УДК 550.34, 539.3

Стадии подготовки Алтайского землетрясения (27.09.2003 г., M_w = 7.3) и связанные с ними изменения состояния сейсмогенной среды

П.Г. Дядьков, О.А. Кучай, А.В. Михеева, Ю.М. Романенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630092, Россия

На основе детального анализа аномалий выделения сейсмической энергии (активизации и затишья), механизмов очагов землетрясений и ряда других параметров сейсмического режима выявлены три основных стадии подготовки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., M_w = 7.3. Полученные результаты интерпретированы с точки зрения сопутствующих этим стадиям изменений состояния среды в области подготовки Алтайского землетрясения. Эволюция процесса подготовки сопровождалась возникновением региональной области затишья в начале 60-х годов прошлого столетия, образованием в 1986 г. локальной области затишья, оконтуривающей с юга ближнюю зону подготовки и, по всей видимости, являющейся следствием упрочнения земной коры в пределах этой области и активизацией с 1996 г. сейсмического процесса к югу от ближней зоны подготовки с постепенным распространением сейсмической активности к области будущего очага в последние 3 года перед главным событием.

Ключевые слова: механика очага, стадии подготовки землетрясения, изменение свойств среды

Preparation stages of the Altay earthquake of magnitude 7.3 in 2003 and attendant changes in the seismogenic environment

P.G. Dyadkov, O.A. Kuchay, A.V. Mikheeva and Yu.M. Romanenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia
Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630092, Russia

Detailed analysis of anomalous release of seismic energy (activation and calm), focal mechanisms of earthquakes and other seismic parameters made it possible to reveal three main preparation stages of the Altay (Chuya) earthquake of magnitude M_w = 7.3 in September 27, 2003. The results of analysis were interpreted in terms of the changes attendant on these stages in the region of earthquake preparation. The preparation involved the formation of a regional calm zone in the early 1960s, the formation of a local calm zone contouring the near-field preparation region from the south in 1986 and most likely due to hardening of the Earth crust, and activation of the seismic process southward of the near-field preparation region in 1996 and gradual seismic activity propagation to the forthcoming earthquake focus within the last three years before the major event.

Keywords: earthquake source mechanics, preparation stages of the earthquake, changes in medium properties

1. Введение

Район подготовки землетрясения характеризуется преобладанием сдвигового режима деформирования. Данные анализа напряженного состояния и сейсмотектонических деформаций, определенных из механизмов очагов землетрясений [1], а также данные GPS-наблюдений в Центральной Азии свидетельствуют о том, что главным источником сил, ответственных за деформирование земной коры в этом регионе, является Индо-Евразийская коллизия. Характер деформационного процесса в рассматриваемом регионе определяется взаимодействием крупных жестких структурных элементов (Западно-Сибирская плита, восточные части Казахского щита, Джунгарская микроплита) с более «мягкими» участками земной коры складчатых областей, включающими в себя также отдельные жесткие домены более низкого иерархического уровня. Значительную роль при подготовке сильных землетрясений в районе Алтая может играть Джунгарская микроплита как один из наиболее крупных жестких элементов (после Тарима), расположенных между Индо-Австралийской плитой и платформенными областями Сибири.

© Дядьков П.Г., Кучай О.А., Михеева А.В., Романенко Ю.М., 2010

2. Методика исследований аномалий сейсмического режима

Исследования выполнялись с использованием геоинформационной системы EEDB (Expert Earthquake Data Base) [2], которая является наукоемкой экспертной системой благодаря последовательному включению в нее различных методов математической обработки сейсмологических данных, введению в исследование новых геофизических характеристик и совершенствованию средств наглядного представления результатов. Логическая структура EEDB представляет собой совокупность трех взаимодействующих между собой программных блоков: сейсмологической базы данных, географической подсистемы и подсистемы анализа данных.

Подсистема анализа данных включает в себя методы и алгоритмы для выполнения комплексного анализа сейсмического процесса на разных масштабных уровнях, вплоть до глобального. Эта подсистема позволяет выполнять процедуры проверки полноты и качества каталогов землетрясений, осуществлять визуализацию пространственного распределения характеристик сейсмического процесса (построение карт эпицентрального поля, распределений гипоцентров землетрясений по любым разрезам земной коры, сейсмической активности A_{10} и A_{15}, суммарного выделения сейсмической энергии за выбранные интервалы времени, значений наклона графика повторяемости, распределения плотности сейсмогенных разрывов и др.).

Методика исследований аномалий сейсмического режима (выявление областей сейсмического затишья и активизаций), в отличие от известных алгоритмов, использующих анализ числа сейсмических событий [3], основана на поиске аномалий выделения сейсмической энергии. Разработанный алгоритм включает выполнение следующих этапов: 1) разбиение всей рассматриваемой площади на элементарные ячейки и расчет для каждой ячейки среднегодовых значений сейсмической энергии E_i, выделенной в годы, предшествующие сильным землетрясениям; 2) расчет среднегодового значения выделения энергии E_{n} за предшествующий длительный интервал, который принимался за норму; 3) расчет логарифма величины E_i/E_{n} и построение карт пространственного распределения этого значения для интервалов времени, предшествующих сильному землетрясению.

3. Пространственная структура сейсмичности области подготовки

Пространственно очаг Алтайского землетрясения 2003 г. приурочен к системе разломных структур северо-западного простирания, проходящих по юго-западной границе Чаган-Узунского блока, Курайской впадины, западной части Чуйской впадины. Анализ распределения сейсмической активности для событий с $M > 3$ до Алтайского землетрясения за интервал 1963–2003 гг. показывает, что район будущего очага и Курайского хребта выделяется концентрацией слабой сейсмичности. В то же время в соседних районах в радиусе до 100–150 км сейсмичность с $M > 3$ в этот период отсутствовала, в связи с чем умеренная (и даже низкая) степень сейсмичности района будущего очага выглядит изолированно на фоне асейсмичных для рассматриваемого периода соседних областей. На больших удалениях от области будущего очага (~150–300 км) находятся районы повышенной сейсмической активности. Это район Шапшальского хребта и район оз.Урег-Нур на востоке, район Фуюньского разлома на юго–юго-востоке, сейсмоактивные области около оз. Зайсан на юго-западе.

4. Стадии подготовки Алтайского землетрясения 2003 г.

Было выполнено детальное исследование параметров сейсмического режима в рассматриваемом регионе, в первую очередь, таких, как аномалии выделения сейсмической энергии (затишья и активизации). На рассматриваемом временно́м интервале выделены 3 стадии, предшествующие главному событию. Естественно, что выявленные стадии не покрывают полностью весь сейсмический цикл подготовки сильного землетрясения, а являются в определенной степени завершающими стадиями этого цикла.

Первая стадия характеризовалась возникновением с 1963 г. обширной области сейсмического затишья для событий с $M > 4.5$, включавшей в себя все западные и северо-западные области Алтая, в том числе и ближнюю зону подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. (рис. 1). Для расчета «нормы» выделения сейсмической энергии был взят период с 1900 г. Достоверность выде-

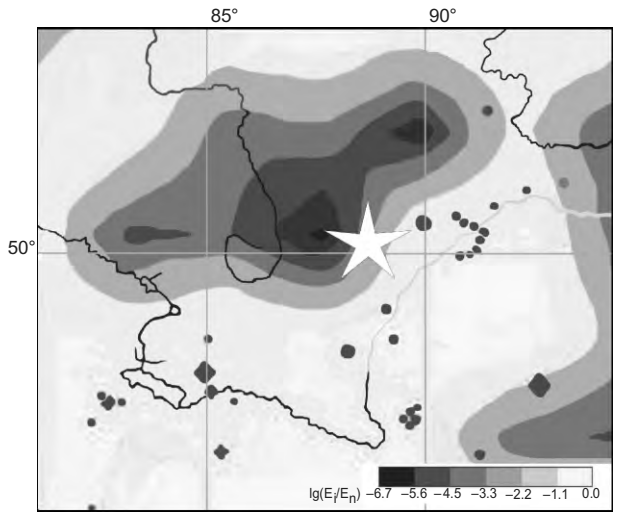


Рис. 1. Региональное сейсмическое затишье для событий с $M > 4.5$, наблюдавшееся перед Алтайским землетрясением 2003 г. (1963–август 2003 г.)

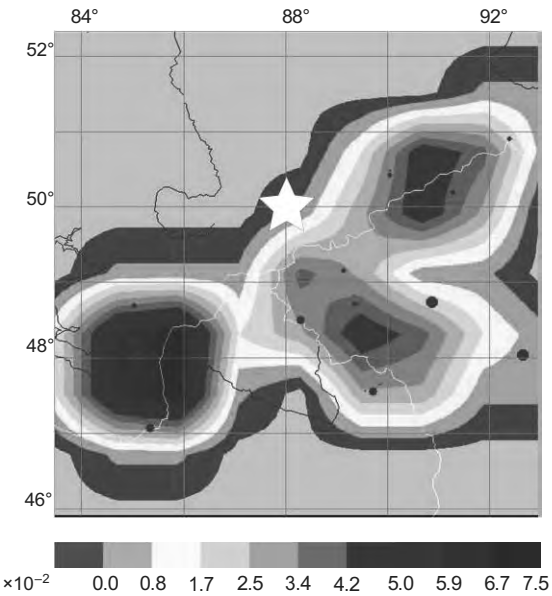


Рис. 2. Региональная сейсмическая активизация для событий с $M > 4.5$, наблюдавшаяся перед Алтайским землетрясением 2003 г. (1987 – август 2003 г.), выявляемая по изолиниям сейсмической активности A_{10}

ления этой аномалии затишья подтверждается тем, что именно с 1962–1963 гг. начинает работать сеть сейсмологических станций в Алтае-Саянском регионе, и пропусков событий с $M \sim 4$–5 быть не могло.

Во время второй стадии, начавшейся в 1986–1987 гг. южнее Русского Алтая вплоть до 46° с.ш., наблюдалась региональная активизация сейсмического процесса, при которой значительно увеличилось число землетрясений с $M \sim 5$ и более (рис. 2). Ярким выражением этой стадии и сопутствующих изменений состояния сейсмогенной среды явилось образование с юга от ближней зоны подготовки Алтайского землетрясения области сейсми-

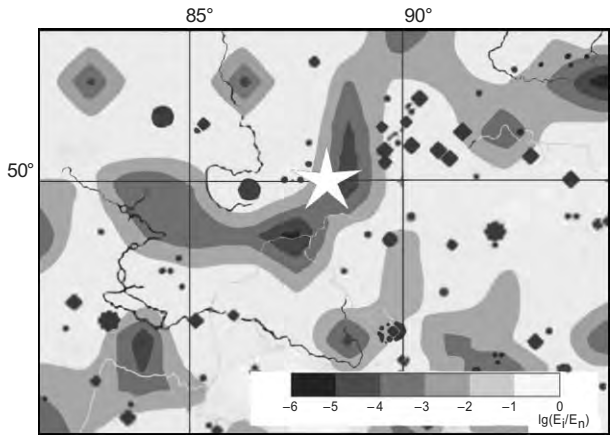


Рис. 3. Локальное сейсмическое затишье для событий с $M > 3$ (1986–1999 гг.)

ческого затишья (для событий с $M > 3$). Область имела подковообразную форму, простиралась с запада на восток на 400 км при ширине порядка 100–150 км и окаймляла район будущего землетрясения (рис. 3). В этот период наблюдалось значимое понижение угла наклона графика повторяемости [4].

Третья стадия (1996–2002 гг.) характеризовалась существенным увеличением количества событий с $M > 4$ непосредственно с юга от ближней зоны подготовки и активизацией области к югу от оз. Зайсан. Этой стадии предшествовала региональная сейсмическая активизация 1994–1995 гг., при которой резко увеличилось число событий со сбросовым типом подвижки в соседних с Алтае-Саянской областью сейсмоактивных регионах — на Байкале и Северном Тянь-Шане [5, 6].

Общая условная схема последовательности развития стадий подготовки перед Алтайским землетрясением 2003 г. представлена на рис. 4.

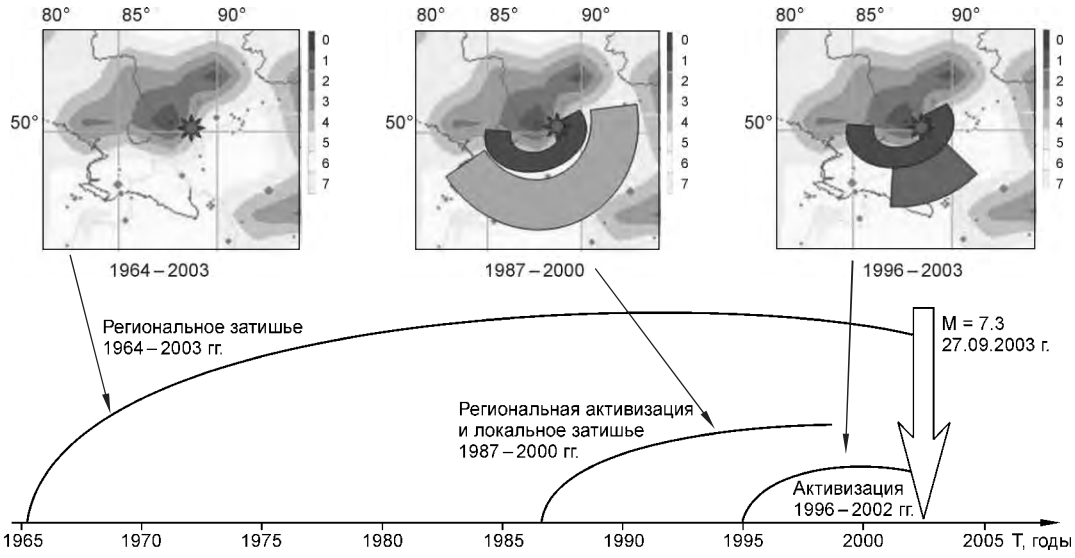


Рис. 4. Общая схема последовательности развития стадий подготовки перед Алтайским землетрясением 2003 г.

5. Влияние на процесс подготовки сильного землетрясения на Алтае меняющихся внешних геодинамических условий

Известно [5, 6], что во второй половине 80-х и в 90-х годах прошлого столетия имели место региональные изменения напряженного состояния и сейсмические активизации в районах Центральной Азии в 1986–1991 гг. (преобладание сдвиговых и сдвиго-взбросовых механизмов очагов) и в период 1994–1996 гг., когда увеличилось относительное количество событий, имеющих сбросовую компоненту подвижки. Сопоставление отмеченных периодов региональных активизаций (или их начала) с временами смены стадий подготовки Алтайского землетрясения указывает на их достаточно хорошее совпадение не только по времени, но и с изменениями состояния сейсмогенной среды в области подготовки.

Характер деформационного процесса в том или ином месте определяется, в первую очередь, условиями бокового стеснения способной к деформированию среды, находящейся между сближающимися жесткими плитами (условия регионального сжатия, в котором находится и Алтайский регион) [1]. Изменение во времени стационарных условий стеснения может повлечь за собой появление периодов накопления или разгрузки упругих деформаций. Например, сцепление на конвергентной границе между Тихоокеанской и Евразийской плитами может быть причиной изменения условий стеснения в земной коре районов Центральной Азии, в том числе и на Алтае. На условия стеснения возможно также влияние процессов, происходящих на более низких масштабных уровнях, например снижение скорости деформирования среды в связи с зацеплением ряда блоков. Выполненное численное моделирование влияния меняющихся условий бокового стеснения на характер деформирования среды подтвердило значимость этого фактора и необходимость его учета [7].

6. Изменение состояния среды в области подготовки Алтайского землетрясения

Важным следствием изменений условий стеснения является изменение не только полей напряжений и деформаций в земной коре, но и состояния среды, если рассматривать ее как дискретную, блочную. В условиях стесненного деформирования среда может становиться более компактной, консолидированной. Именно на это указывают аномалии ряда параметров сейсмического режима на 2-й стадии подготовки Алтайского землетрясения (~1986–1996 гг.), когда наблюдались уменьшение наклона графика повторяемости, снижение количества событий в афтершоковых последовательностях умеренных землетрясений, возникновение сейсмического затишья для событий с $M > 3$ южнее ближней зоны подготовки. Последний факт может указывать на наличие с юга области упрочнения, севернее которой располагалась относительно ослабленная зона будущего очага землетрясения.

Наличие области упрочнения, оконтуривающей ближнюю зону подготовки, может также подтверждаться фактом преобладания в последней сейсмических событий, имеющих сбросовую компоненту подвижки (рис. 5). При наличии области упрочнения среды с юга от ближней зоны подготовки в области формирования очага должны возникать условия разуплотнения благодаря образованию зоны «тени» аналогично тем условиям, которые рассматривались для статического случая распределения типов напряженного состояния и деформирования среды в условиях коллизионного сжатия [1]. Следует также отметить, что в определенной степени подобное распределение областей упрочнения и разупрочнения возникает в случае контактного взаимодействия жесткого штампа с менее плотной средой. Роль штампа в нашем случае может выполнять северная часть Джунгарской микроплиты. Похожая последовательность распределения областей упрочнения и разупрочнения возникает при численном моделировании воздействия штампа на пористую упругопластическую среду [8].

Стадия 3 (1996–2003 гг.), по-видимому, характеризуется обратным процессом — постепенным разуплотнением среды посредством сейсмической активизации на южных границах консолидированной системы ввиду уменьшения степени стеснения, последовавшей после региональной активизации 1994–1996 гг. Во время этой активизации очаги землетрясений в соседних с Алтаем регионах характеризовались значительным увеличе-

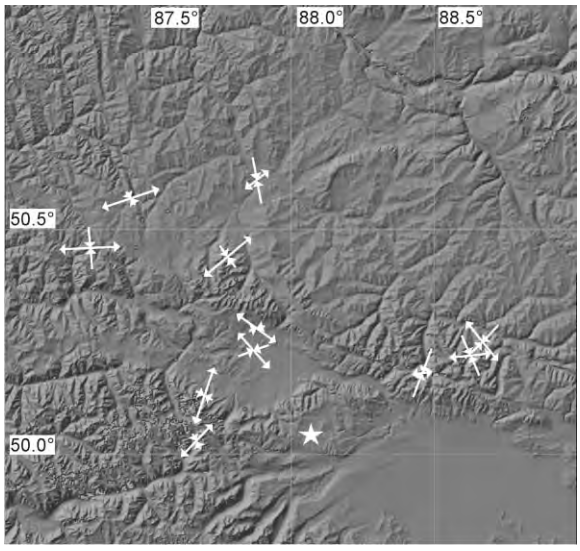


Рис. 5. Типы механизмов очагов землетрясений для периода с 1986 по 2002 г. в ближней зоне подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. Стрелками показаны проекции векторов главных напряжений (растяжения и сжатия) на горизонтальную плоскость

нием доли сбросовых компонент подвижек (Байкальский регион и Северный Тянь-Шань). Связанный с этой активизацией процесс деструкции среды вначале на южных, а затем и на восточных границах области подготовки в конечном итоге мог способствовать некоторому снижению жесткости разломных структур в области очага будущего землетрясения и реализации последнего в 2003 г.

7. Заключение

На основе полученных данных может быть предложен следующий сценарий подготовки Алтайского землетрясения 2003 г.

Начиная с 1963 г. на территории Русского Алтая формируется область дефицита выделения сейсмической энергии и, соответственно, дефицита сейсмотектонической деформации (для землетрясений с $M > 4.5$). Эта область включает всю северо-западную часть Алтая, в том числе и ближнюю зону подготовки Алтайского землетрясения 2003 г.

С 1986 г. с юга от ближней зоны подготовки Алтайского землетрясения возникает зона упрочнения среды, в которой до 1996 г. отсутствуют события с $M > 3$ и которая окаймляет район будущего землетрясения. При этом ближняя зона характеризуется условиями разупрочнения, на что указывают данные о механизмах очагов землетрясений.

Период 1996–2002 гг. характеризуется постепенным ослаблением зоны упрочнения посредством серии умеренных землетрясений ($M \sim 4–5.5$), имевших место южнее района будущего очага землетрясения. Эта локальная сейсмическая активизация могла быть следствием смены условий стеснения в 1994–1995 гг. и могла снизить жесткость межблочных контактов в ближней зоне подготовки, что в конечном итоге привело к реализации сдвиговой дислокации Алтайского землетрясения.

Обращает на себя внимание стабильность и низкая сейсмическая активность области будущего очага в течение десятков лет, в то время как ареной активных событий, связанных с подготовкой Алтайского землетрясения, явились значительные по площади территории, охватывающие соседние районы, расположенные к югу и востоку от Алтая.

Важно отметить, что смена стадий подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. приурочена к основным региональным активизациям сейсмического процесса в Центральной Азии и связана с изменениями условий бокового латерального стеснения в земной коре области подготовки.

Авторы благодарят Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН за предоставление необходимых сейсмологических данных. Работа поддержана грантами РФФИ №№ 07-05-00986-а и 10-05-01042-а, проектом № 8 Программы 16 Президиума РАН, проектом № 3 ОНЗ-7, межинтеграционными проектами СО РАН №№ 114, 133.

Литература

1. *Гольдин С.В., Кучай О.А.* Сейсмотектонические деформации Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы коллизионно-блочной геодинамики // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 692–723.
2. *Дядьков П.Г., Михеева А.В.* Применение экспертной системы EEDB при изучении процессов подготовки сильных землетрясений // Информационный бюллетень рабочего семинара «Наукоемкое программное обеспечение», 7-й Межд. конф. памяти ак. Ершова «Перспективы систем информатики», Новосибирск, Академгородок, 15–19 июня 2009 г. / Под ред. А.Г. Марчука. – Новосибирск: Сибирское научное изд-во. – С. 120–125.
3. *Habermann R.E.* Seismicity rate variations and systematic changes in magnitudes in teleseismic catalogs // Tectonophysics. – 1991. – V. 193. – No. 4. – P. 277–289.
4. *Дядьков П.Г., Кузнецова Ю.М.* Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 19–25.
5. *Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Саньков В.А.* Сейсмотектоническая активизация Байкальского региона в 1989–1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование изменений напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 3. – С. 373–386.
6. *Дядьков П.Г., Полешко Н.Н., Калмыкова Н.А., Ли А.Н., Тихомиров А.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А.* Влияние Западно-Тихоокеанских субдукционных процессов на изменения напряженного состояния земной коры и сейсмичность Центральной Азии // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Матер. XXXVII Тектонического совещ., Новосибирск, 10–13 февраля 2004 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – Т. 1. – С. 168–169.
7. *Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А.* Трехмерная геомеханическая модель литосферы района подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. // Физ. мезомех. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 25–28.
8. *Стефанов Ю.П., Евсеев В.Д.* Численное исследование деформации и разрушения горных пород под действием жесткого штампа // Изв. ТПУ. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 77–78.

Поступила в редакцию
15.04.2010 г.

Сведения об авторах

Дядьков Петр Георгиевич, к.г.-м.н., доцент, зав. лаб. ИНГГ СО РАН, dyadkovpg@ipgg.nsc.ru
Кучай Ольга Анатольевна, к.ф.-м.н., снс ИНГГ СО РАН, kuchayoa@ipgg.nsc.ru
Михеева Анна Владленовна, нс ИНГГ СО РАН, anna@omzg.sscc.ru
Романенко Юлия Михайловна, нс ИНГГ СО РАН, kuznetsovaym@ipgg.nsc.ru