Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны

А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.Г. Филина, Е.В. Лескова

Институт геофизики СО ГАН, Новосибирск, 630090, Россия

Сейсмичность Алтае-Саянской горной области анализируется совместно с рельефом местности и активными разломами. Обнаружено, что наиболее тектонически активные структуры проявляют себя в сейсмичности за год и их сейсмичность является устойчивой из года в год. Наблюдается иерархия в геологических структурах по скорости проявления в сейсмичности. Крупнейшие землетрясения региона приурочены к некоторым из структур, активным по землетрясениям малых энергий. В сейсмическом режиме выделяются фоновая сейсмичность и сейсмичность активизации. Фоновая сейсмичность, на первый взгляд хаотичная, с течением времени упорядочивается в соответствии с блочной структурой Алтае-Саянской горной области. Сочетание приподнятых горных массивов и впадин создает яченстую структуру, которая оказывает упорядоченое сопротивление коллизионному воздействию со стороны Джунгарской впадины. Фоновая сейсмичность концентрируется, в основном, в горном обрамлении впадин. Сейсмические активизации рассматриваются как нестационарный режим той или иной геологической структуры. Активизации тесно связаны с крупнейшими землетрясениями и в большей своей части протекают как афтершоковый процесс. Крупные активизации структур Алтая и Саян индивидуальны по сценарию своего развития. Ярко самобытный характер имеет активизация, возникшая при Бусингольском землетрясении 27.12.1991 г. (M = 6.5) и продолжающаяся по сей день. Событие приурочено к границе Алтае-Саянской области с Байкальской рифтовой зоной, тде коллизионные процессы давят на впадину, а рифтовые стремятся ее раздвинуть. В противоборстве двух сил возникла пульсирующая и длительная сейсмическая активизация.

Spatio-temporal features of seismicity of the Altai-Sayan folded area

A.F. Emanov, A.A. Emanov, A.G. Filina, and E.V. Leskova

Institute of Geophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

Seismicity of the Altai-Sayan Mountain Region is analyzed along with the relief and active faults. It is found that in the most tectonically active structures seismicity occurs during the whole year and its pattern is stable from year to year. Geological structures are hierarchically organized by the rate of seismic events. The largest earthquakes in the region correlate with certain structures where active low-energy earthquakes occur. In the seismic mode we distinguish background seismicity and multiple seismic activation. Background seismicity that might appear at first glance to be chaotic is localized with time according to the block structure of the Altai-Sayan Mountain Region. The combination of elevated rock masses and depressions makes up a cellular structure that offers a resistance to collision with the Jungarian Basin. Background seismicity is concentrated mainly in the mountain chains around depressions. Seismic activation is considered as a nonstationary mode of one or other geological structure. Activation is closely related to the largest earthquake; for the most part it proceeds as an aftershock process. Strong activation of the Altai and Sayan structures has specific scenarios of its development. Activation that has begun at the Busingol earthquake, December 27, 1991 (M = 6.5) and continues to date has a very distinctive character. This event can be related to the interface between the Altai-Sayan region and Baikal rift zone, where collision pushes the depression, while rifting tends to tear it apart. The opposition of the two forces gives rise to intermittent and long seismic activation.

1. Введение

Алтае-Саянская складчатая область, являющаяся составной частью горной системы Центральной Азии, сейсмически активна и может рассматриваться как постоянно меняющаяся, блочная, иерархически организованная геофизическая среда [1–4]. Землетрясения, регулярно происходящие в этой зоне, свидетельствуют об активно происходящем процессе разрушения земной коры и горообразования. С начала шестидесятых годов

© Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., 2005

прошлого столетия в рассматриваемой зоне развернута сеть сейсмологических станций и к настоящему времени накоплен экспериментальный материал об особенностях сейсмического процесса. В данной работе делается попытка рассмотреть пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны с позиций особенностей строения и физики разрушения материала земной коры. Легко утверждать, что земная кора — блочная структура, но труднее получить достоверную информацию о структуре блоков и об их роли в сейсмическом процессе. Процессы, происходяцие в земной коре, развиваются медленно, и какой бы интервал времени мы не брали, не виден весь непрерывный процесс.

50

Рельеф дневной поверхности в значительной степени формируется как результат тектонических процессов в земной коре, и, безусловно, должна существовать связь между особенностями рельефа и закономерностями сейсмического режима в одном и том же регионе. Как рельеф местности, так и землетрясения — это два разных результата работы тектонических процессов.

2. Пространственно-временные особенности сейсмичности

По обобщениям сейсмичности Алтая и Саян за период инструментальных наблюдений [5–7] выделены основные сейсмоактивные зоны этой области. Недостатком таких обзоров является то, что делаются описания характеристик сейсмического режима без оценки возможных механизмов сейсмической активизации тех или иных геологических структур. Нет взгляда на сейсмичность Алтае-Саянской области с позиций пространственно-временных связей. В то же время, большой интерес к тектонике и геодинамике Алтая выражается в разработке геологических концепций, объясняющих строение и развитие этого региона [8–16].

Обычно при изучении сейсмотектонических процессов используют как можно более полный каталог, но при этом на карту наносится очень много информации, разобраться в которой затруднительно. Исключив информацию о слабых землетрясениях, мы получим более простую картину, но возникнет впечатление, что периода наблюдений недостаточно для понимания причины процессов, вызывающих конкретные проявления сейсмичности.

В основу сформированного в данной работе подхода к изучению сейсмичности региона положены следующие условия:

 тектонические процессы достаточно устойчивы во времени и приводят на ограниченном временном интервале к возникновению устойчивых в пространстве сейсмически активных зон;

 тектонические процессы по проявлению в сейсмичности имеют иерархию во времени;

 структуры, наиболее активные в тектоническом отношении, проявляются в сейсмичности по слабым землетрясениям за малые интервалы времени.

Условия фактически ни к чему не обязывают, но позволяют в удобном виде представить данные каталога землетрясений Алтае-Саянской складчатой области. За минимальный интервал времени для анализа сейсмичности взят один год. Согласно сделанным предположениям наиболее сейсмоактивные структуры проявляют свои особенности в этом временном интервале в достаточной мере, а в целом каталог региона за инструментальный период обладает избыточной информацией для наиболее быстро протекающих тектонических процессов. Информацию о сейсмичности в предыдущие годы можно использовать для оценки устойчивости тектонических процессов во времени. Взяв фиксированный интервал более года, мы получаем возможность видеть более медленные тектонические процессы и оценивать их устойчивость во времени (в этом случае по меньшему числу повторений).

Работая с информацией, ограниченной рамками небольшого временного интервала, об эпицентрах землетрясений мы должны ее дополнить наиболее важной информацией из геологии и тектоники для формирования обоснованного взгляда на сейсмичность.

В анализ сейсмичности Алтае-Саянской горной области включены рельеф данной территории, построенный с использованием однокилометровой цифровой модели превышений GLOBE DEM Национального Центра Геофизических Данных (США), и карта активных разломов, при построении которой основу составили данные ГИН FAH, несколько дополненные и уточненные другой имеющейся в распоряжении авторов информацией (рис. 1) [17]. Дополнительно на эту карту нанесены эпицентры наиболее крупных землетрясений для данного региона. Опираясь только на информацию о наиболее крупных землетрясениях, трудно сделать выводы об особенностях сейсмического режима рассматриваемого региона. Землетрясения шестнадцатого-семнадцатого энергетического класса приурочены к впадинам: Зайсанской, Убсу-Нур, Бусингольской, к Чуйско-Курайской зоне. Безусловно, это разные по типу впадины. Бусингольское землетрясение приурочено к рифтовой впадине. Остальные крупнейшие землетрясения рассматриваемой территории произошли в условиях сжатия и приурочены к горному обрамлению впадин. Землетрясения пятнадцатого энергетического класса также не многочисленны. Большинство из них приурочены к геологическим структурам с описанными нами землетрясениями с K = 16 и более, и только одно событие этого класса (на восточной границе Монгольского Алтая) не приурочено к более крупным землетрясениям. Землетрясения тринадцатого и четырнадцатого классов чуть более многочисленны, но по представленной на рис. 1 информации трудно сделать выводы о сейсмичности геологических структур представленного региона. Самый трудный вопрос: где еще будут крупные землетрясения на этой территории? Для ответа на этот вопрос необходим более детальный анализ имеющейся информации.

Очень высока плотность крупных землетрясений в районе Чаган-Узунского блока и в окрестности Курайской впадины. До 2003 года за более чем сорок лет в



Рис. 1. Карта эпицентров крупных землетрясений Алтае-Саянской области за период 1963-2003 гг.

этой зоне не было зафиксировано ни одного крупного землетрясения. Чуйское землетрясение (Ms = 7.3) является крупнейшим в Алтае-Саянской зоне за инструментальный период, и афтершоковый процесс, последовавший за главным толчком, выделил эту зону как наиболее сейсмоактивную в регионе.

Особенностью строения центральной части Алтае-Саянской складчатой области является наличие системы крупных впадин: Тувинская котловина, котловина Убсу-Нур и котловина Больших озер, которые как бы формируют сегмент окружности, разделенный на части узкими хребтами. С выделенной системой впадин связаны наиболее крупные проявления сейсмичности Алтае-Саянской горной страны. Системы горных хребтов разбиты множеством разломов и имеют примерно одинаковые деформационные характеристики, тогда как впадины являются более монолитными и отличаются от горных хребтов по деформационным характеристикам. Такие монолитные участки внутри горной системы должны оказывать сопротивление движению горной системы при наличии воздействия извне. Сопоставление карты эпицентров с рельефом местности и активными разломами позволяет заметить, что все сейсмоактивные зоны Алтае-Саянской области увязываются с системами впадин. Отмеченные крупные впадины являются блоками, вокруг которых происходят крупные землетрясения.

В рассматриваемой области имеется другой тип впадин. В восточной части региона присутствуют рифтовые впадины, для которых характерно проявление сейс-



Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Алтае-Саянской горной области за 1997 год

мичности под впадиной. Это Бусингольская, Дархатская, Хубсугульская впадины и впадина Белинского. В данной зоне иной механизм формирования сейсмичности, чем в других структурах Алтае-Саянской складчатой области.

Если мы придаем движение горной системе, то впадины как более прочные блоки оказывают сопротивление и вокруг них формируется сейсмичность. Сейсмоактивные зоны возникают перед впадиной со стороны движущегося на нее массива (зона сопротивления движению), могут возникать внутри, когда впадина под воздействием ломается (зона излома), и с противоположной стороны впадины (зона передачи движения).

Рассматривая карту эпицентров землетрясений 1997 года (рис. 2) можно выделить цепь землетрясений, которая протягивается вдоль Монгольского Алтая через западную границу плато Укок к Катунскому хребту и далее от него к Коксуйскому хребту и заканчивается в его северо-западном окончании. В виде области беспорядочно рассыпанных землетрясений, прилегающих к линейной зоне, выглядит район Зайсанской впадины. Отмеченные зоны сейсмичности в соответствии с концепцией тектоники плит можно рассматривать как результат тектонического взаимодействия Тянь-Шаня и Алтая через структуры Джунгарии и Восточного Казахстана. Давление литосферных плит на такую мощную структуру, как Алтай, на ее границах встречает мощное сопротивление, и часть энергии движения идет на процесс разрушения горных пород и, как следствие, на сейсмичность. Формируется линейная цепь землетрясений вдоль Горного Алтая и Монгольского Алтая это фактически зона сопротивления движению, передаваемому Алтаю от Тянь-Шаня через монолитную плиту Джунгарской впадины.

Тувинская котловина — самая крупная впадина рассматриваемой зоны. Она выгнута к северу и отделена горными хребтами и системой разломов от мелких впадин с северной стороны и от котловины оз. Убсу-Нур с юга. На карте эпицентров землетрясений 1997 года можно отметить, что с запада Тувинской котловины весьма активно работала сейсмоактивная зона вдоль Шапшальского хребта с разворотом на севере на Алашское плато. Фактически активизирована область, вплотную прижатая к Тувинской котловине со стороны движения. Данную активную зону можно рассматривать как зону сопротивления движению Тувинской котловины. Изгиб Тувинской котловины сформирован развернутым углом между хребтами Западный и Восточный Танну-Ола. Мы видим линейную цепь землетрясений, вначале приуроченных к борту впадины вдоль хр. Западный Танну-Ола, а в месте разворота впадины цепь землетрясений, продолжая свой прямолинейный ход, пересекает Тувинскую котловину. Отмеченная цепь событий может свидетельствовать о наличии зоны излома в Тувинской котловине, сформировавшейся под давлением с запада. Непосредственно восточное окончание Тувинской котловины высокой сейсмичностью не отличается, но прямо по направлению на восток от впадины две сейсмически активные зоны Бусингольской впадины и Дархадской котловины. Обе структуры практически перпендикулярны Тувинской котловине. Бусингольская котловина в этом году характеризуется максимальной сейсмической активностью по сравнению с другими сейсмоактивными участками.

Южнее Тувинской котловины располагается впадина Убсу-Нур — вторая по размерам в Алтае-Саянской зоне. В рассматриваемый период почти отсутствуют землетрясения внутри впадины. Можно предполагать, что она ведет себя как монолит. На западном фланге впадины работает линейная сейсмически активная зона — горное обрамление впадины. В юго-восточном углу впадины зарегистрировано несколько землетрясений, размещенных вдоль разлома. Можно предположить существование здесь излома впадины. Как и для Тувинской котловины, восточное окончание впадины Убсу-Нур не сейсмично. Две линейных цепочки землетрясений, параллельных разломной зоне, ограничивающей впадину с востока, отчетливо видны на некотором удалении от конца впадины. Первая более интенсивная проходит через хребты Сенгилен и Хорумнуг-Тайга в зоне их сближения. Вторая формируется южнее Бусингольской впадины.

С юга впадины Убсу-Нур вдоль хребта Ханхухэй проходит мощная разломная зона 1905 года с множеством ответвлений. Она как бы отсекает расположенную с юга впадину Больших озер и хр. Хангай. Можно видеть, что эпицентры землетрясений «развешаны» по оперению, а главный ствол не сейсмичен. Такая особенность должна объясняться механизмом тектонических движений вдоль отмеченной системы разломов.

Впадина Больших озер и подпирающий ее горный массив Хангай как бы отрезаны от потока движения горных масс и сейсмические процессы в этой системе идут с меньшей скоростью и интервал в один год может оказаться для освещения механизмов сейсмичности этой зоны не достаточным.

Еще одна проявляющая себя за год сейсмоактивная область — зона Курайского хребта. Эта зона двух впадин: Курайской и Чуйской. Отметим, что на Алтае имеются и другие внутренние впадины, но в сейсмичности за год заметно проявляются только эти две.

Подводя итог изучения землетрясений в 1997 году в Алтае-Саянской области, можно отметить, что в этот короткий интервал времени, не содержащий крупных землетрясений, проявили себя в сейсмическом режиме процессы, протекающие около впадин. Прежде всего, это Тувинская котловина, котловина Убсу-Нур и северная часть впадины Больших озер. Система этих впадин, как клин, вбита в центр Алтае-Саянской области. Можно предположить, что данные впадины являются препятствием на пути медленных перемещений горных масс от Тянь-Шаня через Алтай к Байкалу и с ними связано формирование быстро проявляющих себя в сейсмичности тектонических процессов. Чуйская и Курайская впадины являются внутренними структурами Горного Алтая. Вокруг этих впадин также идут тектонические процессы, проявляющие себя в сейсмичности за год. Две отмеченные впадины явно выделяются среди других по скорости проявления в сейсмичности. О причинах повышенной сейсмичности вокруг этих сравнительно маленьких впадин можно лишь высказывать догадки. Согласно существующим представлениям [10] Алтай испытывает горизонтальное воздействие, ориентированное субмеридианально. Если рассматривать систему крупных впадин (Тувинская, Убсу-Нур), то по проявлению сейсмичности (рис. 2) можно говорить об отклонении направления движения блоков земной коры к востоку. Не исключено, что тектонические процессы, протекающие в окрестности Курайской и Чуйской впадин, играют заметную роль в изменении направления движения плит на Алтае. Этим может объясняться яркость и быстротечность сейсмического процесса на этом участке Алтая.

На рис. 3 дана карта эпицентров землетрясений за 1984 год. Можно отметить, что в 1984 году в сейсмическом процессе проявляются те же геологические структуры, что и в 1997 году. Мы представляем два произвольно выбранных года. На самом деле при исследовании были построены карты для каждого года в интервале 1963–2000 гг. Все карты имеют высокое качественное сходство, что отражает устойчивость во времени тектонических процессов.

Также построены карты для двухлетних интервалов наблюдения, пяти- и десятилетних. Такой анализ позволил выявить целый ряд деталей в сейсмическом режиме, которые не видны в годовом анализе. К примеру, в Тувинской котловине выявляется вторая линейная зона излома впадины и линейная зона повышенной сейсмичности в северном горном обрамлении впадины, а по разлому 1905 года видно, что основной ствол проявляет себя цепью землетрясений за существенно большее время, чем его оперение (рис. 4).

Сравнивая карты эпицентров сильных землетрясений (рис. 1) и эпицентров землетрясений за год (рис. 2 и 3), можно отметить большее число геологических структур, проявляющих себя в сейсмичности за год, чем очаговых зон крупных землетрясений. Данный факт, скорее всего, объясняется тем, что не все сейсмоактивные зоны Алтае-Саянской области проявили себя по крупным землетрясениям. Сейсмогеологическое обсле-



Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений Алтае-Саянской горной области за 1984 год

дование Горного Алтая [14] указывает на существование следов крупных землетрясений практически во всех быстро проявляющих себя в сейсмичности структурах. Можно предположить, что многие сейсмоактивные структуры еще могут проявить себя как очаговые зоны крупных землетрясений.

Уже в предварительной публикации по пространственно-временному анализу сейсмичности [17] Алтае-Саянской складчатой области до Чуйского землетрясения отмечена высокая активность Чуйско-Курайской зоны по слабым землетрясениям и высокая вероятность в этой зоне крупного землетрясения. К числу других зон, где по большому количеству землетрясений малых энергий угадываются быстро текущие тектонические процессы, но нет крупных землетрясений, можно отнести западное обрамление Тувинской котловины (Шапшальский хр., Алашское плато), юго-западная граница Алтая с Джунгарской впадиной, линия излома Тувинской котловины на продолжении хр. Западный Танну-Ола, хр. Сенгилен, впадина Белинского и Дархатский грабен. Другие зоны быстротечных тектонических процессов, выявляемые по слабым землетрясениям, уже отмечены крупными землетрясениями. За рассматриваемый период землетрясения 16-17 энергетического класса происходили только в зонах со стабильной сейсмичностью по землетрясениям малых энергий. Нельзя утверждать, что крупные землетрясения не могут произойти в других зонах, но можно отметить, что на сегодняшний день вероятность крупных землетрясений более высока в структурах, отмеченных как зоны быстро текущих тектонических процессов.

Еще одним важным моментом в сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны является существование сложной структуры сейсмичности, которая раскладывается на систему линейных зон. Существование линейных зон позволило авторам данной работы провести пространственно-временной анализ сейсмичности целого ряда линейных структур Алтае-Саянской складчатой области. Для изучения пространственно-временного режима линейной сейсмоактивной геологической структуры мы воспользовались идеей исключения одного пространственного измерения, реализованной при пространственно-временном анализе сейсмичности впадины оз. Байкал [18]. Следует отметить, что в упомянутой работе такой подход применен к очень крупной геологической структуре и для изучения сейсмического режима по достаточно крупным землетрясениям. В нашем случае выбраны структуры более мелкого уровня



Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений Алтае-Саянской горной области за пятилетний период

и анализируются землетрясения всех энергетических классов.

Для изучения пространственно-временного развития сейсмичности линейной структуры выбирается линия вдоль структуры, задается ширина полосы вокруг линии, в пределах которой все эпицентры проектируются на линию, и весь сейсмический процесс представляется на плоскости, координатами которой являются по одной оси расстояние вдоль линейной структуры, а по другой — время.

Изучение сейсмического режима линейных структур нацелено, прежде всего, на исследование сейсмичности таких структур, в которых происходят крупные землетрясения, и на понимание взаимосвязи между сейсмичностью соседних структур. В данной работе мы не будем уделять внимание анализу всех линейных структур, а сосредоточим свое внимание на наиболее крупных землетрясениях за период существования региональной сети станций.

3. Крупнейшие активизации Алтае-Саянской горной области

Крупные землетрясения в Алтае-Саянской складчатой зоне вызывают мощнейший афтершоковый процесс. В этом случае активизированная зона резко выделяется на фоне рядовой сейсмичности всей области и процесс затухания сейсмичности в активизированном районе длится годы. Рассматриваемый регион велик и обладает большим разнообразием геологических и тектонических условий. Все это должно обеспечить не только отмеченную типичность крупнейших активизаций, но также должна существовать индивидуальность каждой из них, сформировавшаяся по причинам локального характера. Именно эта индивидуальность крупнейших землетрясений и соответствующих им афтершоковых серий позволит глубже понять динамику тектонических процессов Алтае-Саянской горной области.

Крупнейшими землетрясениями Алтае-Саянской области являются Чуйское землетрясение 27.09.2003 г. (Ms = 7.3), Урег-Нурское 16.05.1970 г. (Ms = 7.0), Зайсанское 14.06.1990 г. (Ms = 6.9), Бусингольское 27.12.1991 г. (Ms = 6.5). Из-за существенных различий в плотности сети станций данные по каждому из землетрясений равной точности. В данной работе по каждому событию детальность результатов соответствует точности каталога.

Бусингольское землетрясение связано с самой западной структурой системы рифтовых впадин Байкальской



Линейный пространственно-временной анализ участка № 2

Рис. 5. Пространственно-временное представление сейсмического режима линейной зоны. Линия: Восточный Саян — впадина Белинского — Бусингольская впадина

зоны. Именно здесь проходит восточная граница Алтае-Саянской области. Как известно [17], для структур Байкальского рифта сейсмичность в основном концентрируется внутри впадин, а для Алтае-Саянской области характерна концентрация землетрясений в горном обрамлении впадин. Западное окончание Байкальской рифтовой зоны составлено системой параллельных впадин, развернутых почти перпендикулярно к общему простиранию рифтовой зоны. Бусингольская впадина и впадина Белинского образуют узкую линейную зону, почти стыкуясь друг с другом. Линия, вдоль которой будем анализировать сейсмический режим, начинается

в горах Восточного Саяна и проходит вдоль всей впадины Белинского, а за ней вдоль Бусингольской впадины. Фактически, на карте (рис. 1) зона анализа совпадает с линейной зоной разломов, секущей геологические структуры, к одной из которых (Бусингольская впадина) приурочено землетрясение с K = 16.

На рис. 5 представлено пространственно-временное распределение сейсмичности для рассматриваемой линейной зоны. В интервале расстояний 130-180 км находится впадина Белинского, а Бусингольской впадине соответствует интервал 220-310 км. Один из рассматриваемых вопросов: связаны ли сейсмические режимы

этих двух впадин? Интервалам рассматриваемых впадин соответствуют линейные участки с наибольшей сейсмичностью. Для обеих впадин характерно наличие периодов хаотического пространственно-временного распределения землетрясений вдоль структуры и интервалов одновременной активизации всей структуры. Вне активизаций обе впадины имеют близкую по уровню сейсмичность. Бусингольская впадина испытала в 1991 году сильнейшую сейсмическую активизацию. Активизация началась с Бусингольского землетрясения 27.12.1991 г. (Ms = 6.5) [17]. С этого момента сейсмичность Бусингольской впадины существенно отличается от сейсмичности своей соседки — впадины Белинского (рис. 5). Мы имеем дело с уникальной для всего региона активизацией линейной структуры. В Алтае-Саянской складчатой зоне других активизаций такого типа авторам данной работы обнаружить не удалось. Отметим, что за инструментальный период, который анализируется в данной работе, происходили и более сильные землетрясения, чем Бусингольское. Сейсмических активизаций при этих землетрясениях, подобных активизации, вызванной Бусингольским землетрясением, не наблюдалось. Главная особенность — многократность активизации по всей длине Бусингольской впадины. На рис. 5 представлены данные до 2000 года, но этим периодом афтершоковый процесс не закончился. На протяжении десятилетия мы видим пульсирующий характер сейсмической активизации по всей длине Бусингольской впадины. Сейсмичность впадины то ослабевает, то усиливается. Можно выделить порядка десятка циклов рассматриваемой активизации. Отмечается ее постепенное ослабление, но сейсмичность впадины не соответствует фоновому режиму.

В интервале до 1991 года сейсмический режим Бусингольской впадины во многом похож на сейсмический режим других сейсмоактивных структур Алтае-Саянской складчатой зоны. Наблюдается фоновая сейсмичность и редкие линейные сейсмические активизации по всей длине впадины. Самая крупная из них связана с землетрясением с K = 15 в 1976 году, но длительность отмеченной линейной активизации во времени не сравнима с сейсмической активизацией данной структуры, начавшейся в 1991 году.

В сейсмическом режиме впадины Белинского также отмечаются попытки ее сейсмической активизации по всей длине. Линейные размеры впадины Белинского меньше размеров Бусингольской впадины, и соответственно линейные активизации выглядят как активизации разного масштаба. Примечательным является то, что сейсмические активизации двух рассматриваемых впадин не совпадают по времени. Создается впечатление независимости друг от друга сейсмического режима двух соседних впадин.

Две рассматриваемые впадины, являясь рифтовыми, отличаются от других впадин Байкальской системы по



Рис. 6. Динамика развития во времени сейсмического процесса Бусингольской активизации. К — показатель степени для суммарной сейсмической энергии. Энергия подсчитывалась за полгода в заданном квадрате

характеру проявления сейсмичности. Только в них сейсмичность концентрируется как внутри впадин, так и в горном обрамлении. Наибольшее количество землетрясений концентрируется в восточном горном обрамлении впадины. Именно здесь был эпицентр главного толчка. Внутри впадины тоже наблюдается заметный сейсмический процесс. Всегда ли это было так? Попробуем более детально проследить особенности развития Бусингольской сейсмической активизации. Выделим из общего числа землетрясений события внутри впадины и события в ее горном обрамлении. Построим зависимость от времени двух составляющих сейсмического процесса: сейсмической энергии во впадине и сейсмической энергии в ее горном обрамлении (рис. 6). Представленные графики освещают динамику развития сейсмичности системы «впадина - горное обрамление». Бросается в глаза, что наблюдавшаяся в 1976 году сейсмическая активизация данной структуры исключительно принадлежит самой впадине. Со временем в сейсмичности доминирует то впадина, то ее горное обрамление. В момент Бусингольского землетрясения активизировались разломные структуры как горного обрамления, так и впадины, но главный толчок в горном обрамлении и сила сейсмической активизации впадины несоизмеримо меньше силы активизации ее горного обрамления. Далее со временем наблюдается смещение сейсмичности то во впадину, то в горное обрамление. Мы имеем дело с чередующимися активизациями то впадины, то горного обрамления. Отмеченный [17] пульсирующий характер Бусингольской активизации может быть связан с противоборством двух различных по природе процессов, приводящих к землетрясениям: коллизия и рифтогенез. Ясно, что такое развитие сценария сейсмической активизации оказалось возможным только на границе двух регионов с принципиально разными закономерностями в проявлении сейсмичности.



Рис. 7. Пространственно-временное представление сейсмического режима линейной зоны. Линия: Шапшальский хребет — западное обрамление котловины Убсу-Нур — горное обрамление котловины Больших озер

Следует отметить, что в период спокойного развития сейсмичности активность впадин Белинского и Бусингольской практически одинакова. Для обеих впадин неоднократно наблюдались попытки одновременной активизации структуры по всей длине, быстро затухавшие во времени. Учитывая сходство сейсмического процесса в двух смежных впадинах, можно утверждать, что только во впадине Белинского может развиться активизация с длительным, пульсирующим затуханием сейсмической активности (подобная Бусингольской).

На рис. 7 представлены результаты пространственно-временного анализа линейной структуры, начало которой в северо-западном окончании Шапшальского хребта. Далее центральная линия окна проходит по Шапшальскому хребту до западного борта впадины Убсу-Нур и далее с изломом разворачивается вдоль системы разломов (рис. 1), идущих вдоль западного борта отмеченной впадины и впадины Больших озер. Фактически анализ выполняется по границе сегмента, образованного системой впадин, находящихся в центре горной системы. В этой линейной структуре находится уже упомянутое Урег-Нурское землетрясение. С момента этого землетрясения наблюдается сильнейшая сейсмическая активизация линейной зоны длиной около 90 км. Вид данной сейсмической активизации в значительной степени не похож на сейсмическую активизацию Бусингольской впадины. Отмечается уменьшение линейного размера активизированной области во времени и примерно через 5 лет сейсмический режим этой линейной структуры успокаивается до фонового уровня. Для интервала анализа, соответствующего Шапшальскому хребту (0–150 км), отмечается повышенная фоновая сейсмичность и короткие во времени попытки одновременной активизации данной структуры. Наиболее крупным землетрясениям этой геологической структуры соответствуют быстро затухающие во времени активизации ее линейных участков.

Для Чуйского землетрясения, произошедшего в центре сети станций Алтайского сейсмологического полигона, развернутой за год до главного толчка [19], получены экспериментальные данные значительно более точные и детальные, чем для других землетрясений. Именно по этим данным можно в деталях рассмотреть процесс сейсмической активизации. Эпицентр Чуйского землетрясения находится в центральной части горного Алтая, в Чуйско-Курайской зоне. Сравнительно небольшие впадины — Чуйская и Курайская — являются именно теми структурами, вокруг которых наблюдается быстро текущий процесс проявления сейсмичности. Впадины разделены приподнятым Чаган-Узунским блоком и окружены горными хребтами: Курайским, Северо-Чуйским и Южно-Чуйским.

Переходя к анализу Чуйского землетрясения и развития его афтершокового процесса, вначале уделим внимание тому, что происходило в Чуйско-Курайской зоне до 27 сентября 2003 г. Сейсмический режим Чуйско-Курайской зоны в последние сорок лет имел следующие особенности [20]. Во-первых, крупных землетрясений с энергетическими классами $K \ge 13$ в этой зоне не наблюдалось. Во-вторых, по количеству землетрясений с энергией менее двенадцатого класса эта зона ярко высвечивалась в структуре Алтае-Саянской горной области как район с быстропротекающим сейсмотектоническим процессом. В-третьих, сейсмические события в основном концентрировались вокруг впадин.

На рис. 8 дан график изменения во времени суммарной сейсмической энергии, выделившейся в Чуйско-Курайской зоне. Для подсчета энергии был выделен прямоугольный участок, охватывающий Курайскую и Чуйскую впадины, Чаган-Узунский приподнятый блок, Северо-Чуйский, Южно-Чуйский и Курайский хребты. Каждая точка на графике — суммарная сейсмическая энергия за год в отмеченной зоне. График заканчивается 2001 годом. Этот год на сегодняшний день последний, для которого имеется выверенный (окончательный по стандартной обработке) каталог землетрясений Алтая. На протяжении многих лет значение суммарной сейсмической энергии не превышало $3 \cdot 10^{11}$ Дж. За всю историю инструментальных наблюдений зафиксирова-



Рис. 8. Изменение во времени суммарной сейсмической энергии в Чуйско-Курайской зоне. Каждая точка — суммарная энергия за год

но три года с повышенной суммарной сейсмической энергией: 1985 г. — суммарная энергия равна 1·10¹², 1996 г. — энергия равна 1.5·10¹² и 2000 г. — энергия 2·10¹². Серия событий 1996 г. рассматривалась А.Г. Филиной как Акташский рой землетрясений [21]. Три года с повышенной энергией в сорокалетнем ряду инструментальных наблюдений выглядят как некоторое заблаговременное предупреждение о грядущей сейсмической активизации.

В 1985 г. наибольший вклад в повышенное значение энергии внесло одно землетрясение в горном обрамлении юго-восточного угла Чуйской впадины. В этом году достаточно активен Чаган-Узунский блок, и цепь землетрясений малых энергий проходит вдоль всего Курайского хребта. Небольшое количество слабых событий приурочено к Чуйским хребтам.

В активизации 1996 г. нет крупных землетрясений. Большое количество близких по энергии землетрясений делают год аномальным по выделившейся сейсмической энергии. Особой активностью отличаются периметр Чаган-Узунского блока и Курайский хребет. Данную активизацию вполне обосновано можно рассматривать как рой землетрясений в эпицентральной области будущего крупного землетрясения за семь лет до главного толчка.

Аномалия 2000 г., прежде всего, связана с землетрясением двенадцатого энергетического класса на стыке Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом. Повышенная сейсмичность в данном случае присуща Чаган-Узунскому блоку и Курайскому хребту с максимумом активности в районе, прилегающем к п. Акташ. Двенадцатый класс для рассматриваемой зоны — «новинка» за инструментальный период и попадает почти в эпицентр будущего главного толчка.

В 2001 г. суммарная энергия существенно снижается в сравнении с предыдущим годом, но остается выше обычного фона. Наиболее сильные землетрясения этого года сосредоточены на Курайском хребте в районе п. Акташ и в горном обрамлении юго-восточного окончания Чуйской впадины. Землетрясения малых энергий (до K = 8) целью проходят по Курайскому хребту и за-



Рис. 9. Развитие сейсмического процесса в зоне Чуйского землетрясения: карта эпицентров землетрясений в период сейсмической активизации 2002 г. (интервал наблюдений с 3 августа по 30 октября) (*a*); карта эпицентров микроземлетрясений в период сейсмического затишья (интервал наблюдений с 10 августа по 10 сентября 2003 г.) (*б*); Чуйское землетрясение и его афтершоки (интервал наблюдений с 27 сентября по 22 октября 2003 г.) (*в*)



Рис. 10. Карта эпицентров афтершоков Чуйского землетрясения и их фокальные механизмы. Для определения эпицентров использовалась скоростная модель земной коры, составленная с использованием алгоритмов сейсмической томографии

полняют Чаган-Узунский блок, охватывая зону соприкосновения с этим блоком в Северо-Чуйском хребте.

В 2002 г. наиболее крупные землетрясения происходят по периферии Алтае-Саянской горной области (рис. 8) в Зайсанской впадине, в северо-западном окончании Восточного Саяна, но, вместе с тем, в Чуйско-Курайской зоне наблюдается сейсмическая активизация. В этот период нет землятрясений больших энергий, но по числу событий это самый активный участок Алтае-Саянской складчатой зоны. Землетрясения главным образом концентрируются в окружении Курайской впадины, в том числе размещаясь и внутри нее. В 2003 г. до главного толчка Чуйско-Курайская зона относительно спокойна, особенно в летний период. Летом 2002 и 2003 годов в Курайской впадине развертывались локальные сети станций, позволяющие получить данные по координатам эпицентров на новом уровне точности, и появилась информация о глубинах землетрясений в Чуйско-Курайской зоне [17]. Наибольшее число землетрясений в 2002 году принадлежит интервалу глубин 12–16 км. Примечательным является наличие землетрясений на глубинах 2–4 км. Сейсмический процесс в данной зоне сосредоточен в верхних слоях земной коры.

Рисунок 9 дает сравнение сейсмических процессов в рассматриваемой зоне в разные периоды наблюдений. Во второй половине 2002 г. в зоне будущего крупного землетрясения отмечается сейсмическая активизация. На рис. 9, *а* представлена карта эпицентров для периода с 3 августа по 30 октября 2002 г. В 2003 г. наблюдается затишье вплоть до главного толчка. Рисунок 9, б представляет карту эпицентров землетрясений малых энергий с 10 августа по 10 сентября 2003 г.

На рис. 9, *в* отмечено положение главного толчка и его афтершоков. Эпицентр главного толчка приурочен к разлому, являющемуся границей между Чаган-Узунским блоком и Северо-Чуйским хребтом. Сейсмические события первого дня главным образом происходят по периметру Чаган-Узунского блока, а в последующие дни наблюдается распространение афтершоков в стороны от него по линейному разлому по юго-западным границам Курайской и Чуйской впадин.

Из рис. 9, б видно, что в период затишья в Чаган-Узунском блоке практически отсутствуют даже слабые толчки. Большая часть землетрясений локализуется в овальной области, начинающейся в Северо-Чуйском хребте, охватывающей всю Курайскую впадину и заканчивающейся в северо-западном окончании Курайского хребта. Интересным является то, что Курайская впадина заполнена сейсмическими событиями и землетрясения образуют линейные цепи.

Сейсмическая активизация, наблюдавшаяся в рассматриваемой зоне в 2002 г. (рис. 9, *a*), по особенностям пространственного размещения эпицентров существенно отличается от структуры афтершокового процесса Чуйского землетрясения (рис. 9, *в*). Сейсмическую активность проявлял весь Курайский хребет. Высокая концентрация эпицентров наблюдалась в юго-западном углу Курайской впадины, и далее цепь событий тянулась из этого угла, окаймляя Чаган-Узунский блок с трех сторон. Примечательно, что зона будущего толчка была свободна от эпицентров, а также не было землетрясений по линейной зоне, участвующей в последующем афтершоковом процессе. Активизация имела ореол событий, по размерам в два-три раза превышающий ее диаметр.

Глубины афтершоков ограничены интервалом от четырех до шестнадцати километров. Наибольшее число афтершоков произошло в интервале глубин от девяти до одиннадцати километров.

На рис. 10 представлены результаты построения эпицентров землетрясений с определенными фокальными механизмами событий. Примечательным является то, что применены алгоритмы определения гипоцентров, рассчитанные на плотную сеть полигона и на априорную информацию о скоростях продольных и поперечных волн в земной коре. Подробности построения данной карты читатель может найти в работе [22] и там же даны числовые характеристики для решений по фокальным механизмам. В данной работе мы отметим некоторые важные факты. Механизмы землетрясений показывают, что по линии разлома вдоль Северо-Чуйского хребта наблюдается почти чистый горизонтальный сдвиг, а на обоих окончаниях афтершоковой зоны механизмы изменяются, существенной становится вертикальная составляющая сдвига. Линейная зона афтершоков (вторая фаза развития) состоит из ряда элементов. Северо-западное окончание зоны сформировалось как элемент в виде разветвленной к концу кисточки структуры «конский хвост», а на юго-восточном окончании этого элемента отмечается загиб линии афтершоков внутрь Курайской впадины. Крупнейший афтершок в его составе произошел 27.09.2003 г. в 18 ч 52 м (K = 16.6, Ms = 6.3). Второй элемент афтершокового процесса разместился в юго-западном углу Курайской впадины. Афтершоки выстраиваются в нем в две параллельные изогнутые линии. Главное событие этого элемента произошло 1.10.2003 г. в 01 ч 03 м (К = 16.4, Ms = 6.6). Третий элемент афтершокового процесса возглавляет главный толчок 27.09.2003 г. в 11 ч 33 м (K = = 17, Ms = 7.3). События в этом элементе формируют цепочки, перпендикулярные линии простирания зоны афтершоков. Четвертый элемент составляют землетрясения, размещенные в северо-западном углу Чуйской впадины. В этой группе афтершоков нет явно выделяющегося по силе события, и они выглядят как хаотическое переплетение цепочек эпицентров, соответствующих системе разломов, по которой идет разрушение угла Чуйской впадины. Выполненный анализ гипоцентров событий [22] показал, что большая часть событий вдоль границы Курайской впадины и Северо-Чуйского хребта соответствует разрывам, параллельным границе и находящимся внутри впадины. Преимущественно происходит разрушение края Курайской впадины. Зафиксирован наклон области афтершоков от Курайской впадины под Северо-Чуйский хребет.

Представленные материалы позволяют сформировать предварительные представления об особенностях сейсмотектонических процессов, происходивших в зоне Чуйского землетрясения:

1. Чуйскому землетрясению 27 сентября 2003 г. предшествовали сейсмические активизации в 1985 г., в 1996 г., в 2000 г., во второй половине 2002 г. и сейсмическое затишье в 2003 г.

2. В 1985 г. наибольший вклад в повышенное значение выделившейся энергии внесло одно землетрясение в горном обрамлении юго-восточного угла Чуйской впадины. В этом году достаточно активен Чаган-Узунский блок.

3. В 1996 г. наблюдается активизация Чаган-Узунского блока и Курайского хребта в зоне, граничащей с одноименной впадиной в виде роя землетрясений.

4. В 2000 г. практически в эпицентре будущего Чуйского землетрясения произошло землетрясение двенадцатого энергетического класса. Это крупнейшее событие за инструментальный период в рассматриваемой структуре.

 Сейсмическая активизация 2002 г. проявилась на большей площади, чем афтершоковый процесс Чуйского землетрясения, и имела ореол событий вокруг себя. По-видимому, в рассматриваемой зоне происходила релаксация напряжений в виде распределенного по большой площади не очень интенсивного сейсмического процесса.

6. Сейсмическое затишье, природа которого остается загадочной и по отношению к другим крупным землетрясениям, характеризуется упорядоченной структурой микроземлетрясений. Отмечаются линейные цепочки событий по Курайской впадине. Можно предположить, что даже мощный блок впадины начинает «трещать» под тектоническим воздействием окружающих его горных блоков.

7. Чуйское землетрясение произошло на юго-западной границе Чаган-Узунского блока. В этой зоне не было землетрясений при сейсмической активизации 2002 г., и не было микроземлетрясений в период затишья. Афтершоки охватили структуры, которые не активизировались в 2002–2003 гг. Разрядка напряжений с разрушениями геологической среды произошла не по тем структурам, которые «трещали» в предшествующий Чуйскому землетрясению период.

8. В начальной стадии афтершокового процесса выделяются две фазы развития: первая связана с процессами вокруг Чаган-Узунского приподнятого блока, вторая — с линейной зоной вдоль юго-западной границы Курайской и Чуйской впадин.

9. В первые сутки после главного толчка работала мощнейшая серия афтершоков по периметру Чаган-Узунского блока. Отмечается разрушительное влияние процесса на северо-западное окончание Чуйской впадины. Подвижка на одном крае блока привела к разрядке созданных напряжений по всему периметру. Новое положение блока повысило напряжения в соседних структурах.

10. В последующие сутки афтершоковый процесс начал распространяться от Чаган-Узунского блока по разломам, идущим вдоль юго-западной границы Курайской и Чуйской впадин. Сформировалась линейная зона афтершоков. Сейсмический процесс по периметру Чаган-Узунского блока при этом затих. Если Чуйская впадина оказалась лишь слегка вовлечена в афтершоковый процесс, то Курайская испытывает мощнейшую активизацию всей юго-западной границы с Северо-Чуйским хребтом. На данной стадии происходило изменение сосседних с Чаган-Узунским блоком структур.

11. Линейная зона афтершоков обладает сложной поэлементно организованной структурой. Процесс разрушения охватывает краевые части Чуйской и Курайской впадин.

О Чуйском землетрясении 2003 года имеется несравнимо более полная информация, чем о любом другом крупном событии Алтая, но главным недостатком сегодняшнего дня является незавершенность активизации. Мы не можем делать окончательных заключений об активизации, которая продолжается и обработка данных по которой еще только началась.

4. Основные особенности сейсмического режима Алтае-Саянской горной области

Опираясь на результаты проведенных исследований сейсмического режима Алтае-Саянской горной области, изложим основные черты развития сейсмического режима этого региона:

 Сейсмичность Алтае-Саянской области в основном формируется под воздействием коллизионных процессов от столкновения Индии с Евразией и лишь на восточном фланге появляются впадины (Белинского и Бусингольская), где коллизионная тектоника и рифтовые процессы сопоставимы по силе, а за ними выстраивается система впадин, где рифтовые механизмы формирования сейсмичности доминируют.

2. Определяющее влияние на протекание сейсмического процесса оказывает блочная структура Алтае-Саянской горной области. Сочетание приподнятых горных массивов с впадинами создает ячеистую структуру, которая оказывает упорядоченное сопротивление коллизионному воздействию со стороны Джунгарской впадины, являющейся прочным элементом между Алтаем и Тянь-Шанем.

 В сейсмическом режиме региона следует выделить фоновую сейсмичность и сейсмические активизации, как правило, связанные с крупными землетрясениями.

4. Фоновая сейсмичность, хаотичная на первый взгляд, с течением времени упорядочивается в соответствии с блочной структурой Алтае-Саянского региона, концентрируясь преимущественно в горном обрамлении впадин. Система впадин Алтае-Саянской области, являющихся более крупными прочными блоками, чем блоки раздробленных горных хребтов, оказывает сопротивление коллизионным процессам, и фоновая сейсмичность приурочена, в основном, к разрушающимся при этом горным обрамлениям, а также к редким линейным разломам, пересекающим впадины. Наблюдается стабильность проявления тектонических процессов в фоновой сейсмичности по времени, а также иерархия этих процессов по скорости проявления в сейсмичности. Геологические структуры с наиболее быстро протекающими тектоническими процессами проявляются в организации фоновой сейсмичности за год, основные черты которой повторяются из года в год. Разделение структур по скорости проявления в фоновой сейсмичности проливает свет на напряженное состояние блоков земной коры.

5. Сейсмические активизации можно рассматривать как нестационарный режим той или иной геологической структуры. Мощные сейсмические активизации структур Алтае-Саянской области формировались вокруг крупнейших землетрясений, прежде всего, как афтершоковый процесс. Крупным землетрясениям сопутствуют достаточно индивидуальные по сценарию развития сейсмические активизации. В период существования региональной сети сейсмологических станций, когда имеются надежные данные об эпицентрах, все крупные землетрясения приурочены к зонам, стабильно проявляющим себя в сейсмичности за год. На сегодняшний день не во всех активных по землетрясениям малых энергий зонах происходили крупные события. Крупным активизациям предшествуют попытки упорядоченной активизации этих же структур, часто неоднократные, не увенчавшиеся крупными землетрясениями.

6. По материалам изучения афтершокового процесса Чуйского землетрясения выявлены стадии развития и поэлементная структура афтершокового процесса, в значительной степени направленного на разрушение блоков Чуйской и Курайской впадин.

Литература

64

- 1. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37–54.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
- Садовский М.А. Автомодельность геодинамических процессов. Избранные труды // Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 1999. – С. 171–177.
- Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. – 298 с., Т. 2. – 320 с.
- Баяр Г., Монкоо Д. Сейсмичность территории Монголии за 1991– 1998 гг. // Сейсмологический мониторинг в Сибири и на Дальнем Востоке (100-летие сейсмической станции «Иркутск»). – Иркутск: Арт-пресс, 2002. – С. 43–50.
- Гайский В.И., Жалковский Н.Д. Исследование повторяемости землетрясений Западной Тувы // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1971. – № 9. – С. 16–27.
- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36. – № 10. – С. 20–30.
- Дельво Д., Тениссен К., Ван-дер-Мейер, 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.

- Добрецов Н.Л., Берзин Н.А., Буслов М.М., Ермиков В.Д. Общие проблемы эволюции Алтайского региона и взаимоотношения между строением фундамента и развитием неотектонической структуры // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36. – № 10. – С. 5– 19.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 409 с.
- Зятькова Л.К. Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, 1977. 215 с.
- Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. Новосибирск: Изд-во СО FAH, филиал «ГЕО», 2004. – 313 с.
- Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 448 с.
- Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. – М.: ОИФЗ ГАН, 2002. – 130 с.
- Molnar P, Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // Science. – 1975. – V. 189. – No. 4201. – P. 419– 426.
- Tapponier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics on the Tien-Shan, Mongolia and Baikal region // J. Geophys. Res. – 1979. – V. 84. – No. 7. – P. 3425–3459.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г. и др. Пространственновременной анализ сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Материалы международной геофиз. конф. «Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия», Новосибирск, 15–19 сент. 2003 г. – Новосибирск: Изд-во СО ГАН, 2003. – С. 73–86.
- 18. Голенецкий С.И., Гилева Н.А., Мельникова В.И. и др. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ГС РАН, 2002. – С. 81–94.
- Еманов А.Ф., Колесников Ю.И., Еманов А.А. и др. Изучение землетрясений малых энергий на локальной сети Алтайского сейсмологического полигона // Труды Всерос. Совещания «Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы», Иркутск, 26–29 авг. 2003 г. – Изд-во СО FAH, филиал «ГЕО», 2003. – С. 324–326.
- Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др. Чуйское землетрясение и его афтершоки // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 395. – № 4. – С. 534–537.
- Филина А.Г. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ГС РАН, 2002. – С. 76–80.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Алтайского) землетрясения 2003 г. // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. – М.: ИФЗ FAH, 2004. – С. 83–91.