еманов и др., 2017а].

















