*Геология и геофизика*, 2017, т. 58, № 11, с. 1784—1793

УДК 550.34

# О ПОВТОРЯЕМОСТИ СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЙОНЕ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2011—2012 гг. ПО ДАННЫМ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**А.Н. Овсюченко, Ю.В. Бутанаев*, А.В. Мараханов, А.С. Ларьков, С.С. Новиков, К.С. Кужугет***

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Россия*

* *Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 667010, Кызыл, ул. Интернациональная, д.117а, Россия*

Изложены результаты палеосейсмологических исследований в эпицентральной зоне двух Тувинских землетрясений 2011 г. ($M$ = 6.7) и 2012 г. ($M$ = 6.8) Получены представления об их сейсмотектонической позиции и сейсмической истории на протяжении последних тысячелетий. Важность полученных результатов обусловлена тем, что эти землетрясения являются сильнейшими за всю историю сейсмологических наблюдений в Туве и, таким образом, являются первыми хорошо изученными сильными землетрясениями этого региона. Полученные данные свидетельствуют о том, что относительно слабые события, подобные Тувинским 2011—2012 гг., за последнее тысячелетие повторялись раз в 300—500 лет, тогда как катастрофические землетрясения с $M$ = 7.0—7.2 и более, происходят примерно раз в тысячу лет.

*Землетрясение, активная тектоника, палеосейсмология, очаг, сейсмический режим, Тыва.*

## RECURRENCE OF STRONG SEISMIC EVENTS IN THE AREA OF THE 2011–2012 TUVA EARTHQUAKES ACCORDING TO PALEOSEISMOLOGICAL DATA

**A.N. Ovsyuchenko, Yu.V. Butanaev, A.V. Marakhanov, A.S. Lar'kov, S.S. Novikov, and K.S. Kuzhuget**

The paper presents the results of paleoseismological studies in the epicentral area of the Tuva earthquakes of 2011 ($M$ = 6.7) and 2012 ($M$ = 6.8). Their seismotectonic position and seismic history over the last millennia has been studied. The results are of great importance because these earthquakes are the strongest in the history of seismological observations in Tuva and are thus the first well-studied strong earthquakes in this region. The data show that relatively weak events similar to the 2011–2012 Tuva earthquakes recurred every 300–500 years in the past millennium, while catastrophic earthquakes with $M$ = 7.0–7.2 and higher occur approximately every thousand years.

*Earthquake, active tectonics, paleoseismology, seismic focus, seismic regime, Tuva*

## ВВЕДЕНИЕ

Толчок к детальным исследованиям сейсмической опасности дают сильные землетрясения современности, а именно — их сейсмотектоническая позиция и сейсмическая история на протяжении последних тысячелетий. Актуальность таких исследований в Республике Тыва наглядно продемонстрирована двумя сильными землетрясениями с $M$ = 6.7 и 6.8, произошедшими в Каахемском районе зимой 2011—2012 гг. [Еманов и др., 2014]. Важность исследований обусловлена тем, что эти события являются сильнейшими за всю историю сейсмологических наблюдений в Туве и, таким образом, являются первыми хорошо изученными сильными землетрясениями этого региона. В результате полевых работ были закартированы остаточные нарушения землетрясений 2011—2012 гг., установлено точное местоположение очагов этих событий, их пространственные характеристики и место в геологической структуре региона. Землетрясения породили сейсмотектонические разрывы, 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 в общих чертах наметить участки 8- и 9-балльных сотрясений [Овсюченко и др., 2014; Рогожин и др., 2015].

**© А.Н. Овсюченко✉, Ю.В. Бутанаев, А.В. Мараханов, А.С. Ларьков, С.С. Новиков, К.С. Кужугет, 2017**

✉e-mail: ovs@ifz.ru

**DOI: 10.15372/GiG20171112**

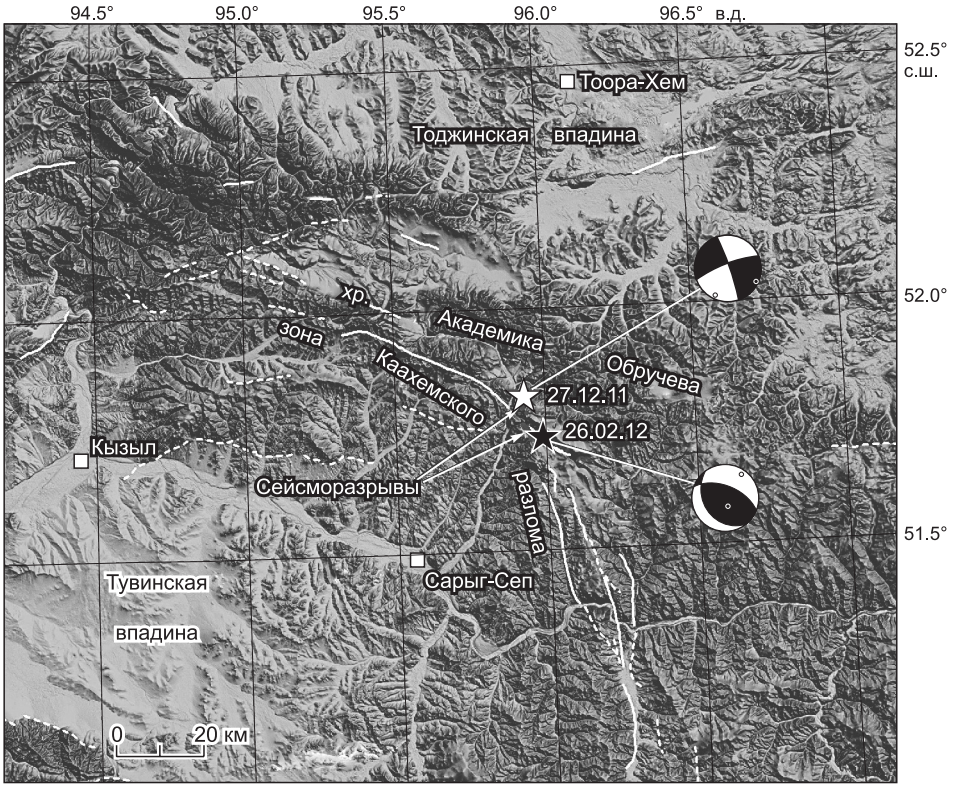


**Рис. 1. Положение сейсморазрывов землетрясений 2011—2012 гг. в Каахемской системе активных разломов.**

Белыми штриховыми линиями показаны предполагаемые активные разломы, сплошными — изученные на местности с использованием данных [Аржанников, Зеленков, 1995; Аржанников, 2000]. Показаны механизмы очагов землетрясений по данным ГС РАН (http://www.ceme.gsras.ru).

Землетрясения произошли в осевой части горной цепи, получившей название хр. Академика Обручева (рис. 1). Она возвышается над прилегающими межгорными впадинами — Тувинской и Тоджинской. На рассматриваемом отрезке, осевая часть горной цепи «нанизана» на зону Каахемского разлома и состоит из ряда узких хребтов с абсолютными высотами до 2500—2890 м, разделенных внутригорными впадинами и глубоко врезанными речными долинами. Каахемский разлом представляет собой крупнейшую зону смятия шириной 15—20 км, в пределах которой развиты сильнодеформированные и измененные породы палеозойского возраста, пронизанные многочисленными разрывами с разнообразной ориентировкой и кинематикой смещений. Зона разлома имеет сложнейшую геологическую историю, она играла структурообразующую роль на протяжении всех тектономагматических активизаций с конца докембрия [Геология…, 1966; Сугоракова, Бутанаев, 2014].

Возможность возникновения на хр. Академика Обручева сильных землетрясений была установлена относительно давно. Яркие проявления молодых (четвертичных) тектонических смещений по разломам в западной части хребта были выявлены при геологической съемке 200-тысячного масштаба в середине XX столетия [Чудинов, 1959]. Позже Г.А. Черновым [1978] в Восточной Туве была выделена сейсмогенерирующая структура, названная Каахемским сейсмогеном, частично совпадающая с одноименным разломом. По результатам палеосейсмогеологических исследований, проведенных в районе хр. Академика Обручева [Аржанников, Зеленков, 1995], сейсмический потенциал Каахемской зоны был оценен как $M$ = 6.6—7.0 [Хромовских и др., 1996; Аржанников, 1998]. Таким образом, сделанный по палеосейсмогеологическим данным долгосрочный прогноз оправдался при возникновении Тувинских землетрясений 2011—2012 гг.

За полвека инструментальных сейсмологических наблюдений хр. Академика Обручева в сейсмическом отношении проявил себя умеренно активным. В 1960—1980-х годах здесь неоднократно происходили землетрясения с умеренными магнитудами ($M$ = 4.0—5.5), но эпицентральная область землетрясений 2011—2012 гг. была практически асейсмична более чем 50 лет [Еманов и др., 2014]. Сейсмическое затишье было прервано в 2011 г. Вопрос о том, насколько долго оно продолжалось, можно решить лишь с помощью палеосейсмологического подхода.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для регионов с непродолжительным периодом инструментальных сейсмологических наблюдений, к каковым относится все Алтае-Саянское нагорье, единственным источником получения информации о сильнейших землетрясениях и их повторяемости остаются и будут оставаться палеосейсмогеологические данные [Флоренсов, 1960; Солоненко, 1962, 1973]. Это положение имеет фундаментальное значение в долговременном прогнозе сейсмических катастроф, так как по следам древних землетрясений возможно выявление очагов сильных землетрясений будущего. Палеосейсмогеологический подход основан на том, что сильнейшие землетрясения далекого, часто доисторического прошлого, оставляют на поверхности геологические следы — палеосейсмодислокации. Основная задача таких исследований сводится к выявлению и изучению всех возможных следов сейсмогенной активизации в молодых отложениях и формах рельефа — первичных сейсмотектонических разрывов, разжижений грунта, оползней, обвалов и т.п. [Палеосейсмология, 2011; Рогожин, 2012]. В районе очагов Тувинских землетрясений удалось детально исследовать древние сейсмотектонические разрывы. Для определения возраста следов палеоземлетрясений использован радиоуглеродный метод. Датирование погребенных палеопочв выполнено в лабораториях Института географии РАН и СПбГУ.

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ОЧАГОВ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Очаги землетрясений 2011—2012 гг. вышли на поверхность в виде сейсморазрывов секущих корни и стволы деревьев, камни, кустарниково-моховый покров и все формы рельефа на своем пути [Овсюченко и др., 2014]. Согласно решениям механизмов очагов [Овсюченко и др., 2016], подвижка при первом землетрясении имела преимущественно сдвиговую кинематику; при втором — преимущественно взбросовую с компонентой сдвига (см. рис. 1). При северо-западном простирании действующей плоскости смещений горизонтальный сдвиг был правосторонним; при северо-восточной ориентировке — левосторонним. Характер смещений по сейсморазрывам хорошо коррелирует с решениями механизмов, а их положение — с координатами эпицентров по инструментальным данным (с учетом ошибки), что позволяет уверенно соотнести сейсморазрывы с конкретными землетрясениями. Очаг первого землетрясения расположен в верховьях руч. Медвежий; второго — в верховьях ручьев Верхний и Нижний Кара-Хем (рис. 2). Сейсморазрывы представлены сложными системами нарушений, образующих зако-

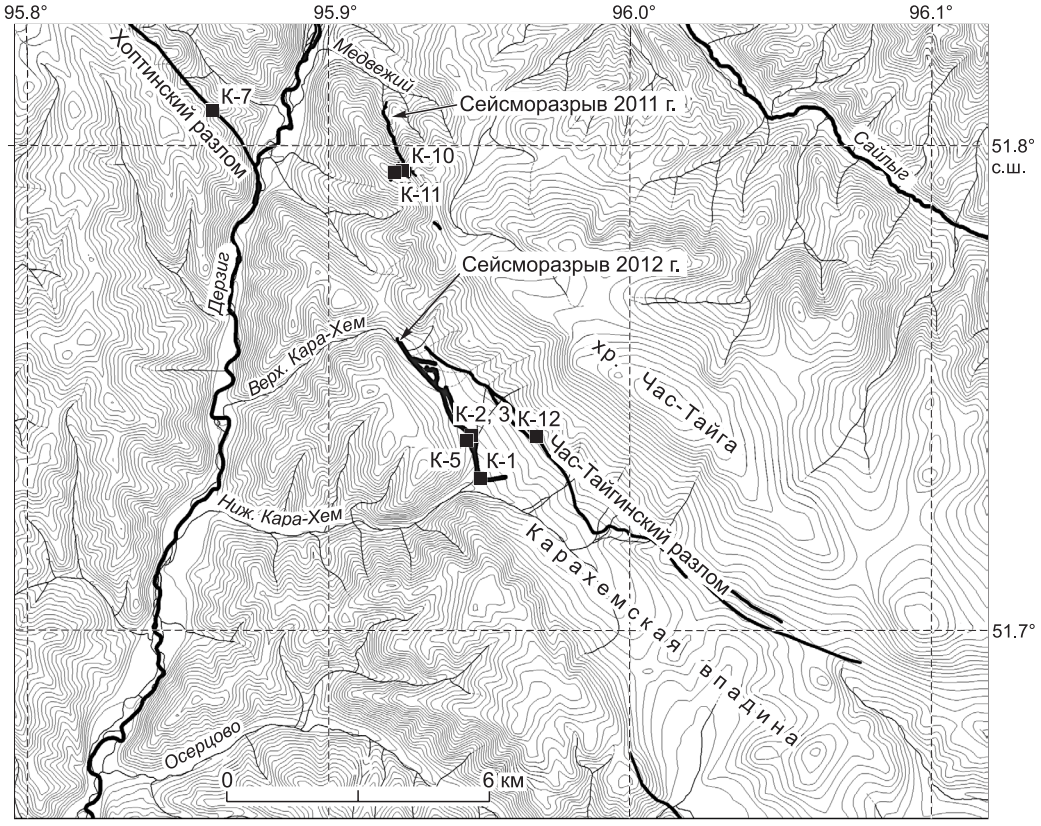


**Рис. 2. Изученные сегменты Каахемской системы активных разломов в районе очагов землетрясений 2011—2012 гг. с положением пройденных канав (квадраты).**

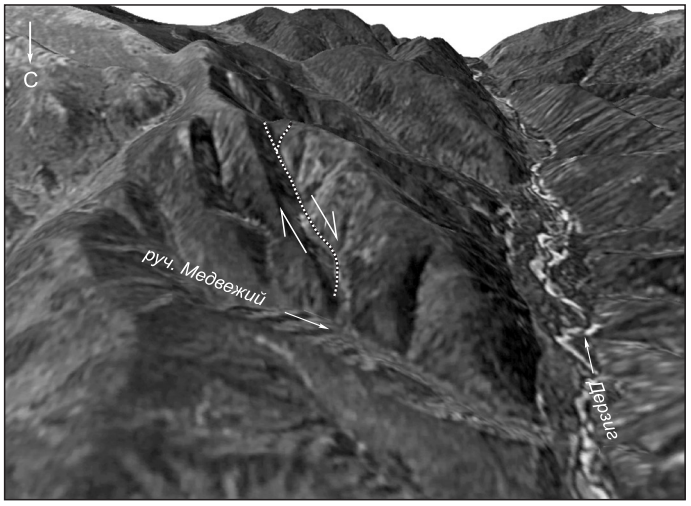


**Рис. 3. Трехмерная космокарта очаговой области 1-го Тувинского землетрясения на основе космоснимка с разрешением 15 м и цифровой модели рельефа SRTM.**

Сейсморазрыв 1-го землетрясения показан пунктирной линией.

номерные структурные парагенезы, что также свидетельствует об их тектонической природе.

Сейсморазрыв первого землетрясения имеет север-северо-западное простирание и правосдвиговую кинематику смещений на 50—60 см. Длина сейсморазрыва составляет примерно 1.6 км, а с учетом отдельных коротких разрывов, вписывающихся в общий структурный ансамбль, — 3.1 км. Нарушения представлены системой сопряженных коротких трещин растяжения и валов сжатия. На центральном отрезке сейсморазрыв вспорол днище долины ручья Медвежий, левого притока р. Дерзиг (рис. 3). На южном окончании системы сейсморазрывов расположены два сбрососдвига. Между ними заключена широкая и плоская, как футбольное поле, седловина, резко контрастирующая с окружающими чрезвычайно крутыми склонами. Седловина представляет собой зону растяжения на окончании сдвигового разрыва — впадину типа *pull-apart basin*, которая неоднократно испытывала тектонические опускания при таких же землетрясениях.

Сейсморазрыв второго землетрясения устроен гораздо сложнее. Он вытянут в северо-западном направлении вдоль осевой части Карахемской впадины, расположенной у юго-западного подножия хр. Час-Тайга (рис. 4). Здесь наблюдаются разрывы практически всех кинематических типов. Среди нарушений можно выделить три основные разновидности. Преобладают взбрососдвиговые разрывы. Менее распространены взбросонадвиги и сдвиги, среди которых доминируют правосторонние, хотя на отдельных участках обнаружены и левосторонние. Системы разрывов связаны друг с другом постепенными переходами, в целом образуя закономерный взбрососдвиговый структурный ансамбль общей длиной немногим менее 4 км. Максимальная величина горизонтального сокращения по разрыву достигла 1 м, смещение в вертикальной плоскости — до 80 см, величина правого сдвига — до 50 см. В целом поднятым оказалось северо-восточное крыло разрыва, в котором расположен хр. Час-Тайга.

## ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ РАЗВИТИЯ МОРФОСТРУКТУР В ОКРУЖЕНИИ ОЧАГОВ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейсморазрывы возникли на ограничениях мелких морфоструктур — валов-поднятий в днище Карахемской впадины, грабена-седловины в верховьях руч. Медвежий, спрямленной долине ручья, т.е. разделяют участки с резко различными геоморфологическими условиями. Смещения по разрывам отразили тенденции развития морфоструктур, прослеживаемые на протяжении среднего плейстоцена-голоцена. К ним в первую очередь относятся — сокращение поверхности Карахемской впадины в результате сжатия в зоне Каахемского разлома и локальное опускание грабена-седловины в верховьях руч. Медвежий. В долине руч. Медвежий сейсморазрыв 2011 г. на всем протяжении четко следует вдоль контакта девонских гранитоидов, слагающих восточное крыло и среднепалеозойских вулканитов сайлыгской свиты, залегающих в западном крыле. Из этого следует, что сейсморазрыв обновил зону древнего разлома.

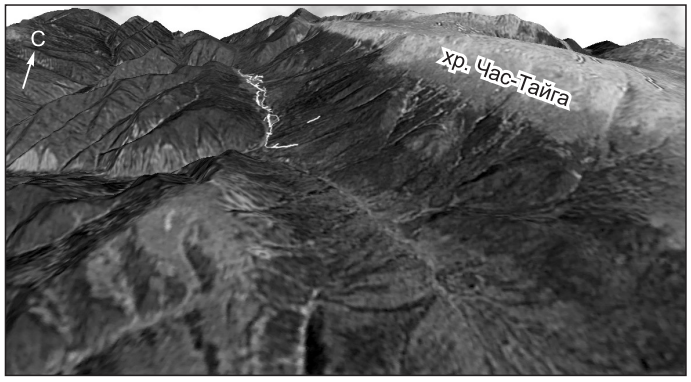


**Рис. 4. Трехмерная космокарта очаговой области 2-го Тувинского землетрясения на основе космоснимка с разрешением 15 м и цифровой модели рельефа SRTM.**

Сейсморазрыв 2-го землетрясения показан белыми линиями.

Карахемская впадина, в которой возникло 2-е землетрясение, вытянута вдоль зоны Каахемского разлома, по которой граничат разновозрастные магматические породы — девонские гранитоиды хр. Час-Тайга и кембрийские гранодиориты, залегающие в западном крыле. Зона разлома имеет ширину 1—2 км, т.е. занимает почти все днище впадины. Ширина Карахемской впадины сужается с 2.5—3.0 до 0.5—1.0 км в северо-западном направлении. Сейсморазрыв 2012 г. расположен в северо-западной, самой узкой половине впадины (см. рис. 2, 4). Она выполнена пролювиально-склоновым обломочным шлейфом мощностью в первые десятки метров, поступившим с растущего хр. Час-Тайга. Отложения шлейфа перекрывают ледниковые валунные суглинки, которые кое-где обнажены во врезе руч. Верх. Кара-Хем. По всей видимости, впадина имеет ледниковое происхождение и выработана крупным долинным ледником в зоне разлома. Рассматриваемые ледниковые отложения были известны и ранее [Карта…, 1988]. Они отнесены к Чуйскому оледенению среднего плейстоцена возрастом 110—130 тыс. лет [Прудников, 2005]. Предположив, что впадина изначально имела примерно одинаковую ширину (2.5—3.0 км), можно рассчитать скорость горизонтального сокращения ее поверхности (до 0.5—1.0 км на отрезке с сейсморазрывом 2012 г.) за время, прошедшее после Чуйского оледенения, т.е. в позднем плейстоцен-голоцене. Полученная оценка — 1.1—2.2 мм/год — представляется относительно большой, свидетельствуя о высокой активности и скорости тектонических деформаций по Каахемскому разлому.

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ОЧАГОВ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты палеосейсмологических исследований показали, что в прошлом здесь происходили такие же и более сильные землетрясения.

Вдоль сейсморазрыва, вскрывшегося при втором землетрясении, в специально пройденных канавах обнаружены следы предыдущих сейсмотектонических подвижек (рис. 5). Наиболее информативна канава К-1 (рис. 6). В месте проходки канавы К-1, взбросовый разрыв 2012 г. наращивает более древний уступ высотой 1.5—1.8 м. В северном направлении свежий взбросовый уступ постепенно сменяется валом, шириной около 5 м, подросшим при землетрясении на 50—80 см. Вал захватывает некогда заболоченный участок поймы ручья, который в результате подвижки оказался приподнятым, а болотная растительность начала отмирать. По разрыву лежачее бревно разломалось на три части и было затянуто под висячее крыло на 30—50 см. Вертикальная компонента смещения — около 60 см. Горизонтальное сокращение дернового горизонта почвы по разрыву достигает 90—95 см. Ниже залегают гранитные глыбы и щебень со следами грубой окатанности.

В поднятом крыле современного разрыва наблюдается более древний, сместивший кровлю песчаного слоя в нижней части вскрытого разреза. В опущенном крыле этого разрыва наблюдается сдваивание древнего почвенного профиля. В нем выделяются два почвенных горизонта — нижний, черный торф с растительными остатками (калиброванный радиоуглеродный возраст — 903—983 года, обр. ИГАН 4520) и верхний, серовато-коричневый гумусовый (калиброванный радиоуглеродный возраст — 592—638 лет, обр. ИГАН 4481). Калиброванный радиоуглеродный возраст современного гумусового горизонта — 492—555 лет (обр. ИГАН 4521). Этот горизонт вовлечен только в самую молодую деформацию разрывом 2012 г. Два нижних почвенных горизонта вовлечены в деформацию в разной степени. Если на черный торф (возраст 903—983 года) надвинуты склоновые грубообломочные отложения, то более молодой серовато-коричневый гумусовый горизонт (возраст 592—638 лет) вовлечен лишь в синклинальное смятие в опущенном крыле разрыва. Таким образом, интервал 983—638 лет назад дает нам возраст сейсмотектонической подвижки по древнему разрыву. Более молодая (предпоследняя) подвижка, по всей видимости, привела к синклинальному смятию серовато-коричневого гумусового горизонта (возраст 592—638 лет). В то же время современный гумусовый горизонт (возраст 492—555 лет) не претерпел деформаций при этом событии, что дает возраст предпоследней

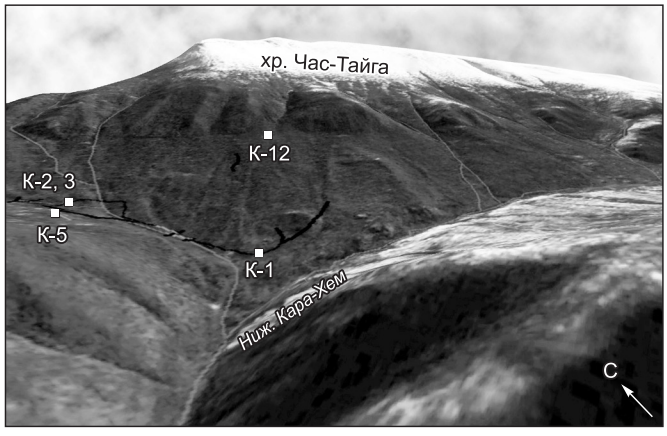


**Рис. 5. Трехмерная космокарта южного участка очаговой области 2-го Тувинского землетрясения в районе проходки канав К-1, К-12 (квадраты) на основе космоснимка с разрешением 2 м и цифровой модели рельефа SRTM.**

Сейсморазрыв 2-го землетрясения показан черными линиями.

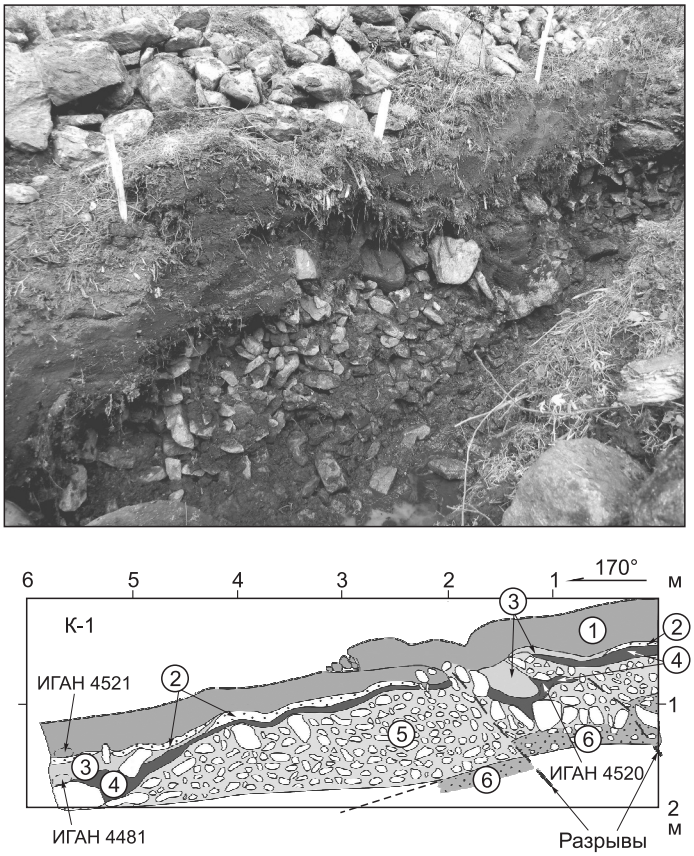


**Рис. 6. Зарисовка и фото канавы, пройденной вкрест простирания сейсморазрыва землетрясения 2012 г. (К-1).**

1 — черный дерново-торфянистый горизонт, 2 — переотложенный аркозовый песок, 3 — серовато-коричневый гумусовый горизонт палеопочвы, 4 — черный торф с растительными остатками, 5 — грубоокатанные глыбы, щебень с песчаным заполнителем и следами мерзлотной сортировки, 6 — песок, гравий, дресва, щебень, глыбы (пролювиально-склоновые отложения). Калиброванный возраст: ИГАН 4520—903—983 года, ИГАН 4481—592—638 лет, ИГАН 4521—492—555 лет.

сейсмотектонической подвижки — 638—492 года назад.

Таким образом, в канаве К-1 получены датировки двух предыдущих подвижек, произошедших за последние 900 лет, примерно 800—700 и 600—500 лет назад. По своим параметрам они были практически аналогичны современной. Можно полагать, что были схожи и параметры землетрясений — магнитуда ($M$ = 6.8) и интенсивность сотрясений в эпицентре (9 баллов).

В очаге землетрясения 2011 г. также выявлены следы древних сейсмических активизаций, сохранившиеся в рельефе и молодых отложениях. С этой целью были пройдены канавы на ограничениях впадины типа *pull-apart basin*, представляющей собой зону растяжения на окончании сдвигового разрыва в верховьях руч. Медвежий (рис. 7). Наиболее информативна канава К-11 (рис. 8). Она пройдена вкрест простирания двухступенчатого уступа в западном борту впадины. Вскрытый разрез представлен двумя слоями грубообломочных склоновых отложений. В основании обеих ступеней уступа наблюдаются молодые разрывы 2011 г. В верхней части разреза они представлены открытыми трещинами шириной до 20 см, заполненными ссыпавшейся туда почвой и обломками. Разрыв в основании верхней ступени образовался в 2011 г., так как величина вертикального смещения современной подзолистой почвы идентична смещению границы в склоновых отложениях. В опущенном крыле нижнего разрыва вскрыты две линзы палеопочвы, погребенных обломками из склоновых отложений. Толщина обломочных слоев по 20—30 см. Залегание палеопочвы свидетельствует о резком захоронении обломочным материалом в результате сейсмотектонических подвижек. Нижняя палеопочва представлена остатками торфянистого дерна с углями (калиброванный радиоуглеродный возраст — 2960—3220 лет, обр. ЛУ-7425); верхняя — гумусовым горизонтом черной лесной палеопочвы с углями (калиброванный радиоуглеродный возраст — 1880—1960 лет, обр. ЛУ-7424). Еще одна тонкая линза обломочно-

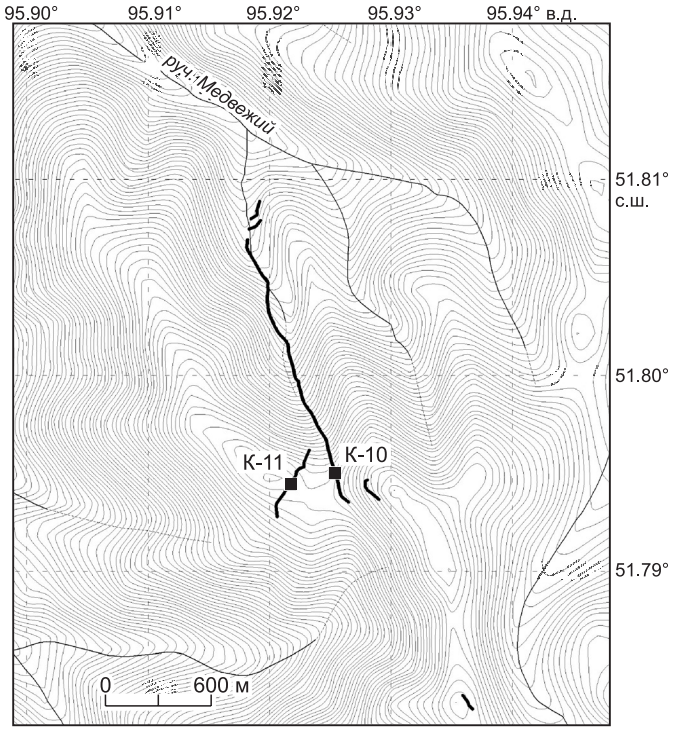


**Рис. 7. Карта сейсморазрыва 1-го Тувинского землетрясения (черные линии) с положением пройденных канав (квадраты).**

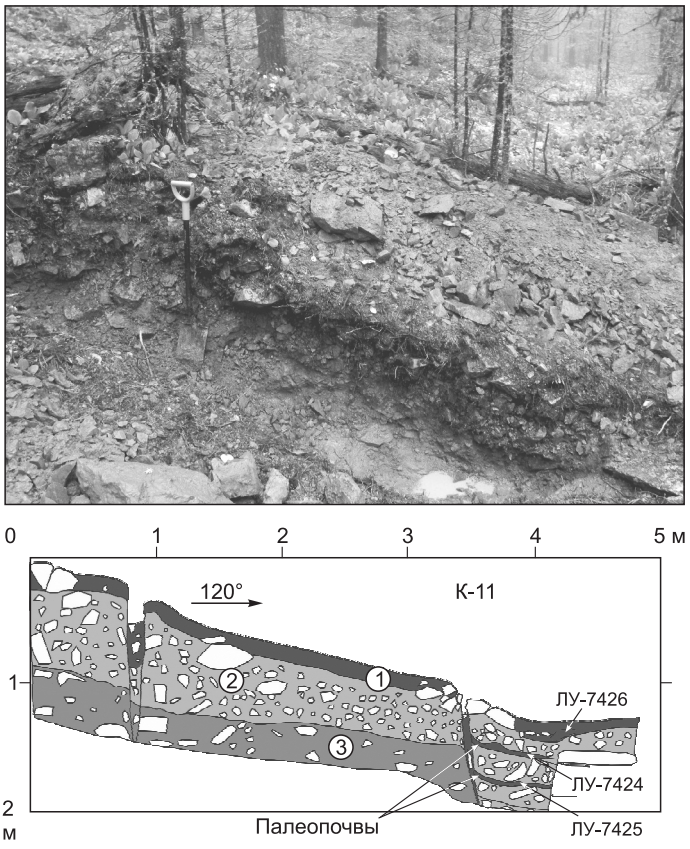


**Рис. 8. Зарисовка и фото канавы, пройденной вкрест простирания сейсморазрыва землетрясения 2011 г. (К-11).**

1 — подзолистая почва, 2 — грубообломочный слой с буровато-коричневым супесчаным заполнителем, 3 — щебень и редкие глыбы с серовато-коричневым суглинистым заполнителем. Калиброванный возраст образцов: ЛУ-7425 — 2960—3220 лет (остатки торфа с углями); ЛУ-7424 — 1880—1960 лет (гумусовый горизонт черной лесной палеопочвы с углями); ЛУ-7426 — 360—600 лет (гумусовый горизонт, залегающий под обломками).

го материала наблюдается в современном почвенном профиле. Ниже него залегает гумусовый горизонт (калиброванный радиоуглеродный возраст — 360—600 лет, обр. ЛУ-7426). Судя по залеганию в разрезе, датировки палеопочв отражают их возраст до захоронения обломочными материалом, т. е. представляют собой нижнее возрастное ограничение более ранней подвижки и верхнее — для более поздней. По этим данным можно очень грубо оценить возраст трех подвижек — 3000—3500, 1500—1900 и 300—500 лет назад.

Самое молодое событие (300—500 лет назад) имеет и другие следы в пределах сдвигового разрыва 2011 г., в долине руч. Медвежий. В приустьевой части долины, у русла ручья, в 10 м от сейсморазрыва 2011 г. обнаружен заросший и заваленный старыми стволами ров запад-северо-западного простирания. Вдоль этого рва ствол старого, полусгнившего кедра разорван и смещен вправо на 40 см. Судя по растительному покрову, смещение ствола произошло синхронно с образованием рва первые сотни лет назад. Таким образом, по силе предпоследнее событие было сходно с землетрясением 2011 г. ($M$ = 6.7). Два предыдущих события (3000—3500 и 1500—1900 лет назад), судя по толщине обломочных линз, захоронивших палеопочвы в К-11, были сильнее. Однако величина вертикального смещения по сбросу на окончании сдвига, прямо не отражает общую величину подвижки. Это затрудняет оценить магнитуду двух предыдущих палеоземлетрясений.

## СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПОДВИЖКИ ПО ДРУГИМ СЕГМЕНТАМ КААХЕМСКОЙ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ В ОКРУЖЕНИИ ОЧАГОВ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2011—2012 гг.

Сейсморазрыв землетрясения 2012 г. вытянут вдоль осевой части Карахемской впадины, расположенной у юго-западного подножия хр. Час-Тайга. Северо-восточный борт впадины обрезан молодым тектоническим уступом (Час-Тайгинский разлом), вдоль которого хр. Час-Тайга взброшен на впадину (см. рис. 4). Противоположный борт впадины имеет более плавный переход в крутые склоны плоского водораздела, покрытые маломощным грубообломочным чехлом и густой тайгой. Полученные оценки скорости позднеплейстоцен-голоценового горизонтального сокращения поверхности впадины (1.1—2.2 мм/год) отражают смещения не только по разлому в осевой части впадины (где вскрылся сейсморазрыв 2012 г.), но и по Час-Тайгинскому разлому.

В зоне Час-Тайгинского разлома прослеживается уступ, следующий вдоль южного подножия хр. Час-Тайга на протяжении 12.5 км. Он пересекает конусы выноса и террасы ручьев, где высота уступа достигает 2 м при крутизне до 70°. У основания уступа часто наблюдаются родники. В поймах ручьев уступ не прослеживается. Плановая морфология уступа (отступание вверх по течению в долинах ручьев и плавные изгибы вниз по склону на водоразделах) свидетельствует о падении сместителя под хр. Час-Тайга, в северо-восточном направлении, т.е. о взбросовой кинематике этого дизъюнктива.

Вкрест простирания уступа пройдена канава К-12 (рис. 9). В месте проходки канавы уступ высотой около 4 м отсекает конус выноса ручья от крутого склона хребта. В канаве вскрыт хорошо стратифицированный разрез склоновых отложений. В основании уступа он нарушен открытым разрывом, за-

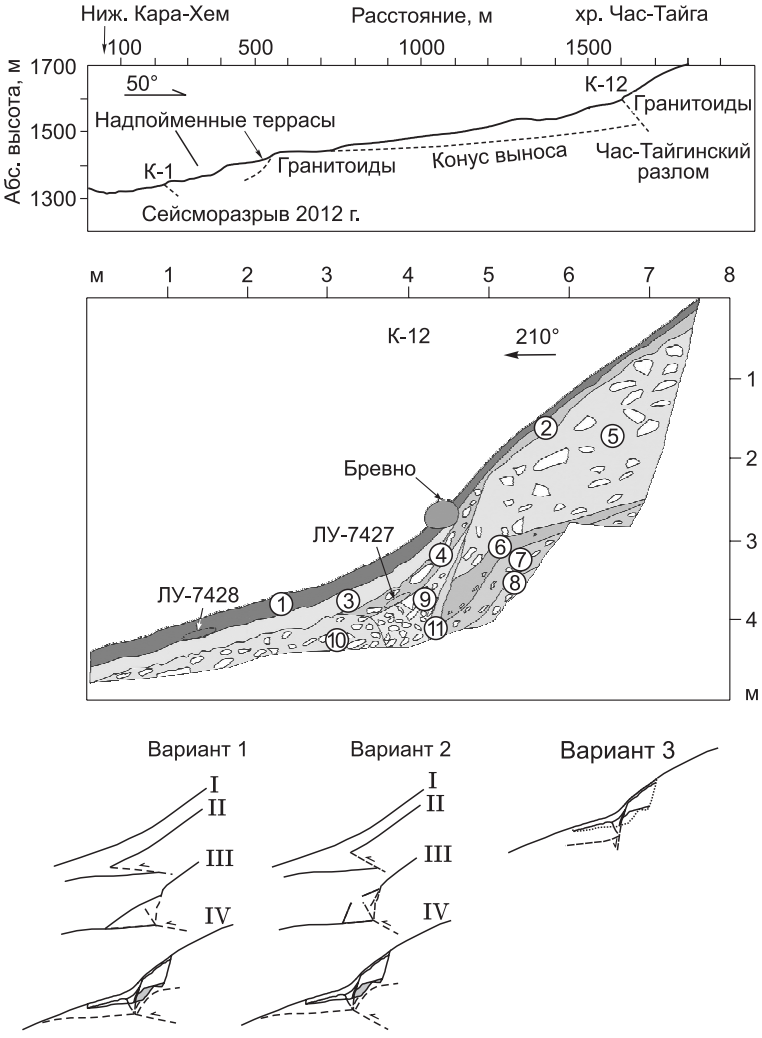


**Рис. 9. Геолого-геоморфологический профиль Карахемской впадины, в которой произошло землетрясение 2012 г., зарисовка канавы К-12 в зоне Час-Тайгинского разлома и варианты палеореконструкции подвижки.**

1 — дерн, 2 — оподзоленные пылеватые суглинки, 3 — подзол, 4 — оподзоленные пылеватые суглинки с обломками (нижний горизонт зрелого почвенного профиля), 5 — щебень, глыбы с супесью и песком (склоновые отложения), 6 — бурая, слоистая дресва со следами сортировки, 7 — сцементированная, темно-бурая дресва с щебнем, 8 — темно-серая супесь с плохоокатанными обломками, 9 — коллювий, обломки без следов сортировки, 10 — горизонт, схожий с горизонтом 5, со следами мерзлотной сортировки, 11 — разрыв, заполненный песком, у забоя канавы с водопритоком. Калиброванный возраст: ЛУ-7427 — 540—660 лет; ЛУ-7428 — 480—680 лет.

полненным песком. В верхней части разреза разрыв имеет юго-западное падение. У забоя канавы разрыв выкручивается, становится вертикальным и принимает крутое падение под уступ, в северо-восточном направлении. У подножия уступа наблюдается зрелый профиль подзолистой почвы (калиброванный радиоуглеродный возраст нижнего горизонта профиля — 540—660 лет, обр. ЛУ-7427, основания гумусового горизонта — 480—680 лет, обр. ЛУ-7428), в поднятом крыле разрыва сменяющийся тонким дерновым горизонтом, который подстилается оподзоленными суглинками. Участок развития зрелого почвенного профиля ограничен основным разрывом и встречным сбросом, которые совместно образуют структуру растяжения — ров, в который провалились почва и обломочный материал. При этом почва не была погребена коллювием, что должно было случиться при образовании вертикального сейсмотектонического эскарпа. Обломочный материал, залегающий под почвой у подножия уступа, по размерности, степени окатанности, сортировке обломков и составу заполнителя соответствует слою склоновых отложений, вскрытых на склоне уступа и его бровке. Он не имеет следов гравитационного осыпания с новообразованного эскарпа, в то же время, имея признаки активной мерзлотной переработки (десерпция), что может свидетельствовать о его неполной дезинтеграции в прошлом. Канава вскрыла лишь верхнюю часть всей структуры. Для ее более полной реконструкции можно предложить несколько вариантов, наиболее вероятными из которых представляются – взброс, надвиг, сброс. При взбросонадвиговом варианте можно полагать, что обломочная масса, слагающая основание уступа, рухнула в виде козырька целиком в основание новообразованного эскарпа. В результате отрыва козырька образовалась открытая трещина — ров. Учитывая морфологию уступа, этот вариант представляется самым правдоподобным.

Совмещение всех вскрытых слоев разреза в исходное положение позволяет предположить, что величина горизонтального сокращения могла составить 4 м (надвиг), либо 2.5 м вертикальной плоскости и 1.5 м горизонтальной в случае взброса. Основываясь на среднестатистических корреляционных связях между магнитудой землетрясения и амплитудой подвижки [Wells, Coppersmith, 1994], получаем $M_w$ = 6.8—7.0. Эта оценка представляется заниженной, так как при землетрясении 2012 г. с $M$ = 6.8 суммарная величина смещения составила примерно 2 м. Можно полагать, что сила землетрясения составила не менее $M$ = 7.0. Относительно возраста землетрясения получены данные о верхнем возрастном ограничении интервала, в котором произошло землетрясение (480 лет — возраст современного гумусо-

**Рис. 10. Одноактный правый сдвиг гребня водораздела в правом борту долины р. Дерзиг в районе К-7.**

вого горизонта). В том случае, если зрелый почвенный профиль существовал до подвижки и провалился в новообразованный ров, можно использовать наиболее древнюю дату почвы (660—680 лет) в качестве нижнего возрастного ограничении интервала подвижки. Это позволяет предположить, что землетрясение произошло во время последней сейсмической активизации, датированной по следам землетрясений вдоль обоих сейсморазрывов 2011—2012 гг. — 600—300 лет назад.

В северном направлении от очагов землетрясений 2011—2012 гг. зона активного Каахемского разлома продолжается Хоптинским разрывом. Хоптинский разрыв протягивается в виде линии правосдвиговых смещений долин и водоразделов. Величина последней подвижки наиболее уверенно фиксируется по одноактным правым сдвигам гребней водоразделов. Последние подвижки четко фиксируются по степени сглаженности склоновыми процессами и характеру растительного покрова. Величина одноактного правого сдвига гребней водоразделов колеблется в пределах 2—3 м. С целью датирования последней подвижки в рассматриваемом районе, в правом борту долины р. Дерзиг (возле руч. Васильевский), в днище рва, рассекающего гребень мелкого отрога водораздела, пройден шурф К-7 (рис. 10). В нем с глубины 80—90 см отобран темно-коричневый рассеянный почвенный гумус со щебнем, ссыпавшимся в древний присдвиговый сейсмотектонический ров и захороненный обломочным материалом (калиброванный радиоуглеродный возраст — 1885—2062 года, обр. ИГАН 4478). Полученная дата дает нам приблизительный возраст последней подвижки — 1500—2000 лет назад. Основываясь на среднестатистических корреляционных связях между магнитудой землетрясения и амплитудой подвижки [Wells, Coppersmith, 1994], при сдвиговой кинематике смещений получаем $M_w$ = 7.0—7.2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Землетрясения произошли в зоне Каахемского разлома, представляющего собой одну из крупнейших сейсмогенерирующих структур Алтае-Саянского сейсмоактивного региона. Радиоуглеродное датирование следов древних землетрясений дало возможность оценить их повторяемость. Сейсмотектонические смещения неоднократно повторялись по одним и тем же индивидуальным разрывам, иногда практически синхронно в разных частях исследованного района. Для очага 1-го Тувинского землетрясения 2011 г. получен возраст трех палеоземлетрясений — 3000—3500, 1500-1900 и 300—500 лет назад. По силе предпоследнее событие было сходно с землетрясением 2011 г. ($M$ = 6.7). Два предыдущих события (3000—3500 и 1500—1900 лет назад) были сильнее. Для очага 2-го Тувинского землетрясения 2012 г., получены датировки двух предыдущих подвижек, произошедших за последние 900 лет — примерно 800—700 и 600—500 лет назад. По своим параметрам предыдущие подвижки были практически аналогичны современной. Можно полагать, что были схожи и параметры землетрясений — магнитуда ($M$ = 6.8) и интенсивность сотрясений в эпицентре (9 баллов). В подножии хр. Час-Тайга (по одноименному разлому) изучены следы землетрясения, которое, возможно, произошло во время последней сейсмической активизации, датированной по следам землетрясений вдоль обоих сейсморазрывов 2011—2012 гг. — 600—300 лет назад. Можно полагать, что сила землетрясения в Час-Тайгинском очаге составила не менее $M$ = 7.0. Для Хоптинского разрыва получен приблизительный возраст последней подвижки — 1500—2000 лет назад при землетрясении с $M_w$ = 7.0—7.2.

Полученные данные свидетельствуют, что относительно слабые события, подобные Тувинским 2011—2012 гг., за последнее тысячелетие повторялись раз в 300—500 лет, тогда как катастрофические землетрясения с $M$ = 7.0—7.2 и более происходят примерно раз в тысячу лет. Исследования такой детальности позволяют начать выполнение работ по оценке сейсмической опасности Тувы на принципиально новом уровне.

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ 14-05-00091 и 15-45-04351_р_сибирь_а

## ЛИТЕРАТУРА

**Аржанников С.Г.** Сейсмотектоника Восточно-Тувинского нагорья: Автореф. дис.… к. г.-м. н. Иркутск, ИЗК СО РАН, 1998, 16 с.

**Аржанников С.Г.** Палеосейсмодислокации в зоне влияния Оттугтайгино-Азасского разлома (Восточная Тува) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (11), с. 1501—1510.

**Аржанников С.Г., Зеленков П.Я.** Сильные палеоземлетрясения хребта Академика Обручева (Восточная Тува) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2—3. М., ОИФЗ РАН, 1995, с. 323—330.

**Геология** СССР. Том XXIX. Тувинская АССР. Часть I. М., Недра, 1966, 459 с.

**Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В.** Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L$ = 6.7 и 26.02.2012 г., $M_L$ = 6.8 и их афтершоки // ДАН, 2014, т. 456, № 2, с. 223—226.

**Карта** четвертичных отложений Тувинской АССР м-ба 1:500000. Л., Мингео СССР, ВСЕГЕИ, 1988.

**Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Кужугет К.С., Бутанаев Ю.В., Новиков С.С., Ларьков А.С.** Результаты полевых сейсмогеологических исследований Тувинских землетрясений 2011—2012 гг. // Тувинские землетрясения 2011—2012 гг. Кызыл, ТувИКОПР СО РАН, 2014, с. 57—79. http://ipc—publisher.ru/collections_1.aspx?id_sb=11

**Овсюченко А.Н., Вакарчук Р.Н., Рогожин Е.А., Бутанаев Ю.В., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С.** Тектоническая позиция, геологические проявления и тектонофизическое значение Тувинских землетрясений 2011—2012 гг. // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов Всероссийской конференции в 2 томах. Т. 1. М., ИФЗ РАН, 2016, с. 502—506.

**Палеосейсмология.** В 2 томах / Ред. Дж.П. Мак-Калпин. М., Научный мир, 2011.

**Прудников С. Г.** Вулканизм и покровные оледенения Тувы // Природа, 2005, № 8, с. 49—57.

**Рогожин Е.А.** Очерки региональной сейсмотектоники. М., ИФЗ РАН, 2012, 340 с.

**Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Ларьков А.С.** Геологические проявления Тувинских землетрясений 2011—2012 гг. // ДАН, 2015, т. 463, № 2, с. 316—321.

**Солоненко В.П.** Определение эпицентральных зон землетрясений по геологическим признакам // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1962, № 11, с. 58—74.

**Солоненко В.П.** Палеосейсмогеология // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1973, № 9, с. 3—16.

**Сугоракова А.М., Бутанаев Ю.В.** Каа-Хемская рифтогенная зона (история заложения и развития) // Тувинские землетрясения 2011—2012 гг. Кызыл, ТувИКОПР СО РАН, 2014, с. 83—85. http://ipc—publisher.ru/collections_1.aspx?id_sb=11

**Флоренсов Н.А.** О неотектонике и сейсмичности Монголо-Байкальской горной области // Геология и геофизика, 1960 (1). с. 74—90.

**Хромовских В.С., Николаев В.В., Демьянович М.Г., Чипизубов А.В., Семенов Р.М., Серебренников С.П., Аржанников С.Г., Смекалин О.П., Дельянский Е.А.** Новая карта сейсмического районирования Восточной Сибири и Монголии // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. Новосибирск, Наука, 1996, с. 94—99.

**Чернов Г.А.** К изучению сейсмогеологии и неотектоники Алтае-Саянской горной области // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской горной области. Новосибирск, Наука, 1978, с. 6—27.

**Чудинов Ю.В.** Новейшие тектонические движения в районе бассейна р. Улуг-О и хребта Таскыл в Северо-Восточной Туве // Бюл. МОИП, 1959, т. XXXIV, № 5, с. 55—70.

**Wells D.L., Coppersmith K.J.** Analysis of empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1994 , p. 974—1002.

*Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г.*
*В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию*
*24 марта 2016 г.*