

Представления о строении очагов сильных землетрясений

Е.А. РОГОЖИН,

доктор геолого-минералогических наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

В 1949–1955 гг. директором Геофизического института АН СССР (позже Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР) был академик Григорий Александрович Гамбурцев (Земля и Вселенная, 2003, № 2). Одна из областей его научных интересов – проблема оценки сейсмической опасности.

На этой основе им была сформулирована на-



учная гипотеза о постоянстве сейсмического режима определенной системы сейсмических швов за большой промежуток времени (в несколько сотен лет). Эти революционные представления позже, после его ухода из жизни, были в значительной мере забыты российскими сейсмологами и специалистами по сейсмоtectонике.

В отечественной сейсмоtectонике в 1970-х – 1980-х гг. сложились противоречивые представления о причастности сейсмических очагов к определенным геологическим структурам. Московская школа сейсмологов и сейсмогеологов, в которую входили сотрудники ИФЗ АН СССР член-корреспондент АН СССР

И.Е. Губин (в 1960–1985 гг.), профессор Н.В. Шебалин (в 1970–1989 гг.) связывали сейсмические проявления с плоскостями крупных, в основном вертикально проникающих в недра, разломов. Академик АН СССР В.И. Кейлис-Борок с соавторами (1973 г.) пришли к выводу, что эпицентры крупных землетрясений



Сейсморазрыв Эль-Аснамского землетрясения 1980 г. Вид с вертолета. Фото Э. Филиппа.

“садятся” в дизъюнктивные узлы разных рангов, то есть сейсмические очаги образованы двумя или несколькими пересекающимися разломами разного простирания. Профессор геологического факультета МГУ Г.П. Горшков (1984 г.) активно настаивал на объемной природе очага землетрясения – он может быть связан с самыми различными, в частности блоковыми структурами, при условии накопления в них напряжений.

Представителями иркутской школы сейсмогеологов во главе с членом-корреспондентом АН СССР В.П. Солоненко и членом-корреспондентом АН СССР Н.А. Флоренсовым после Гоби-Алтайс-

кого землетрясения 1957 г. магнитудой $M=8,1$ в Монголии была изучена его эпицентральной зона: при этом сейсмическом событии очаг вскрылся на поверхности в виде системы разрывов на земной поверхности общей протяженностью более 200 км вдоль известного геологического разлома Богдо в горной цепи Гобийского Алтая. Это сделало исследователей иркутской школы приверженцами идеи о сейсмическом очаге как о форме активизации глубинного разлома.

Представления о сравнительно простом устройстве сейсмических очагов были типичны в 1970-е гг. для американской сейсмо тектонической школы в связи с тем, что множество хорошо изученных в США землетрясений связано с зоной разлома Сан-Андреас, где сейсмические разрывы сильнейших землетрясений, как правило, имеют сдвиговый характер. Сложные по структуре очаги охватывают узлы пересечения или сочленения разломов разных ориентировок, проявившихся на поверхности в конфигурации сейсмических разрывов, возникших после Эль-Аснамского землетрясения 1980 г. в Алжире ($M=7,3$) и ряда сильнейших землетрясений прошлого в Монголии. Они описаны французскими и алжирскими сейсмо тектонистами¹.

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

¹ 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.

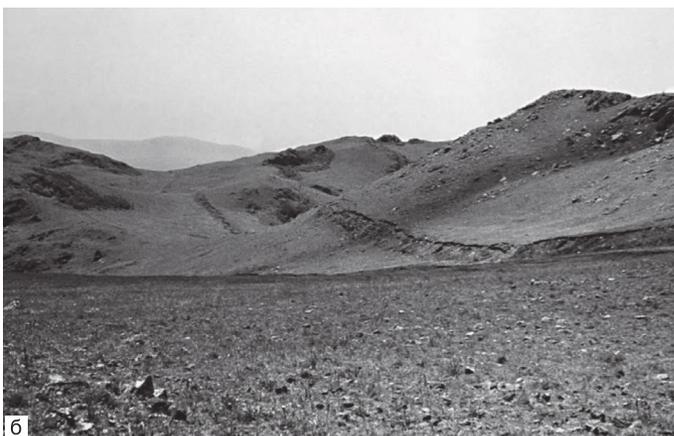
Deschamps A., Gaudemer Y., Cisternas A. The El-Asnam earthquake of October 10, 1980; multiple-source mechanism from long-period records // Bull. Seismol. Soc. Amer, 1982. V. 72. P. 1111–1128.

Philip H., Meghraoui M. Analyse structural et interpretation des deformations de surface du seismed'El-Asnam du 10.10.80 // In: Reporte en bibliotheque du Centre National de Recherche et d'application des Geosciences, 1980. P. 66.

Две ветви сейсморазрыва Мо-
годского землетрясения 5 ян-
варя 1967 г. с $M = 7,8$: А – глав-
ный меридиональный разрыв.
Максимальная амплитуда пра-
востороннего сдвига состав-
ляет 3,2 м; надвиговое смеще-
ние измеряется величиной в
0,5 м; Б – главный диагональ-
ный разрыв юго-восточного
простираения (правосторонний).
Максимальная амплитуда пра-
востороннего сдвига состав-
ляет 1,2 м; надвиговое смеще-
ние измеряется величиной в
2–3 м. Фото Р.А. Курушина.



В последние десятилетия
XX – начале XXI в., в связи с
использованием более со-
вершенной записывающей
аппаратуры в виде цифро-
вых полевых сейсмостан-
ций и новых методик ма-
тематической обработки
данных, сейсмологические
наблюдения стали более
детальными и надежными,
чем ранее. После сильных
землетрясений кроме сейс-
мологических стали про-
водиться разные другие геофизические
исследования (в том числе геодезиче-
ские работы – в частности, с примене-
нием методов GPS); лазерное скани-
рование местности, интерпретация пов-
торных космических съемок территорий
с применением метода InSAR (построен
на использовании спутниковой радар-
ной интерферометрии) и аэрофотосъём-
ка. С одной стороны, все эти источники
информации позволяют в комплексе,
своевременно и детально изучить про-
явления сейсмического процесса, уста-
новить параметры и конфигурацию оча-
га: в частности, с применением методов
локальной сейсмической томографии;
воссоздать периоды повторяемости



сильнейших землетрясений в голоцене
(эпоха четвертичного периода, длящаяся
последние 12 тыс. лет). С другой сторо-
ны, значительно улучшилась геолого-гео-
физическая изученность глубинных и
приповерхностных горизонтов земной
коры в сейсмоактивных регионах. Сис-
тематически стало проводиться геоло-
гическое обследование эпицентров силь-
ных землетрясений, включающее деталь-
ное картирование остаточных деформа-
ций грунта, выявление поверхностных и
глубинных сейсмогенных геологических
структур.

В конце XX и начале XXI веков прак-
тически во всех сейсмоактивных зонах
Северной Евразии (Западная Туркмения,

Кызылкумы, Тянь-Шань, Алтай, Саяны, Сахалин и Курило-Камчатская островная дуга) произошли сильные и сильнейшие землетрясения. Некоторые из них превзошли значение ожидаемой максимальной магнитуды. Практически все они были своевременно изучены. В результате изучения зон возникновения сильных сейсмических толчков стало очевидным, что выявленные на поверхности свежие деформации 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 (раздел сейсмоtectоники, посвященный изучению древних, доисторических землетрясений), популярных в последние десятилетия во всем мире. В этот период и в России были проведены палеосейсмогеологические исследования во многих регионах страны и в эпицентральных зонах сильнейших землетрясений.

В 1950–1960-е гг. в СССР были впервые разработаны основы палеосейсмогеологического метода В.П. Солоненко; они были применены для изучения следов древних, доисторических землетрясений, произошедших до эпохи инструментальных сейсмологических наблюдений (палеоземлетрясения) в Забайкалье и на Кавказе². Позже они получили широкое распространение во всех развитых странах. Палеоземлетрясения, так же как и современные сейсмические события с большими магнитудами, оставляли следы на поверхности земли – палеосейсмодислокации. Они бывают нескольких видов, но могут быть отнесены к двум большим группам – первичным или вторичным. Первичные, или сеймотектонические нарушения, представляют собой выход на поверхность земли

очагов землетрясений в виде разрывов. Вторичные, сейсмогравитационные и вибрационные дислокации, образуются в результате катастрофических явлений на склонах гор и разжижений грунта при воздействии сейсмических колебаний. К вторичным нарушениям поверхности относятся сейсмогенные оползни, обвалы горных масс, каменные, снежно-каменные и ледово-каменные лавины, осыпи, трещины, грифоны (выход подземных вод из водоносной породы в виде струи, поднимающейся выше поверхности земли или дна водоема) и грязевые вулканы. По данным об этих дислокациях можно составить представление о магнитуде и времени землетрясений в прошедшие эпохи. Их возраст определяется посредством радиоуглеродного, термолюминисцентного, археологического или других аналитических методов, а магнитуда – по длине первичных сейсморазрывов и амплитуде смещений элементов рельефа, а также по площади распространения вторичных дислокаций – обвалов, каменных лавин, структур разжижения грунтов и оползней. Полученные сведения о магнитуде и периоде повторяемости регистрируемых землетрясений, исторических сейсмических событий и палеоземлетрясений помогают оценить сейсмический режим на той или иной территории. Таким образом, палеосейсмогеология дает возможность восполнить недостаток статистических данных для регионов с умеренным уровнем современной сейсмической активности и на этой основе оценить их истинную сейсмическую опасность.

Обследование очаговых зон крупных землетрясений – работа коллективная, в ней участвуют специалисты разного профиля: сейсмологи, геологи, геофизики, геодезисты. Для изучения важнейших сейсмических событий на территории бывшего Советского Союза создавались комплексные экспедиции, в состав кото-

² Солоненко В.П. Палеосейсмогеология // Физика Земли. 1973. № 9. С. 3–16.



Сейсморазрыв Спитакского землетрясения. Смещение на поверхности: вертикальная амплитуда – до 1,5 м; горизонтальная, правосторонний сдвиг – 0,5–0,7 м. Фото автора.

рых входили как представители центральных профильных институтов АН СССР (главная роль в этих работах отводилась специалистам из ИФЗ АН СССР), так и сотрудники институтов национальных Академий наук тех союзных республик, на территории которых возникали эти землетрясения. В ряде случаев после начала “перестройки” для участия в экспедициях в их состав предлагалось войти ведущим иностранным специалистам из развитых стран Запада и Востока.

Примерами землетрясений, эпицентральные зоны которых были хорошо исследованы комплексными эпицентральными экспедициями, служат Газлийские (1976 и 1984 г.; Западный Узбекистан), Кумдагское (1983 г.), Бурунское (1984 г.; Западная Туркмения), Спитакское (1988 г.; Армения), Рачинское (1991 г.; Грузия) катастрофические сейсмические события. После распада СССР эта традиция некоторое время продолжала сохраняться.

Так, эпицентральные зоны Суусамырского (1992 г.; Кыргызстан) и Нефтегорского (1995 г.; о. Сахалин) сильнейших землетрясений были обследованы российскими учеными с привлечением киргизских специалистов – в первом случае, и японских – во втором.

В изучении Алтайского землетрясения (2003 г.), кроме представителей российских центральных и сибирских академических организаций, приняли участие также сотрудники Университета Страсбурга (Франция) и Кембриджского и Оксфордского университетов (Великобритания).

В последние годы для очаговых областей нескольких наиболее хорошо изученных землетрясений удалось разработать сейсмотомографические модели. Эти и другие собранные материалы позволяют применить обобщенный подход к сейсмотектонической интерпретации сейсмических очагов сильных событий, возникших в разных геодинамических обстановках.

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ
ПРОЯВЛЕНИЯ ОЧАГОВ
СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Начиная с 1980-х гг. в СССР (а начиная с 1991 г., в России) ряд исследователей (и в том числе автор статьи) участвуют

в выполнении программы изучения сейсмодислокаций в эпицентральных областях крупных землетрясений, которые происходили на этой территории. Так, сотрудниками ИФЗ РАН были проведены сейсмотектонические и палеосейсмологические исследования, вклю-

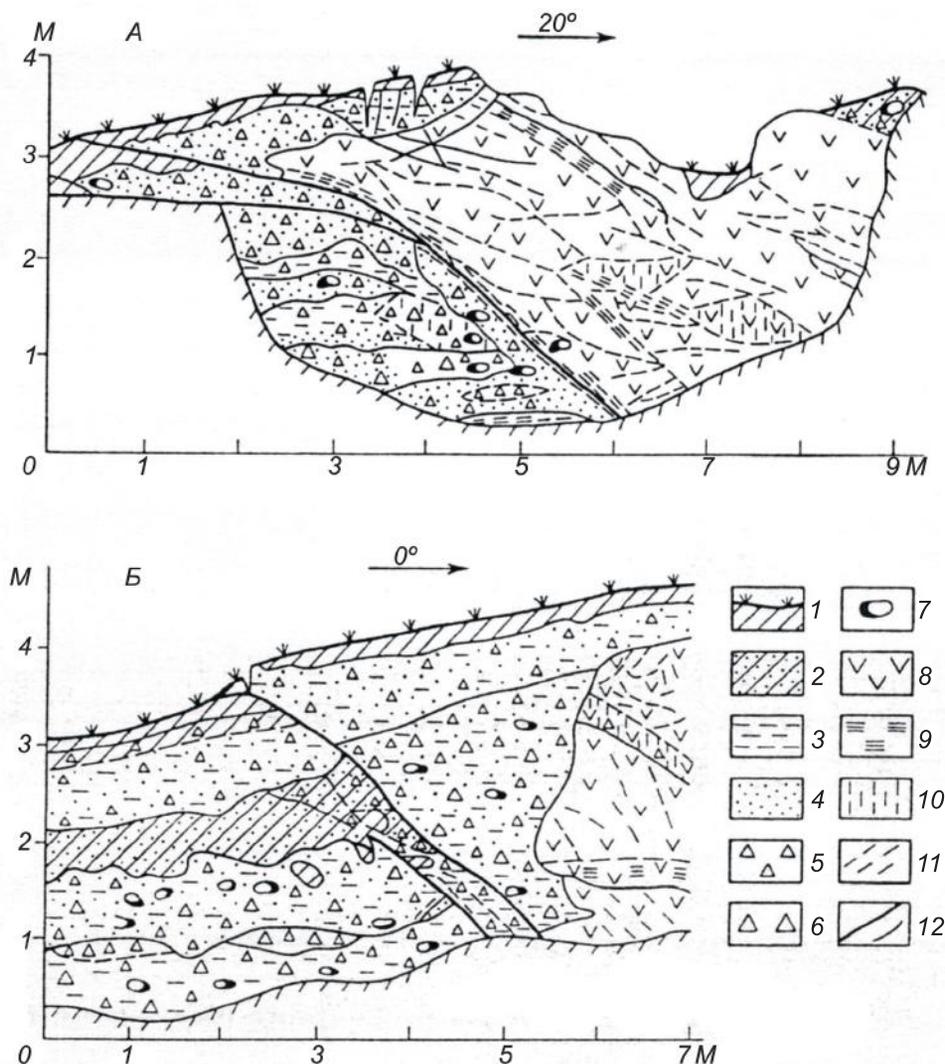


Схема строения сейсмогенного разрыва в траншеях близ г. Спитак (Армения): 1 – дерн и современная почва; 2 – древняя погребенная почва; 3 – суглинки; 4 – пески; 5 – дресва; 6 – щебни; 7 – гальки и мелкие валуны; 8 – вулканыты эоцена; 9 – зоны трещиноватости; 10 – зоны ожелезнения; 11 – крупные трещины; 12 – взбросо-сдвиги, возникшие при Спитакском землетрясении. Зарисовка автора.



Сейсморазрыв, возникший в результате Алтайского землетрясения. Фото автора.

чающие проходку траншей через сейсморазрывы и трещины, образовавшиеся в результате всех перечисленных выше землетрясений, а также Олюторского (Камчатский край, 2006 г.) и Тувинских (Республика Тува, 2011 и 2012 гг.) землетрясений. Все они возникли при разных тектонических обстоятельствах, а породившие их структуры, как выяснилось, имеют разную сейсмическую историю в голове.

Приведем наиболее показательные результаты изучения двух сильнейших сейсмических событий.

Спитакское землетрясение, произошедшее 7 декабря 1988 г. ($M=6,8$), было наиболее разрушительным 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 горы Спитак. Он был приурочен к зоне Алаварского активного разлома.

Особенности близ поверхностного строения сейсмогенного разрыва и характер контакта горных пород по нему были изучены в траншеях: в них наблюдалось различное строение “крыльев”. Северовосточное “крыло” поднялось при землетрясении на высоту 0,3–0,5 м. Оно ока-



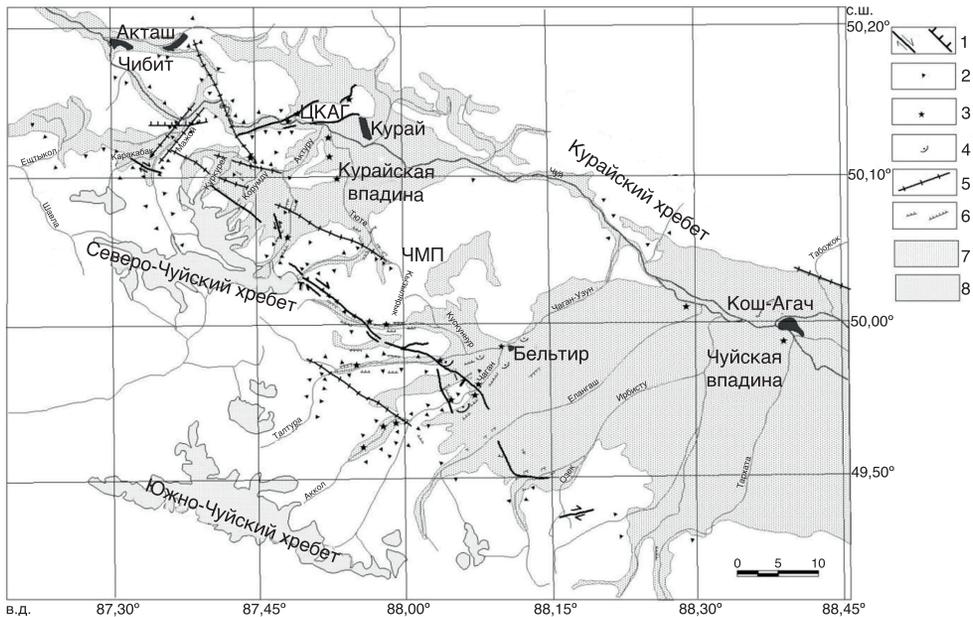
Правосторонний сдвиг, образовавшийся при Алтайском землетрясении. Фото А.Н. Овсяченко.

залось сложенным практически выходящими на поверхность древними вулканидами палеогена, а южное – опущенным мощной (до 9 м) толщиной молодых рыхлых отложений. Сейсмогенный разрыв погружается в недра в северо-восточном 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 траншеи 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.

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

ского 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, К. Дорбат и др.) разработать сейсмотомографическую модель очага в недрах.

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 горизон-



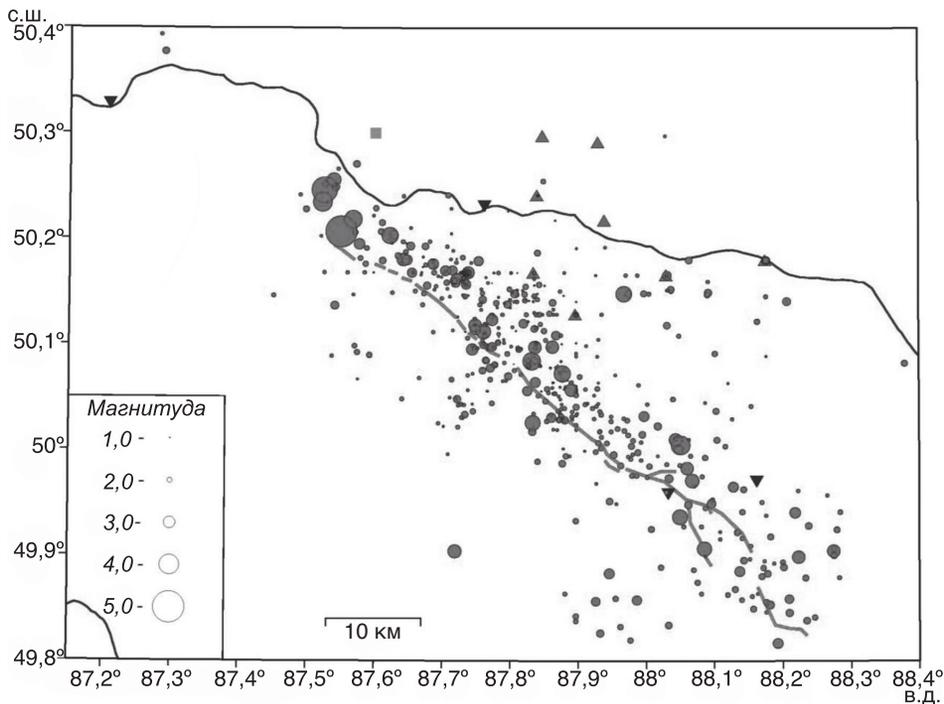
Карта распространения сейсмодислокаций: 1 – сеймотектонические разрывы (а – правые сдвиги, б – сбросы); 2 – обвалы и осыпи; 3 – разжижения грунта; 4 – оползни; 5 – сейсмогравитационные трещины отрыва и отседания склонов; 6 – трещины оседания склонов; 7 – разломы, обновленные в процессе резонансных колебаний; 8 – четвертичные озерные, речные и ледниковые отложения; 9 – крупнейшие современные ледники. ЦКАГ – Центрально-Курайская антиклинальная гряда, ЧМП – Чаган-Узунская перемычка между впадин. Материалы автора.

тов коры и местами наклонена к северу под углом примерно $60-70^\circ$, 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 сильнейшим 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 пострадали. 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. 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 сеймотектонические исследования по оценке сейсмического потенциала региона с помощью математического анализа комплекса геолого-геофизических и сейсмологических данных.

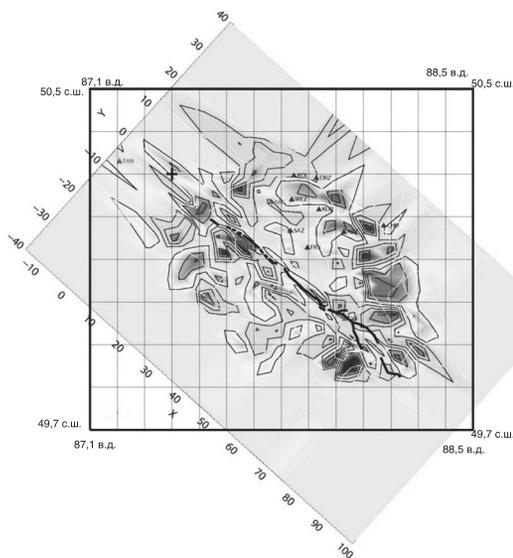
Геофизическая служба Сибирского отделения РАН постоянно совершенствовала сейсмическую сеть, и примерно за два года до землетрясения силами сейсмологов из Новосибирска были орга-



Карта эпицентров афтершоков Алтайского землетрясения, зарегистрированных временной сетью сейсмостанций ИФЗ РАН за полевые сезоны 2004 г. (темные кружки) и 2005 г. (светлые кружки). По данным ИФЗ РАН.

низованы наблюдения с использованием современной цифровой аппаратуры в непосредственной близости к очагу произошедшего в 2003 г. землетрясения. С помощью сети были продолжены наблюдения и после землетрясения: контролировалась 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 геоло-



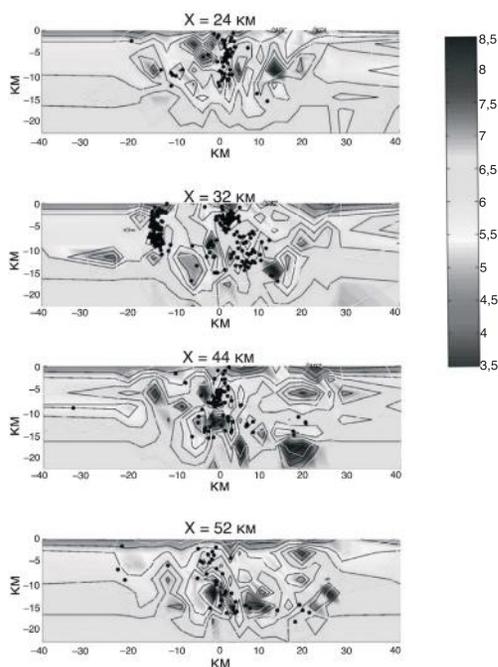
Карта распределения скоростей продольных сейсмических волн на глубине 3 км (темные оттенки – пониженные значения, светлые – относительно повышенные). Материалы автора.

Сейсмические томографические разрезы очаговой зоны Алтайского землетрясения (темные оттенки – пониженные значения, светлые – относительно повышенные, черными точками показаны гипоцентры афтершоков). Материалы автора.

гии 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.

Выяснено, что в ходе вспарывания земной коры очаг землетрясения вышел на поверхность в виде линейной, протяженной (более 70 км) цепи 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. Максимальная амплитуда горизонтального смещения составляет 1,5–2,0 м. На отдельных участках зафиксирована вертикальная компонента смещений величиной до 0,7 м. В зависимости от различий в строении зоны сейсморазрывов и характере 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, простирающегося по широте.

По результатам палеосейсмологических исследований, в траншеях, пересекающих сейсморазрывы на разных от-



резках, в течение последних 8500 лет произошло шесть землетрясений с магнитудой $M = 7,0 \pm 0,2$ (период повторяемости продолжался 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 цепи 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 поверхность. 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.

Согласно проведенному томографическому анализу сейсмологических материалов и геологическим данным, стабильные

блоки коры, окружающие очаговую зону с северо-востока и с юго-запада, характеризуются постепенным нарастанием с глубиной сейсмических скоростей. 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 близвертикально проникают в недра, до средних частей коры.

Итак, сейсмические очаги изученных землетрясений, как правило, размещаются в зонах крупных разломов. С нарастанием магнитуды землетрясения они становятся все более протяженными и сложными в структурном отношении. В рассмотренных случаях существуют сравнительно просто реконструируемые очаги, охватывающие плоскости крупных разломов (Спитакский очаг); или формирующийся в дизъюнктивном узле очаг. Он характеризуется объемной структурой, развит вдоль границ крупных сейсмогенных блоков (Алтайский очаг). Разные по строению очаги по-разному проявляют себя в структуре сейсмодислокаций на поверхности и в размещении гипоцентров афтершоков на глубине.

Аномально низкоскоростные полосы, выявленные с помощью метода локальной сейсмической томографии и соп-

ровождающие 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 уже 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.

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 десятков лет назад.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №18-05-00641).

Информация

Пылевая буря на Марсе

В период с 30 мая по 1 сентября 2018 г. на Марсе бушевала одна из крупнейших за последние 50 лет пылевых бурь, распространившаяся на значительную часть повер-

ности планеты (см. 3-ю стр. обложки, внизу). Марсоходу “Оппортьюнити” (“Opportunity”; Земля и Вселенная, 2004, № 1; 2004, № 3, с. 22–26), исследовавший в 2017–2018 гг. древнюю долину Персиверса на склоне кратера Индевор, пришлось перейти в “спящий” режим. Как сообщили специалисты NASA, последний се-

анс связи с марсоходом состоялся 10 июня 2018 г. «Мы не получали сигнал с марсохода на протяжении более двух месяцев», – отметил доктор Рэй Арвидсон (Университет Вашингтона в Сент-Луисе), – “из-за огромной пылевой бури, поэтому его солнечные батареи не получают достаточного количества энер-