

УДК 550.348.436

## ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ ОЧАГОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КОНЦЕ XX И НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ

© 2019 г. Е. А. Рогожин

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

*E-mail: eurog@ifz.ru*

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Рассматривается эволюция научных взглядов на строение очагов сильных землетрясений в России в конце XX и начале XXI веков. Отсутствие ясных, непротиворечивых представлений о строении очагов сильнейших сейсмических событий было характерно первоначально для ученых в основных развитых странах. В пятидесятые годы прошлого века в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) АН СССР Г.А. Гамбурцевым была сформулирована научная гипотеза о постоянстве сейсмического режима системы сейсмических швов за большой промежуток времени (в несколько сотен лет). Сейсмические очаги изученных в последние десятилетия землетрясений размещаются в зонах крупных разломов. С нарастанием магнитуды они становятся все более протяженными и сложными в структурном отношении. В рассмотренных случаях существуют сравнительно просто реконструируемые очаги, охватывающие плоскости крупных разломов (Спитакский очаг,  $M=6.8$ ), и более сложные, формирующиеся в дизъюнктивных узлах или охватывающие блоки коры, очаги. Так, очаг Алтайского землетрясения ( $M=7.3$ ) характеризуется объемной структурой и развит вдоль границ крупных сейсмогенных блоков. Наиболее сложным выглядит очаг Вэньчуаньского землетрясения ( $M=7.9$ ), выступающий в виде объемной структуры, представленной несколькими блоками земной коры, обрамленными двумя протяженными разломами северо-восточного простирания и разделенными поперечным разломом северо-западной ориентировки. Разные по строению очаги по-разному проявляют себя в структуре сейсмодислокаций на поверхности и в размещении гипоцентров афтершоков на глубине.

Аномально низкоскоростные «карманы», выявленные с помощью метода локальной сейсмической томографии и сопровождающие на глубине основные и дополнительные разломы в очаговых областях Спитакского и Алтайского землетрясений, по-видимому, являются зонами их динамического влияния. Разрушенные приразломные зоны, имеющие многочисленные трещины и разрывы, являются сильно разрушенными включениями в породах земной коры и представляют собой препятствия на пути сейсмических волн. Поэтому в их пределах продольные волны распространяются со сравнительно более низкой скоростью относительно ненарушенной геологической среды.

Результаты палеосейсмологического изучения сейсмических разрывов в траншеях показали, что возникновение сильных землетрясений в этих же очагах имело место и ранее, причем период повторяемости сильнейших сейсмических событий составляет от нескольких сотен до первых тысяч лет.

Таким образом, проведенные в последние десятилетия комплексные работы по обследованию очаговых зон сильнейших землетрясений в разных регионах Евразии показали, что актуальность гипотезы Г.А. Гамбурцева сохраняется и в наши дни.

*Ключевые слова:* землетрясение, очаг, сейсморазрыв, магнитуда, палеосейсмология, период повторяемости, сейсмический режим, сейсмическая томография

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191134-148>

### ВВЕДЕНИЕ

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР затем РАН традиционно был лидером в стране по изучению зон сильных землетрясений. Сейсмологи и сеймотектонисты наряду со специалистами из других профильных

организаций на местах принимали участие в экспедиционных работах по обследованию их эпицентральных зон. При этом в отечественной сеймотектонике в семидесятые–восьмидесятые годы XX века сложились противоречивые представления о приуроченности сейсмических очагов к определенным геологическим структурам.

Представители московской школы сейсмологов и сеймотектонистов И.Е. Губин в 1960–1985 гг. [Губин, 1960], Н.В. Шебалин в 1970–1989 гг. [Шебалин, 1997] связывали сейсмические проявления с плоскостями крупных, в основном вертикально проникающих в недра, разломов. В.И. Кейлис-Борок с соавторами (1973 г.) [Кейлис-Борок и др., 1988] пришли к выводу, что эпицентры крупных землетрясений «салятся» в дизъюнктивные узлы разных рангов. То есть сейсмические очаги образованы двумя или несколькими пересекающимися или причленяющимися друг к другу разломами разного простирания. Г.П. Горшков [1984] активно настаивал на объемной природе очага землетрясения, который может быть связан с самыми различными, в частности, блоковыми структурами при условии накопления в них напряжений.

Иркутской школой сеймотектонистов во главе с Н.А. Флоренсовым и В.П. Солоненко [1963] после Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. с  $M=8.1$  в Монголии было проведено изучение возникшего на поверхности крупного линейного нарушения. При этом сейсмическом событии очаг вскрылся на поверхности в виде системы сейморазрывов общей протяженностью более 200 км вдоль известного разлома Богд. Это сделало представителей иркутской школы приверженцами идей о сейсмическом очаге как о форме активизации глубинного разлома.

Представления о сравнительно простом устройстве сейсмических очагов были типичны в эти годы для американской сеймотектонической школы в связи с тем, что большинство хорошо изученных в США землетрясений приурочено к зоне разлома Сан-Андреас, где сейморазрывы сильнейших сейсмических событий по большей части имеют сдвиговый характер и не осложненную дополнительными разрывами линейную форму. Сравнительно просто устроенные очаги сильных землетрясений были характерны, например, для Тянь-Шаня, для зоны Таласо-Ферганского разлома [Корженков, 2009]. Сложные по структуре очаги, приуроченные к узлам сочленения разломов разных ориентировок, проявившихся на поверхности в конфигурации сейморазрывов, описаны французскими и алжирскими сеймотектонистами для Эль-Аснамского землетрясения 1980 г. в Алжире с  $M=7.3$  [Cisternas et al., 1982; Philip, Meghraoui, 1980], а также для ряда сильнейших землетрясений прошлого в Монголии и на Тянь-Шане российскими учеными [Корженков и др., 2018; Рогожин и др., 2008].

Таким образом, отсутствие ясных, непротиворечивых представлений о строении очагов сильнейших сейсмических событий было характерно и для ученых в основных развитых странах.

### ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О БЛОКОВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ СРЕДЫ И ОБ АКТИВНЫХ РАЗЛОМАХ

В 1949–1955 гг. директором Геофизического института АН СССР (позже Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, РАН) был академик Григорий Александрович Гамбурцев. Одной из областей его научных интересов являлись проблемы оценки сейсмической опасности. Он считал землетрясение одним из проявлений тектонической жизни земной коры и подкорового вещества. В процессе этой жизни развивалась дифференциация по прочности отдельных участков земной коры. Земная кора расчленялась на относительно более прочные участки – «блоки» земной коры – и относительно менее прочные участки – ослабленные зоны, образующиеся в области сочленения соседних блоков при их относительном движении. Большинство этих ослабленных зон, по всей видимости, состоит из серии глубинных разрывов, возможно, частично «залеченных». Они легче, чем блоки, подвергаются последующим разрушениям, и в них, как правило, располагаются очаги землетрясений. Глубинные зоны сочленения блоков земной коры, отличающиеся той или иной степенью сейсмичности, он предлагал называть *сейсмическими швами*. Простейшей моделью сейсмического шва может служить однородный упругопластичный вертикальный или наклонный «слой», прочность которого различна в разных частях, оставаясь в среднем меньше, чем прочность блоков.

Так Григорий Александрович практически впервые сформулировал представление о блоковой иерархической структуре среды и об активных разломах [Гамбурцев, 2007].

Длительность «жизни» сейсмических швов, по его представлениям, была весьма велика при больших флуктуациях сейсмических процессов во времени и в пространстве. На этой основе им была сформулирована научная гипотеза о постоянстве сейсмического режима определенной системы сейсмических швов за большой промежуток времени (порядка нескольких сотен лет). Созданная Г.А. Гамбурцевым разломно-блоковая модель геологической среды может служить основой для понимания глубинного и приповерхностного строения очагов землетрясений

разной энергии. А мысль о долговременном существовании сейсмических швов дала возможность проследить историю активизаций очаговых зон в голоцене по палеосейсмологическим данным.

Как ни странно, эти революционные представления позже, после его ухода из жизни, были в значительной мере забыты российскими сейсмогеологами и сейсмологами.

### СОВРЕМЕННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В последние десятилетия XX и в начале XXI веков, в связи с использованием более совершенной записывающей аппаратуры в виде цифровых полевых сейсмостанций, новых методик математической обработки данных, сейсмологические наблюдения стали более детальными и надежными, чем ранее. После сильных землетрясений, кроме сейсмологических, стали проводиться различные другие геофизические исследования, в том числе геодезические работы (в частности, с применением методов GPS), лазерное сканирование местности, интерпретация повторных космических съемок территории с применением методики InSAR и аэрофотосъемка. Все эти источники информации позволяют комплексно, своевременно и детально изучить проявления сейсмического события, установить параметры и конфигурацию очага, в частности методами локальной сейсмической томографии, воссоздать особенности долговременного сейсмического режима. С другой стороны, сильно повысилась геолого-геофизическая изученность глубинных и приповерхностных горизонтов земной коры. Систематически стало проводиться геологическое обследование эпицентральных зон сильных землетрясений, включающее детальное картирование остаточных деформаций на поверхности и изучение приповерхностного и глубинного строения сейсмогенных геологических структур.

В тот же период времени практически во всех сейсмоактивных зонах Северной Евразии (на Большом и Малом Кавказе, в Западной Туркмении, в Кызылкумах, в Тянь-Шане, на Алтае, в Саянах, на Сахалине и на Курило-Камчатской островной дуге) произошли сильные и сильнейшие землетрясения. Некоторые из них превзошли значение максимальной магнитуды ожидаемых сейсмических событий. Все эти землетрясения были своевременно изучены с сейсмогеологической точки зрения. В связи

с тем, что многие из этих сейсмических толчков показали, что выявленные на поверхности свежие сейсмодислокации проявляли активность и в прежние, отдаленные времена, для ряда событий удалось провести анализ истории сейсмических проявлений в недавней геологической истории. Для позднего плейстоцена и голоцена такие сведения можно почерпнуть из результатов палеосейсмогеологических исследований, крайне популярных в последние десятилетия у сейсмогеологов развитых стран. В этот период и в России были проведены палеосейсмогеологические исследования во многих регионах страны и в эпицентральных зонах сильнейших землетрясений.

Палеосейсмогеология – раздел сейсмогеологии, посвященный изучению древних, доисторических, землетрясений. Основы палеосейсмогеологического метода были впервые разработаны в СССР в 50-е – 60-е годы XX века В.П. Солоненко и Н.А. Флоренсовым и применены для изучения следов древних, доисторических, землетрясений в Забайкалье и на Кавказе. Позже они получили широкое распространение во всем мире. Палеоземлетрясения, так же как и современные сейсмические события больших магнитуд, оставляли следы на поверхности земли – палеосейсмодислокации. Эти дислокации бывают нескольких видов, но могут быть отнесены к двум большим группам – к первичным или вторичным сейсмодислокациям. Первичные, или сейсмогеологические нарушения, представляют собой выход на поверхность земли очагов палеоземлетрясений в виде сейсморазрывов. Вторичные, сейсмогравитационные и вибрационные дислокации, образуются в результате катастрофических склоновых явлений и разжижений грунта в ответ на воздействие сейсмических колебаний. К вторичным нарушениям поверхности относятся сейсмогенные оползни, обвалы горных масс, каменные, снежно-каменные и ледово-каменные лавины, осыпи, трещины, грифоны и грязевые вулканы. По данным об этих палеосейсмодислокациях можно составить представление о магнитуде и времени палеоземлетрясений. Их возраст определяется радиоуглеродным, термолюминисцентным, археологическим или другими аналитическими методами, магнитуда – по длине первичных сейсморазрывов и амплитуде разрывных смещений, а также по площади распространения вторичных сейсмодислокаций – сейсмообвалов, каменных лавин и оползней. Имея сведения о магнитуде и периоде повторяемости регистрируемых землетрясений, исторических сейсмических

событий и палеоземлетрясений можно оценить сейсмический режим той или иной территории. Таким образом, палеосейсмогеология дает возможность восполнить недостаток сейсмостатистических данных для регионов с умеренным уровнем современной сейсмической активности и на этой основе выяснить уровень их реальной сейсмической опасности.

Изучение очаговых зон крупных землетрясений – работа коллективная, в которой участвуют специалисты разного профиля: сейсмологи, геологи, геофизики, геодезисты. Для обследования важнейших сейсмических событий на территории бывшего Советского Союза создавались комплексные эпицентральные экспедиции, в состав которых входили как представители центральных профильных институтов АН СССР (основная роль в этих работах отводилась специалистам из ИФЗ АН СССР), так и сотрудники местных институтов национальных Академий наук тех союзных республик, на площади которых возникали эти землетрясения. В ряде случаев, после начала перестройки для участия в составе экспедиций приглашались ведущие иностранные специалисты из развитых стран Запада и Востока.

Примерами землетрясений, эпицентральные зоны которых были хорошо исследованы в ходе работы комплексных эпицентральные экспедиций, служат Газлийские 1976 и 1984 гг., Кумдагское 1983 г., Бурунское 1984 г., Спитакское 1988 г., Рачинское 1991 г. катастрофические сейсмические события. После развала СССР эта традиция некоторое время продолжала сохраняться. Так, эпицентральные зоны Суусамырского 1992 г. и Нефтегорского 1995 г. сильнейших землетрясений обследовались российскими учеными с привлечением киргизских специалистов в первом случае и японских – во втором. В изучении Алтайского землетрясения кроме представителей российских центральных и сибирских академических организаций приняли участие также сотрудники Университета Страсбурга (Франция) и Университетов Кембридж и Оксфорд (Великобритания).

В последние годы для очаговых областей нескольких наиболее хорошо изученных землетрясений удалось разработать сейсмотомографические модели, а для Алтайского события – модель с использованием дистанционных данных по методике InSAR [Nissen et al., 2007]. Эти и другие собранные материалы позволяют разработать обобщенный подход к сейсмотектонической интерпретации сейсмических очагов

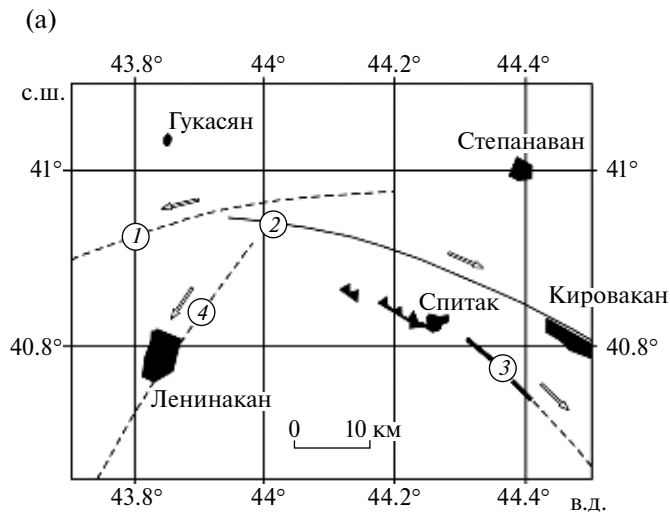
сильных событий, возникших в разных геодинамических обстановках.

### СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ОЧАГОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Начиная с 1980-х годов в Советском Союзе, а с 1991 г. – в России, рядом исследователей, и в том числе автором настоящей статьи, осуществляется программа изучения сейсмодислокаций в эпицентральных областях, происходивших на этой территории сильнейших и сильных землетрясений. Так, были проведены сейсмотектонические и палеосейсмологические исследования, включающие проходку траншей вкост простирания сейсморазрывов и трещин, Кумдагского (1983 г.), Бурунского (1984 г.) землетрясений в Западной Туркмении, Газлийских землетрясений (1976 и 1984 гг.) в Западном Узбекистане, Спитакской сейсмической катастрофы (1988 г.) в Армении, Нефтегорского землетрясения (1995 г.) на Сахалине, Алтайского землетрясения 2003 г. на Горном Алтае, Олюторского землетрясения (2006 г.) [Рогожин, 2012] в Камчатском крае, Тувинских землетрясений (2011 и 2012 гг.) в Республике Тува [Ovsuchenko et al., 2017]. В мире после сильнейших сейсмических событий также проводилось комплексное изучение их очаговых областей. Хорошим примером является Вэньчуаньское катастрофическое землетрясение 2008 г. в Китае [Chen Yong, Booth, 2011]. Все эти землетрясения возникли в разных тектонических обстановках, а породившие их структуры, как выяснилось, имеют разную сейсмическую историю в голоцене.

Приведем наиболее представительные результаты изучения ряда сильнейших сейсмических событий.

**Спитакское землетрясение**, произошедшее 7 декабря 1988 г. ( $M = 6,8$ ), было одним из наиболее разрушительных на территории СССР. В результате землетрясения погибло по меньшей мере 25 тысяч человек. Оно произошло в Северной Армении (на территории Малого Кавказа) и сопровождалось формированием системы поверхностных сейсмодислокаций: обширного поднятия земной поверхности (по результатам проведенной повторной нивелировки); первичных сейсморазрывов, оползней, обвалов горных масс, осыпей, просадок насыпных грунтов. Главный сейсмогенный разрыв общей длиной около 35 км пересек в северо-западном направлении северные склоны и отроги Памбакского хребта в районе города Спитак. Он был



**Рис. 1.** (а) – Тектоническая позиция очага Спитакского землетрясения. Цифры в кружках: разломы: 1 – Амасия-Саракамышский; 2 – Памбак-Севанский; 3 – Алаварский; 4 – Ахурянский. Черными линиями с зубчиками показаны сейсморазрывы северо-западного и центрального сегментов, толстой черной линией – юго-восточного сегмента; (б) – сейсморазрыв Спитакского землетрясения (фото автора).



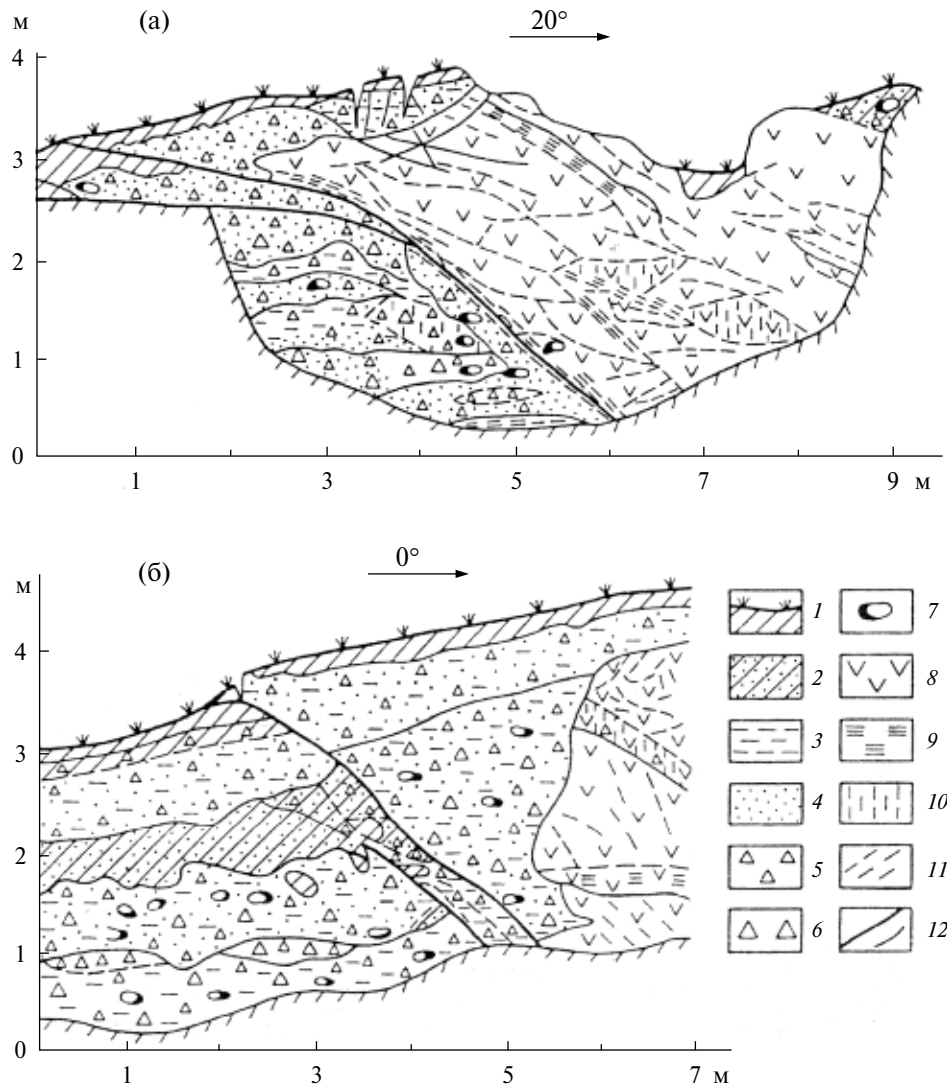
приурочен к зоне Алаварского активного разлома (рис. 1а, 1б).

Особенности близповерхностного строения сейсмогенного разрыва и характер контакта горных пород по нему были изучены в траншеях (рис. 2), в которых наблюдается различающееся строение «крыльев». Северо-восточное или северное «крыло» поднялось при землетрясении на высоту 0.3–0.5 м. Оно оказалось сложенным практически выходящими на поверхность древними вулканитами палеогена, а южное, опущенное – мощной (до 9 м) толщей молодых рыхлых отложений. Сейсмогенный разрыв погружается в недра в северо-восточном, а местами – в северном направлении под углом 40–50°, а близ поверхности – до 10–20°. Таким образом, он проходит вдоль геологического разлома того же

структурного типа, с большой амплитудой молодых вертикальных смещений (более 9 м). В стенках траншей были обнаружены следы трех древних сейсмических событий, происшедших около 24 000–25 000, 16 000–17 000 и 6000 лет назад с периодом повторяемости от 6000 до 10 000 лет.

Характерна взбросо-сдвиговая кинематика смещений (вертикальная амплитуда до 1.5 м, горизонтальная, правосдвиговая обычно –0.5–0.7 м, в одном месте она достигает 2 м [Трифонов и др., 1990]).

Временная международная сеть сейсмических станций, которая была развернута в эпицентральной зоне сразу после главного толчка, зарегистрировала несколько тысяч повторных толчков разной магнитуды; это позволило составить представление о строении сейсмического



**Рис. 2.** Строение сейсмогенного разрыва в траншеях близ г. Спитак: 1 – дерн и современная почва; 2 – древняя погребенная почва; 3 – суглинки; 4 – пески; 5 – дресва; 6 – щебни; 7 – гальки и мелкие валуны; 8 – вулканиты эоцена; 9 – зоны трещиноватости; 10 – зоны ожелезнения; 11 – крупные трещины; 12 – взбросо-сдвиги, возникшие при Спитакском землетрясении [Рогожин, 2012].

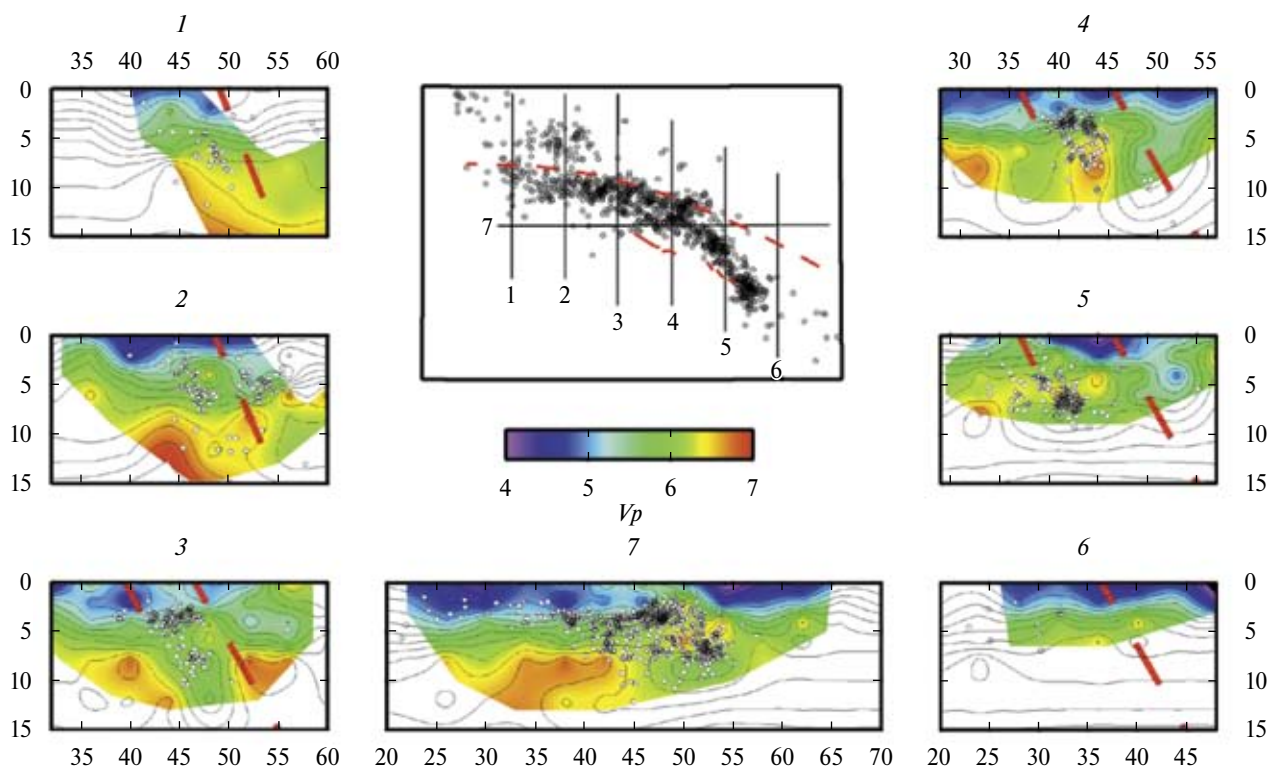
очага на глубине. Очаг оказался приуроченным к верхним горизонтам земной коры – углубляясь от поверхности на 10–14 км. Поле эпицентров афтершоков в виде узкой линейно вытянутой полосы сопровождало зону поверхностных сейсморазрывов. Хорошее качество регистрации повторных толчков землетрясения позволило французским и российским ученым (С.С. Арефьеву и др. [Арефьев и др., 2006]) разработать сейсмотомографическую модель очага в недрах (рис. 3).

Согласно выявленным закономерностям распределения повторных толчков, очаг землетрясения в томографической картине распределения сейсмических скоростей выглядит как

узкая зона относительно пониженных сейсмических скоростей продольных волн ( $V_p$ ). Обычно значения  $V_p$  в пределах таких зон в среднем на 0.5 км/с ниже, чем в окружающих, ненарушенных блоках коры. Эта зона в виде узкого «кармана» проникает в недра на глубину до средних горизонтов коры и местами наклонена к северу под углом примерно 60–70° согласно с общим падением поверхности разлома, установленным геологическими наблюдениями на поверхности и в траншеях. Таким же образом погружаются гипоцентры афтершоков на глубине.

**Алтайское (Чуйское) землетрясение ( $M=7.3$ )** произошло 27 сентября 2003 г. и стало сильней-





**Рис. 3.** Сейсмотомографические разрезы очаговой области Спитакского землетрясения [Арефьев и др., 2006]. На плане черными точками показаны эпицентры афтершоков, пунктирной красной дугообразной линией – Памбак-Севанский разлом, южнее – красной прерывистой линией – сейсморазрыв.

шим инструментально зарегистрированным землетрясением в Горном Алтае. Район очаговой зоны землетрясения оказался малонаселенным. Благодаря этому обстоятельству, а также по счастливой случайности землетрясение не сопровождалось жертвами, хотя были раненые, и много зданий значительно пострадало. Эпицентральная зона землетрясения принадлежит к обширному Алтае-Саянскому региону. Карта общего районирования России (ОСР-97) в данном случае оказалась удачной: несмотря на отсутствие инструментальных и исторических данных о сильнейших толчках прошлого, сейсмическая опасность района была оценена вполне корректно [Уломов, Шумилина, 1999]. Важно отметить, что этот успех был обусловлен полученными в 1990-х гг. результатами: были своевременно проведены группой ученых ИФЗ РАН под руководством доктора геолого-минералогических наук Г.И. Рейснера [Рейснер, Иогансон, 1993] сейсмотектонические исследования по оценке сейсмического потенциала региона с помощью математического анализа комплекса геолого-геофизических и сейсмологических данных.

Геофизическая служба Сибирского отделения РАН постоянно совершенствовала сейсмическую сеть, и примерно за два года до землетрясения силами сейсмологов из Новосибирска были организованы наблюдения с использованием современной цифровой аппаратуры в непосредственной близости к очагу произошедшего в 2003 г. землетрясения. С помощью сети сейсмических приборов были продолжены наблюдения и после землетрясения: контролировались при этом не только эпицентральная зона, но и прилегающие территории.

Научные коллективы из разных организаций проводили полевые исследования землетрясения. В первую очередь, это группы из Новосибирска (Геофизическая служба СО РАН, Институт геологии СО РАН), Москвы (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта – ИФЗ РАН), Иркутска (Институт Земной коры СО РАН). ИФЗ РАН организовал в 2003–2005 гг. оперативный выезд группы сейсмогеологов (при финансовой поддержке в виде экспедиционных грантов РФФИ). Коллективом ученых были обследованы поверхностные нарушения – сейсморазрывы, связанные непосредственно с процессом выхода очага землетрясения на поверхность

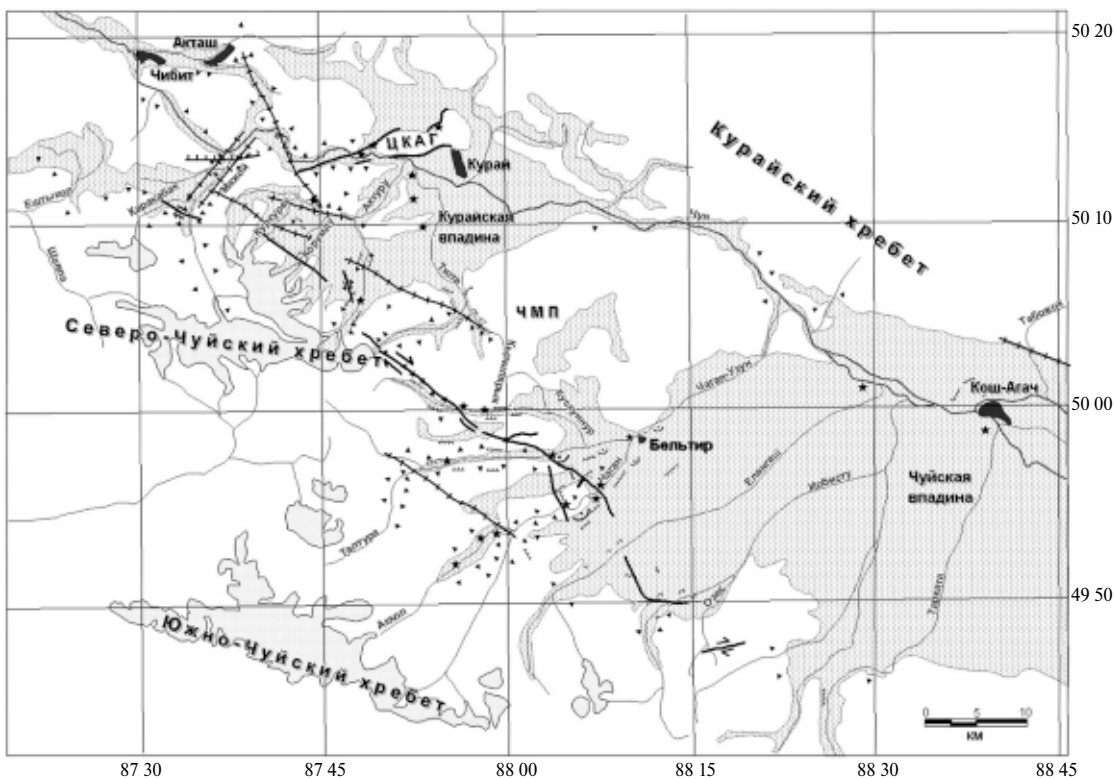
в виде линейной, протяженной (более 70 км) системы первичных сейсморазрывов. Ориентирована она в целом в северо-западном (иногда в близширотном) направлении и нарушает дневную поверхность на северо-восточных склонах Северо-Чуйского и Южно-Чуйского хребтов (рис. 4). Максимальная амплитуда горизонтального смещения составляет 1.5–2.0 м (рис. 5, рис. 6). На отдельных участках зафиксирована вертикальная компонента смещений величиной до 0.7 м. В зависимости от различий в строении зоны сейсморазрывов и характера проявления сейсмогравитационных дислокаций выделяется несколько участков, объединяющихся в три сегмента, – юго-восточный, центральный и северо-западный. На юго-восточном окончании зоны магистрального разрыва отмечается его разветвление на несколько отдельных нарушений, а на северо-восточном крыле обнаружена дополнительная ветвь первичного сейсморазрыва широтного простирания.

По результатам палеосейсмологических исследований, в траншеях, пересекающих сейсморазрыв на разных отрезках, в течение последних

8500 лет произошло шесть землетрясений с магнитудой  $M = 7.0 \pm 0.2$  (период повторяемости составлял около одного раза в 1400 лет) и четыре землетрясения с магнитудой  $M = 7.5 \pm 0.2$  (период повторяемости – одно событие примерно в 2100 лет).

Простираение зоны сейсморазрывов хорошо коррелирует с распространением длинной оси «облака» эпицентров повторных толчков (при этом наиболее плотное скопление афтершоков непосредственно связано с зоной сейсмогенного разлома).

Точная локация афтершоков показала, что их расположение в пространстве находится в хорошем соответствии с выходом основного разрыва в очаге землетрясения на дневную поверхность (рис. 7). По данным, полученным об афтершоках, очаг землетрясения имел следующие размеры: его длина составляла 75 км, максимальная ширина – 20 км, вертикальная протяженность – 17 км, средняя величина смещения в очаге – 2.5 м [Гольдин и др., 2004].



**Рис. 4.** Карта распространения сейсмодислокаций [Рогожин, 2012]: 1 – сеймотектонические разрывы (*a* – правые сдвиги, *b* – сбросы); 2 – обвалы и осыпи; 3 – разжижения грунта; 4 – оползни; 5 – разломы, обновленные в процессе резонансных колебаний; 6 – трещины отседания склонов; 7 – четвертичные озерные, речные и ледниковые отложения; 8 – крупнейшие современные ледники. ЦКАГ – Центрально-Курайская антиклинальная гряда, ЧМП – Чаган-Узунская межвпадинная перемычка.





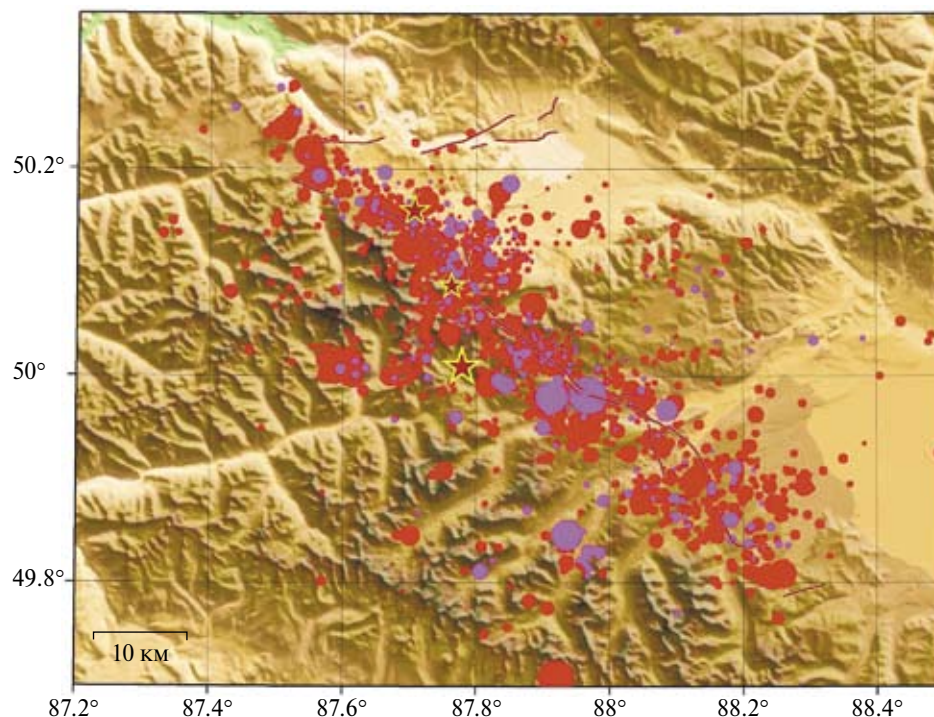
**Рис. 5.** Сейсморазрыв Алтайского землетрясения (фото автора).



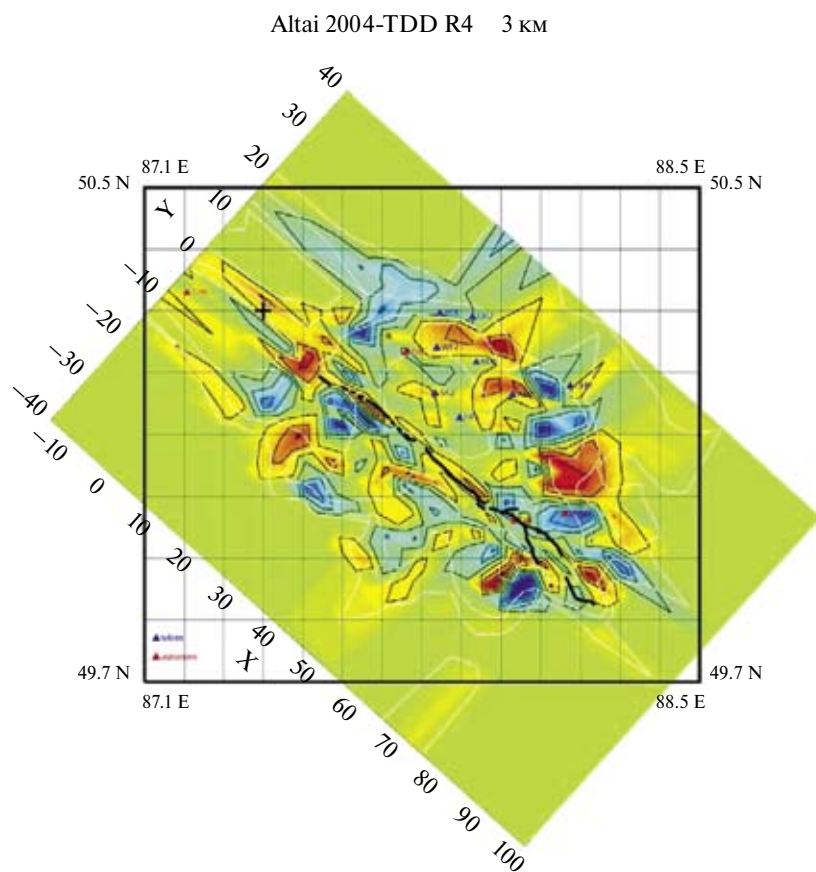
**Рис. 6.** Правосторонний сдвиг по сейсморазрыву Алтайского землетрясения (фото А.Н. Овсяченко).

Согласно проведенному томографическому анализу сейсмологических материалов [Dorbath et al., 2008] и геологическим данным стабильные блоки коры, окружающие очаговую зону с северо-востока и с юго-запада, характеризуются постепенным нарастанием с глубиной сейсмических скоростей (рис. 8).

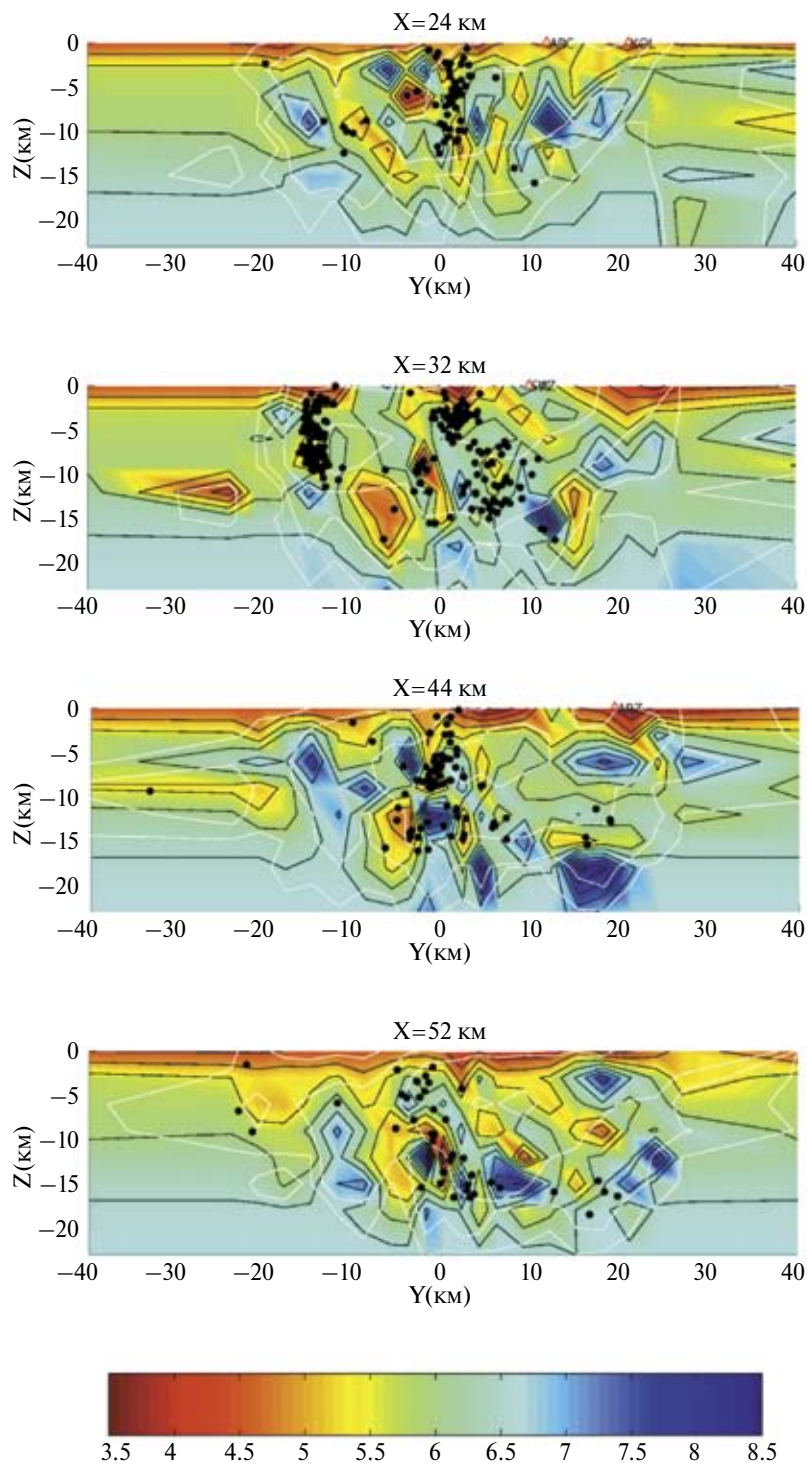
Очаговая область землетрясения сопровождается в недрах узкими зонами относительно пониженных сейсмических скоростей. Ширину и конфигурацию этих приразломных зон на глубине можно оценить по поперечным томографическим разрезам; она составляет обычно 2–3 км. Эти зоны в виде узких карманов



**Рис. 7.** Алтайское землетрясение. Карта эпицентров афтершоков, зарегистрированных временной сетью сейсмостанций ИФЗ РАН за полевые сезоны 2004 г. (красные кружки) и 2005 г. (фиолетовые кружки) по данным ИФЗ РАН. Большой звездочкой обозначен эпицентр главного толчка, двумя малыми звездочками – эпицентры сильнейших повторных толчков: тонкими красными линиями показана система сейсморазрывов [Арефьев и др., 2006].



**Рис. 8.** Карта распределения скоростей *P*-волн на глубине 3 км: желто-красные цвета – пониженные значения; сине-зеленые – относительно повышенные; черной линией показан основной сейсморазрыв [Dorbath et al., 2008].



**Рис. 9.** Сейсмотомографические разрезы вкост простирания очаговой зоны Алтайского землетрясения: желто-красные цвета – пониженные значения, сине-зеленые – относительно повышенные. Черными точками показаны гипоцентры афтершоков [Dorbath et al., 2008].

близвертикально проникают в недра до средних частей коры (рис. 9).

**Вэньчуаньское катастрофическое землетрясение** с магнитудой  $M_s = 8.0$  ( $M_w = 7.9$ ) произошло 12 мая 2008 г. в юго-восточной части округа

Вэньчуань китайской провинции Сычуань. По официальной статистике на момент 25 сентября 2008 г., погибло или пропало без вести 87 150 человек и 374 643 человек было ранено. Это было наиболее сильное и катастрофическое



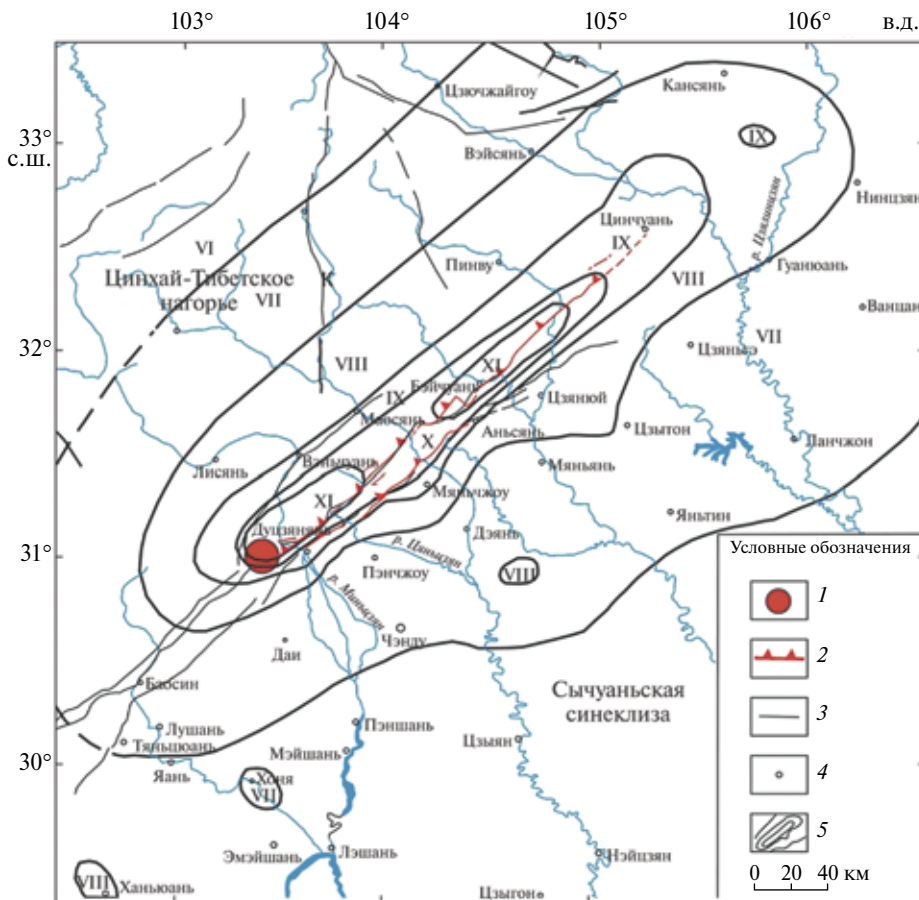
землетрясение после знаменитого Таншаньского землетрясения 1976 г. с магнитудой 7.8 в континентальном Китае.

Эпицентр Вэньчуаньского толчка был расположен в зоне разломов Лунмэньшань северо-восточного простирания, разделяющей восточную окраину Цинхай-Тибетского нагорья и северо-западную часть Сычуаньской впадины (рис. 10). Глубина очага подземного толчка, по разным данным, варьирует от 12 до 19 км. После главного толчка до 11 декабря 2008 г. было зарегистрировано около 40 тысяч афтершоков. Максимальная интенсивность сотрясений составила XI баллов по китайской макросейсмической шкале [Fu et al., 2009] (рис. 10).

Объекты инфраструктуры, непосредственно попавшие в зоны эскарпа сейсморазрыва и распространения вторичных нарушений поверхности, были полностью разрушены или сильно повреждены. При этом макросейсмическая интенсивность сотрясений была аномально низкой

для магнитуды 8.0. Сотрясения поверхности даже в непосредственной близости от системы сейсморазрывов при главном толчке обычно не превышали 7–8 баллов. Высокие оценки балльности (X–XI баллов) узкой полосой следуют вдоль зоны сейсморазрывов (рис. 10, рис. 11). Распределение склоновых нарушений также носит явно линейный характер, и приурочено к сейсмогенному Инсю-Бэйчуаньскому разлому и долинам крупных рек. При этом переход от зон очень сильного эффекта к зонам с меньшими воздействиями (VIII–IX баллов) выглядит достаточно необычно. Изосейсты здесь аномально сближены, а области смены одной зоны другою необыкновенно узки. Это свидетельствует о доминировании при рисовке изосейст разрушений, связанных с геологическими эффектами.

Проведенные исследования показывают, что при главном толчке землетрясения на поверхности возникла сложная система первичных сейсмодислокаций – сейсморазрывов, общей



**Рис. 10.** Система сейсморазрывов Вэньчуаньского землетрясения 2008 г. в зоне активных разломов (взбросо-сдвигов) Лунмэньшань и изосейсты в баллах китайской макросейсмической шкалы (по данным Китайской сейсмологической администрации с доп.): 1 – эпицентр Вэньчуаньского землетрясения 12.05.2008 г.; 2 – сейсморазрывы; 3 – активные в голоцене разломы; 4 – населенные пункты; 5 – изосейсты.



**Рис. 11.** Взбросо-правосдвиговое смещение набережной (фото автора); на противоположном берегу реки видны многочисленные свежие оползни.

протяжностью около 240 км, максимальное вертикальное смещение достигло 9 м, а горизонтальное — 4.8 м. Сейсморазрывы подразделяются на три основных сегмента с разной внутренней структурой, морфотектонической позицией и кинематикой смещений — две наиболее протяженные субпараллельные ветви северо-восточного простирания (сейсморазрывы Бэйчуань-Инсю и Гуаньсянь-Аньсянь) и одна ветвь поперечного северо-западного простирания (сейсморазрыв Сяюйдон). В целом зона интенсивных поверхностных деформаций образует узкую протяженную овальную область, вытянутую в северо-восточном направлении, совпадающем с простиранием системы сейсморазрывов. При этом очаг землетрясения имеет объемную структуру в виде нескольких блоков земной коры шириной до 15 км, обрамленных двумя протяженными разломами северо-восточного простирания и разделенных поперечным разломом северо-западной ориентировки.

В зоне Вэньчуаньского землетрясения были проведены палеосейсмологические исследования методом тренчинга сейсморазрывов. Полученные в ходе этих исследований данные позволили проследить длительную историю развития изучаемой очаговой зоны и обнаружить следы неоднократных сильных сейсмических событий прошлого [Ran et al., 2010; 2013; 2014; Chen et al.,

2013; Sun et al., 2015]. Результаты этих исследований проанализированы. За 10 000 лет произошло 4 землетрясения с магнитудой  $M=8.0$  и за 1200 лет 2 землетрясения с магнитудой 7.5. Полученные данные позволили восстановить долговременный сейсмический режим изучаемой территории путем построения графика повторяемости на основе материалов инструментальных, исторических и палеосейсмологических исследований [Лю и др., 2017].

## ВЫВОДЫ

Итак, сейсмические очаги изученных землетрясений размещаются в зонах крупных разломов. С нарастанием магнитуды они становятся все более протяженными и сложными в структурном отношении. в рассмотренных случаях существуют сравнительно просто реконструируемые очаги, охватывающие плоскости крупных разломов (Спитакский очаг,  $M=6.8$ ), и более сложные, формирующиеся в дизъюнктивных узлах или охватывающие блоки коры, очаги. Так очаг Алтайского землетрясения ( $M=7.3$ ) характеризуется объемной структурой и развит вдоль границ крупных сейсмогенных блоков. Наиболее сложным выглядит очаг Вэньчуаньского землетрясения ( $M=7.9$ ), выступающий в виде объемной структуры, представленной несколькими



блоками земной коры, обрамленными двумя протяженными разломами северо-восточного простирания и разделенными поперечным разломом северо-западной ориентировки. Разные по строению очаги по-разному проявляют себя в структуре сейсмодислокаций на поверхности и в размещении гипоцентров афтершоков на глубине.

Аномально низкоскоростные «карманы», выявленные с помощью метода локальной сейсмической томографии и сопровождающие на глубине основные и дополнительные разломы в очаговых областях Спитакского и Алтайского землетрясений, по-видимому, являются зонами их динамического влияния. Приразломные зоны, имеющие многочисленные трещины и разрывы, являются сильно разрушенными включениями в породах земной коры и представляют собой препятствия на пути сейсмических волн. Поэтому в их пределах продольные волны распространяются со сравнительно более низкой скоростью относительно нарушенной геологической среды.

Результаты палеосейсмологического изучения сейсмических разрывов в траншеях показали, что возникновение сильных землетрясений в этих же очагах имело место и ранее, причем период повторяемости сильнейших сейсмических событий составляет от нескольких сотен до первых тысяч лет.

Как мы видим, собранные материалы о строении хорошо изученных очаговых зон сильных землетрясений на поверхности и в их недрах, о периодах их исторической активности полностью подтверждают представления Г.А. Гамбурцева о глубинном строении крупных сейсмоактивных разломов и их неоднократных активизациях в прошлом, сформулированные много десятиков лет назад.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-05-00641).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Антекман Ж.Я., Быкова В.В., Дорбат К.* Глубинная структура и томографические модели очаговых зон сильных землетрясений // *Физика Земли*. 2006. № 10. С. 65–80.
- Гамбурцев Г.А.* К методике сейсмического районирования. Научное наследие. Малоизвестные работы и материалы из архива. М.: Наука. 2007. С. 148–155.
- Гольдин С.В., Селезнёв В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А.* Чуйское землетрясение и его афтершоки // *Докл. РАН*. 2004. Т. 395. № 4. С. 534–536.
- Горшков Г.П.* Региональная сеймотектоника территории юга СССР. М.: Наука. 1984. 272 с.
- Губин И.Е.* Закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана. М.: изд-во АН СССР. 1960. 464 с.
- Кейлис-Борок В.И., Габриелов А.М., Левшина Т.А., Ротвайн И.М.* Блоковая модель динамики литосферы. Современная динамика литосферы континентов. 1988. М.: ИЗК СО АН СССР. С. 5.
- Корженков А.М.* Сейсмогеология Тянь-Шаня. Бишкек: изд-во Илим. 2006. 290 с.
- Корженков А.М., Абдиева С.В., Рогожин Е.А., Сорокин А.А.* Неизвестное сильное землетрясение в Иссык-Кульской котловине // *Природа*. 2018. № 03. С. 24–35.
- Лю Ц., Родина С.Н., Рогожин Е.А.* Палеоземлетрясения и долговременный сейсмический режим в зоне разломов Лунмэньшань, юго-западный Китай // *Физика Земли*. 2017. № 6. С. 40–44.
- Рейснер Г.И., Йогансон Л.И.* Сейсмический потенциал Западной России, других стран СНГ и Балтии. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып.1. М. 1993. С. 186–196.
- Рогожин Е.А.* Очерки региональной сеймотектоники. М.: ИФЗ РАН. 2012. 340 с.
- Рогожин Е.А., Имаев В.С., Смекалин О.П., Шварц Д.П.* Тектоническая позиция и геологические проявления Могодского землетрясения 5 января 1967 г. в центральной Монголии (взгляд сорок лет спустя) // *Физика Земли*. 2008. № 8. С. 3–16.
- Трифонов В.Г., Караханян А.С., Кожурин А.М.* Спитакское землетрясение как проявление современной тектонической активности // *Геотектоника*. 1990. № 6. С. 46–60.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 57 с.
- Флоренсов Н.А., Солоненко В.П.* Гоби-Алтайское землетрясение. М.: изд-во АН СССР. 1963. 391 с.
- Шебалин Н.В.* Сильные землетрясения. Избранные труды. М.: изд-во Академии горных наук. 1997. 542 с.
- Chen L., Ran Y., Wang H. et al.* Paleoseismology and kinematic characteristics of the Xiaoyudong rupture, a short but significant strange segment characterized by the May 12, 2008, Mw 7.9 earthquake in Sichuan, China // *Tectonophysics*. 2013. V. 584. P. 91–101.
- Chen Yong, Booth D.C.* The Wenchuan Earthquake of 2008. Anatomy of a disaster. Science Press. 2011. 276 p.
- Cisternas A., Dorel I., Gaulon R.* Model of the complex source of the El-Asnam earthquake // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1982. V. 72. № 6. P. 2245–2266.
- Dorbath C., Van der Woerd J., Arefiev S.S., Rogozhin E.E., Aptekman J.Y.* Geological and seismological field observations in the epicentral region of the 27 September 2003 Mw 7.2 Gornyy Altai Earthquake (Russia) // *BSSA*. 2008. V. 98. № 6. P. 2849–2865.

- Nissen E., Emmerson B., Funning G.J., Mistrukov A., Parsons B., Robinson D.P., Rogozhin E. and Wright T.J.* Combining InSAR and seismology to study the 2003 Siberian Altai earthquakes – dextral strike-slip and anticlockwise rotations in the northern India-Eurasia collision zone // *Geoph. Journ. Int.* 2007. V. 169. P. 216–232.
- Ovsiuchenko A.N., Rogozhin E.A., Marakhanov A.V., Butanaev Yu. V., Larkov A.S., and Novikov S.S.* Environmental effects of the 2011–2012 Tuva earthquakes (Russia): Application of ESI 2007 macroseismic scale in the Siberian mountains // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2017. V. 17. ES1002. 16 p. doi: 10.2205/2017ES000590
- Philip H., Meghraoui M.* Analyse structural et interpretation des deformations de surface du seismed'El-Asnam du 10.10.80. Reporte en bibliotheque du Centre National de Recherche et d'application des Geosciences. 1980. P. 66.
- Philip H., Rogozhin E., Cisternas A., Bousquet B., Borisov B., Karakhanian A.* The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and paleoseismicity // *Geophysical Journal International.* 1992. V. 110. P. 141–158.
- Ran Y., Chen L., Chen J. et al.* Paleoseismic evidence and repeat time of large earthquakes at three sites along the Longmenshan fault zone // *Tectonophysics.* 2010. V. 491. P. 141–153.
- Ran Y., Chen W., Xu X. et al.* Paleoseismic events and recurrence interval along the Beichuan–Yingxiu fault of Longmenshan fault zone, Yingxiu, Sichuan, China // *Tectonophysics.* 2013. V. 584. P. 81–90.
- Ran Y., Chen W., Xu X., Chen L., Wang H., and Li Y.* Late Quaternary paleo-seismic behavior and rupture segmentation of the Yingxiu-Beichuan fault along the Longmen Shan fault zone, China // *Tectonics.* 2014. V. 33. P. 2218–2232.
- Sun H., He H., Ikeda Y. et al.* Holocene paleoearthquake history on the Qingchuan fault in the northeastern segment of the Longmenshan Thrust Zone and its implications // *Tectonophysics.* 2015. V. 660. P. 92–106.

## **Evolution of Views on the Structure of Sources of Strong Earthquakes at the End of XX and Beginning of XXI Centuries**

**E. A. Rogozhin<sup>a,\*</sup>**

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: evrog@ifz.ru*

Received June 26, 2018

The paper addresses the evolution of scientific views on the structure of the sources of strong earthquakes at the end of the 20th and beginning of the 21st century in Russia. The scientific concepts that emerged in the main developed countries initially typically lacked a clear and consistent understanding of the structure of sources of the strongest seismic events. In the 1950s, at the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Sciences, G.A. Gamburtsev formulated a hypothesis of a long-term (a few hundred years) stability of seismic regime of a system of seismic sutures. The recently studied earthquakes have their sources in the regions of the large faults. The earthquakes of larger magnitudes have more extended and structurally more complex sources. Some sources in the considered cases are relatively simple to reconstruct (they encompass the fault planes of the large faults, e.g., the Spitak source,  $M=6.8$ ). Other sources are more complex; they are formed in the disjunctive nodes or encompass the crustal blocks. For example, the seismic source of the Altai earthquake ( $M=7.3$ ) has a volumetric structure and is developed along the boundaries of the large seismogenic blocks. The Wenchuan earthquake ( $M=7.9$ ) has a most complicated source which looks as a three-dimensional (3D) structure composed of a few crustal blocks framed by two extended northeast striking faults and separated by the northwesterly trending transverse fault. The structurally different sources differently manifest themselves in the pattern of seismic dislocations on the surface and in the distribution of aftershock hypocenters at depth. The anomalously low velocity “pockets” identified by local seismic tomography in the source areas of the Spitak and Altai earthquakes which accompany the main and secondary faults at depth are likely to be the zones of dynamic control of these faults. The broken near-fault zones abundant with cracks and fractures are the severely loose inclusions in the crustal rocks hampering the propagation of seismic waves. Therefore, the  $P$ -waves in these pockets propagate at lower velocities than in the undamaged geological medium. The paleoseismological studies of seismic faults in trenches have shown that the strong earthquakes have occurred in the same sources in the past and the recurrence period of the strongest seismic events ranges from a few hundred to a few thousand years. Thus, the combined studies of the source zones of the strongest earthquakes conducted in the past decades in the different regions of Eurasia have shown that Gamburtsev’s hypothesis has remained relevant.

*Keywords:* earthquake, source, seismic fault, magnitude, paleoseismology, period of recurrence, seismic regime, seismic tomography