

**РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ и ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ЗОНЫ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2011 и 2012 гг.**

Е.А. Рогожин^{1,2}, А.Н. Овсяченко¹, А.С. Ларьков¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ovs@ifz.ru,

²ФИЦ ЕГС РАН, eurog@ifz.ru

Аннотация. Приводятся сведения о тектонической позиции и проявлениях очагов Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. на поверхности. Землетрясения произошли в зоне Каа-Хемского глубинного разлома, относимого к крупнейшим концентраторам современных тектонических напряжений в Алтае-Саянском сейсмоактивном регионе. При обоих событиях очаг вышел на поверхность в виде системы сейсморазрывов. Необычной особенностью сейсморазрывов является их небольшая длина относительно магнитуды событий. Вдоль зоны Каа-Хемского разлома выявлены сегменты, демонстрирующие следы древних сейсмотектонических смещений, неоднократно повторявшихся по одним и тем же индивидуальным разрывам. Собранные данные о распределении первичных и вторичных сейсмодислокаций позволили составить суммарную карту изосейст высших баллов в ближней зоне обоих землетрясений.

Abstract. Data on the tectonic position and manifestations of the sources for 2011–2012 Tuva earthquakes on the surface are given. The earthquakes occurred in the area of the Kaa-Khem deep fault, which is referred to the largest concentrators of modern tectonic stresses in the Altai-Sayan seismic region. At both events the sources reached the surface in the form of a system of seismic faults. An unusual feature of seismic fractures is their small length relative to the magnitude of the events. Segments showing traces of ancient seismotectonic displacements, repeated several times on the same individual ruptures, were revealed along the zone of the Kaa-Khem fault. The collected data on the distribution of primary and secondary seismic dislocations made it possible to make a summary map of the highest isoseismal lines in the zone of both earthquakes.

Введение. Тувинское землетрясение 26 февраля 2012 г. с $MS=6.8$ произошло вслед за первым событием с $MS=6.6$, которое было зарегистрировано 27 декабря 2011 г., практически в той же эпицентральной зоне, примерно в 100 км восточнее г. Кызыл. Эти события были сильнейшими за весь период инструментальных наблюдений в Туве. Данные сейсмические события получили названия «Тувинское-I» и «Тувинское-II» соответственно.

Сейсмологические исследования по изучению очагов обоих землетрясений были начаты сразу после землетрясения 2011 г. сотрудниками Алтае-Саянского филиала ГС РАН [1, 2] и проводились в течение ряда лет.

Афтершоковые процессы этих двух землетрясений перекрывают друг друга в пространстве и времени, что указывает на единство тектонического процесса для них. Эпицентры и очаги обоих Тувинских землетрясений находятся в зоне Каа-Хемского разлома в хр. Академика Обручева (Западный Саян).

Событие 27.12.2011 г. произошло в зоне, где субмеридиональное простирание Каа-Хемского разлома дугообразно меняется на субширотное. Механизм главного события – правый сдвиг с подвижкой по субмеридиональной плоскости. После основного события развился мощный афтершоковый процесс с энергией самых мощных афтершоков до $ML=5.4$. Землетрясение с $ML=6.8$ произошло 26.02.2012 г. на фоне продолжения данного афтершокового процесса. Механизм этого землетрясения представляет собой взброс. Это землетрясение также сопровождалось интенсивной последовательностью повторных толчков с магнитудами до $ML=5.9$. Овальное в плане облако эпицентров афтершоков события 27.12.2012 г. простирается вдоль разлома около 10 км на юг и 2 км к северу от главного толчка. Эпицентр события 2012 г. располагался на южном окончании афтершоковой области первого Тувинского землетрясения.

Сейсмотектоническое обследование очаговых зон. В эпицентральной области обоих событий было оперативно организовано сейсмотектоническое обследование их проявлений на поверхности земли [3]. Полевые исследования проводились по двум основным направлениям – детальное картирование остаточных нарушений всех типов и изучение следов древних землетрясений в рельефе и молодых отложениях с использованием палеосейсмологических методов. Оба землетрясения породили как первичные сейсмотектонические разрывы, отражающие выход очага землетрясения на поверхность, так и вторичные нарушения, представляющие собой результат сейсмических сотрясений (рис. 1–3).

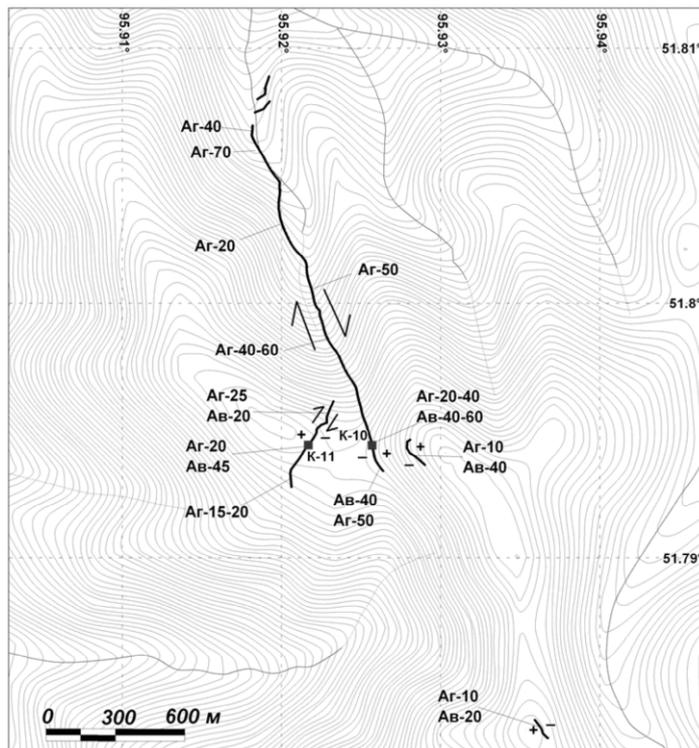


Рис. 1. Амплитуды смещения (*Ar* – горизонтальная, *Av* – вертикальная, см) по сейсморазрыву Тувинского-I землетрясения 27.12.2011 с $MS=6.6$. Знаками «+» обозначено приподнятое крыло сейсморазрыва, «-» – опущенное крыло

Квадраты – положение траншей К-10, К-11; горизонтали рельефа проведены через 10 м.

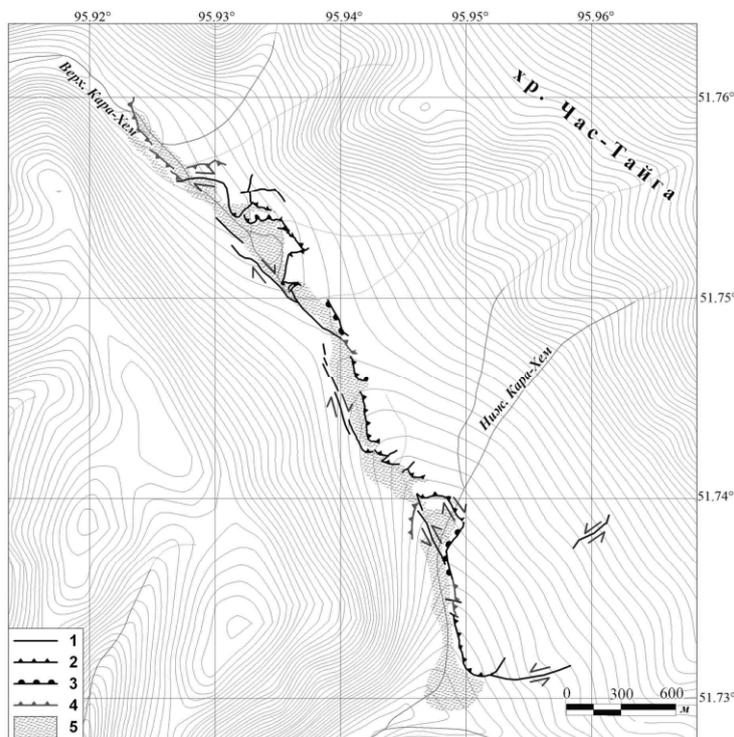


Рис. 2. Карта сейсморазрыва февральского землетрясения 26 февраля 2012 г. с $MS=6.8$

1 – сдвиги; 2 – взбросы и надвиги (бергштрихи направлены в сторону поднятого крыла); 3 – флексуры (бергштрихи направлены в сторону опущенного крыла); 4 – приразломные антиклинальные валы (бергштрихи направлены в сторону поднятого крыла сопутствующих взбросо-надвигов); 5 – опущенные участки, на которых произошло подтопление. Горизонталы рельефа проведены через 10 м.

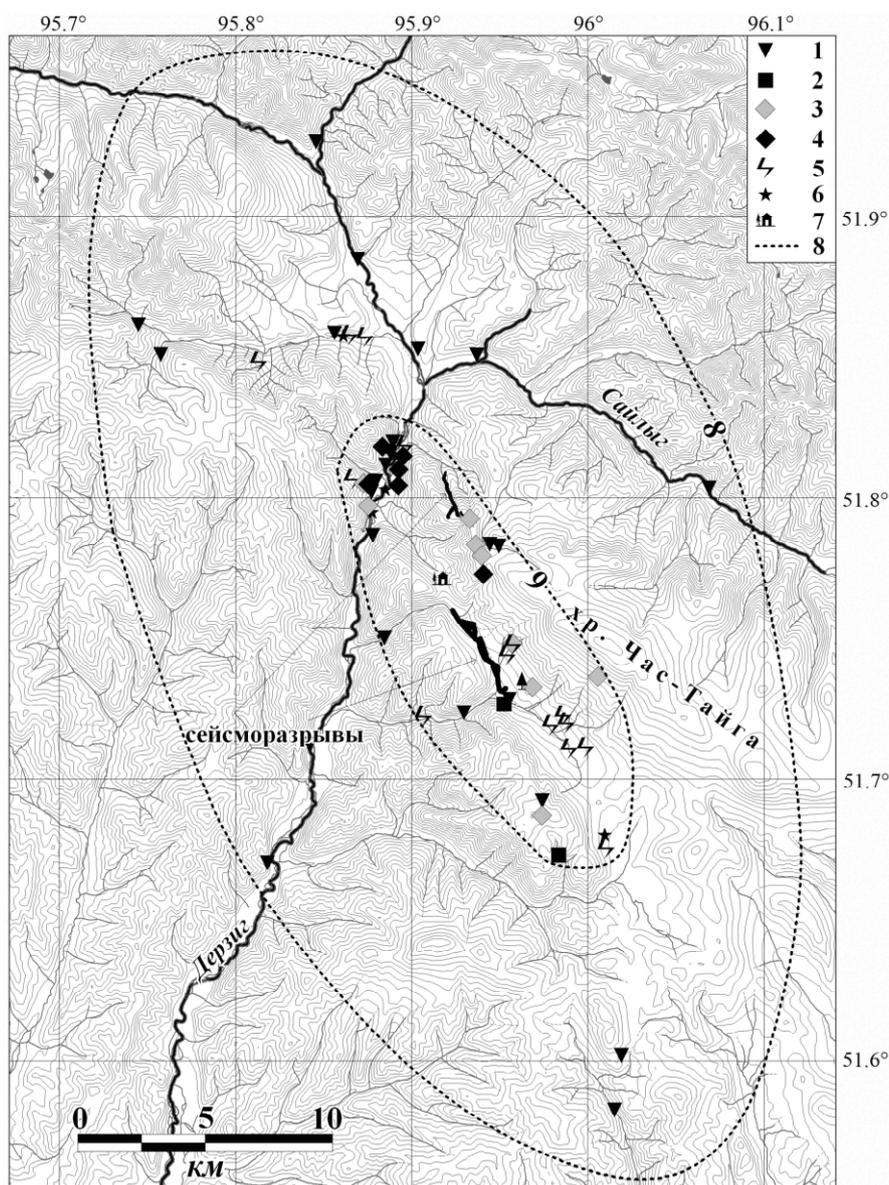


Рис. 3. Карта сейсмодислокаций и изосейст 8-го и 9-го баллов в ближней зоне Тувинских землетрясений [4]

1 – осыпи и камнепады; 2 – оползни; 3 – выбросы одиночных глыб; 4 – обвалы; 5 – сеймовибрационные трещины; 6 – выбросы песка; 7 – поврежденная изба; 8 – изосейсты высших баллов; горизонтали рельефа проведены через 50 м.

Сеймотектонические разрывы уверенно сопоставляются с проявлениями очагов обоих сейсмических событий на поверхности. Характер смещений по сейсморазрывам находится в соответствии с решениями механизмов, а их положение – с координатами эпицентров по данным Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН (рис. 4). При этом сейсморазрывы приурочены к разнообразным более древним морфоструктурам (валам-поднятиям, крутым бортам седловин-грабен, спрямленным долинам водотоков и др.) и разделяют участки с резко различными геоморфологическими условиями.

Сейсморазрыв первого Тувинского землетрясения 2011 г. имеет север–северо-западное простирание с правосдвиговой кинематикой смещений и общую длину около 2.5 км. Амплитуда горизонтального смещения составила от 20 до 70 см, а вертикального – от 10 до 60 см. Нарушения в основном представлены системой сопряженных коротких трещин растяжения и валов сжатия (см. рис. 1). В очаговой области были проведены палеосейсмологические исследования. В пройденных траншеях вкрест простирания зоны сейсморазрыва были обнаружены следы доисторических землетрясений, произошедших, согласно радиоуглеродным датировкам, около 500, 2000 и 3000 лет назад [4].

Первичные тектонические нарушения второго Тувинского землетрясения (2012 г.) имеют взбросо-сдвиговый тип подвижки, северо-западное простирание и общую длину около 3.8 км (см. рис. 2). Максимальная величина горизонтального сокращения по взбросо-надвигам достигла 1 м, величина правого сдвига – до 50 см, смещение в вертикальной плоскости – до 80 см. В пройденных вкрест простирания системы сейсморазрывов траншеях обнаружены следы сильных палеоземлетрясений, произошедших примерно 500 и 900 лет назад [5].

К разряду вторичных сейсмодислокаций относятся обвалы, осыпи, камнепады, трещины отседания на крутых склонах, редкие оползни склонового чехла и трещины с выбросами обводненного песка в поймах крупных рек. Собранные данные о распределении вторичных эффектов землетрясений позволили наметить в ближней зоне участки 8- и 9-балльных сотрясений в виде соответствующих изосейст, которые в силу слабой заселенности этой части Республики Тува традиционными макросейсмическими методами выявить было невозможно (см. рис. 3). В частности, в зоне девятибалльных воздействий удалось обнаружить лишь одно строение – маленькую охотничью избу. Руководством по оценке интенсивности сотрясений послужила шкала ESI (Environmental seismic intensity), разработанная в рамках одного из проектов INQUA [6, 7]. В шкале интенсивность определяется по параметрам сеймотектонических разрывов, размерам и общей площади распространения вторичных эффектов. В целом зона интенсивных поверхностных деформаций образует овальную область, вытянутую в север–северо-западном направлении, совпадающем с простиранием сейсморазрывов.

Сопоставление положения закартированных сейсморазрывов с сейсмологическими данными [2] показывает их хорошую сходимость (рис. 4).

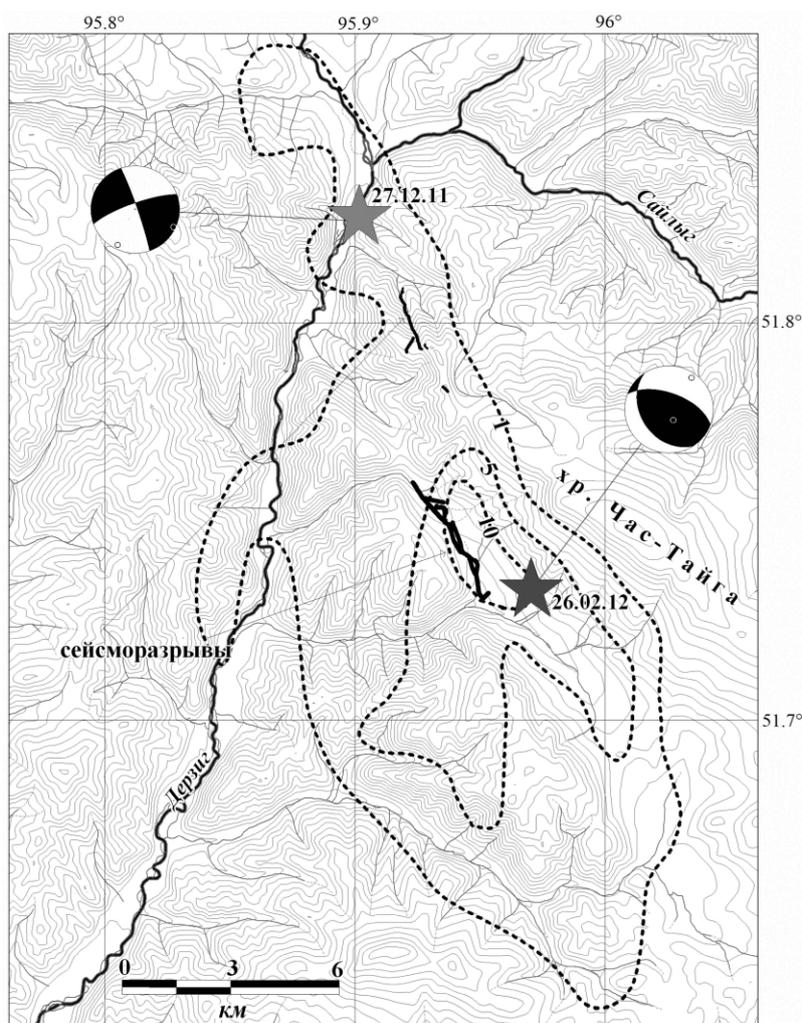


Рис. 4. Эпицентры землетрясений по данным Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН (показаны звездами) с изолиниями гущения эпицентров афтершоков в количестве толчков на 1 км^2 [2], механизмами очагов и положением сейсморазрывов (горизонталь рельефа проведены через 50 м)

Выводы. Самой необычной особенностью изученных сейсморазрывов является их аномально малая длина относительно магнитуды событий. Небольшая длина разрыва является отличительной чертой землетрясений в условиях сжатия. В отличие от сбросов и сдвигов, взбросо-надвиги не имеют протяженных флангов с небольшими смещениями; напротив, подвижка резко уменьшается и разрывы быстро сходят на нет. Другой характерной чертой взбросо-надвиговых сейсморазрывов является рассредоточение смещения в виде обширного растрескивания и пологого коробления земной поверхности, образования флексур и приразломных антиклинальных валов. Все эти особенности продемонстрировал сейсморазрыв второго, февральского землетрясения 2012 г. Сейсморазрыв первого землетрясения (2011 г.) продемонстрировал типичные черты сдвигового разрыва.

Еще одной особенностью обоих событий является формирование их очагов в короткое время и практически в одной и той же сеймотектонической структуре. Такие землетрясения, которые можно квалифицировать как высокомагнитудные сейсмические рои, имели место в разных сейсмоактивных регионах: при Газлийских землетрясениях 1976 г. [8] в Узбекистане и при недавних разрушительных толчках 2016–2017 гг. в центральной Италии [9].

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 17-45-170568).

Л и т е р а т у р а

1. **Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Гилёва Н.А., Массальский О.К.** Афтершоки Тувинского-I землетрясения 27 декабря 2012 г. с $ML=6.7$ и Тувинского-II – 26 февраля 2012 г. с $ML=6.8$ (Республика Тува) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 302–312.
2. **Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. и др.** Тувинские землетрясения 27.12.2011 г. с $M=6.6$ и 26.02.2012 г. с $M=6.7$. // Землетрясения России в 2011 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2013. – С. 88–93.
3. **Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Бутанаев Ю.В.** Геологические проявления Тувинского-I землетрясения 27 декабря 2011 г. с $MS=6.6$, $I_0=9$ (Республика Тува) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017 – С. 451–462.
4. **Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A., Marahanov A.V., Butanaev Yu.V., Lar'kov 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. – 17. – ES1002, DOI:10.2205/2017ES000590, 2017.
5. **Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Ларьков А.С.** Геологические проявления Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // ДАН. – 2015. – 463. – № 2. – С. 316–321.
6. **Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpınar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y., Rogozhin E.** Intensity scale ESI 2007 // Special paper APAT, Memorie descrittive della carta geologica d'Italia. – 2007. – 74. – 41 p.
7. **Рогожин Е.А.** О проекте новой макросейсмической шкалы ЕЕЕ // Землетрясения Северной Евразии в 2003 г. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 396–402.
8. **Ананьин И.В., Касымов С.М., Джураев А., Мадатов П., Абдурахманов С.А., Голинский Г.Л., Мурадов Ч., Рахимов А.Р., Иодко В.К., Краснова А.Ф.** Макросейсмические данные Газлийских землетрясений 8 апреля и 17 мая 1976 г. // Землетрясения в СССР в 1977 году. – М.: Наука, 1981. – С. 47–67.
9. **Рогожин Е.А.** Тектоническая позиция, геологические проявления очагов и афтершоковые процессы серии сильных землетрясений 2016–2017 гг. в Центральной Италии // Геотектоника. – 2017. – № 6. – С. 96–105. – DOI: 10.7868/S0016853X17060066.