

ТЕКТОНИКА, ПЕТРОЛОГИЯ

УДК 550.34

ИССЛЕДОВАНИЯ КААХЕМСКОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ В ТУВЕ: СЕГМЕНТАЦИЯ И МОДЕЛЬ ХАРАКТЕРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.Н. Овсученко¹, Ю.В. Бутанаев², А.М. Сугорокова², А.С. Ларьков¹,
А.В. Мараханов¹



¹ Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

² Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

Рассмотрена сеймотектоническая сегментация Каахемской системы активных разломов в связи с тувинскими землетрясениями 2011–2012 гг. Очаги землетрясений вышли на поверхность в виде сейсморазрывов, которые четко вписались в пределы уже существовавших морфоструктур, обнаружив полное совпадение по размерам и долговременным тенденциям развития. Результаты изучения и радиоуглеродного датирования в нескольких канавах протяженного (30 км) Шуйского разрыва позволяют более уверенно использовать это положение на практике для оценки максимально возможного землетрясения. Сильные землетрясения на протяжении позднего голоцена происходили асинхронно, охватывая разные сегменты Каахемской системы.

Ключевые слова: Тувинские землетрясения, палеосейсмология, сейсморазрыв, зона разлома, Шуй.

Введение

Сеймотектонические исследования современных сильных землетрясений дают нам наглядные образцы тектонических деформаций. Эти образцы лежат в основе структурного анализа разломных зон в целом и изучения активных разломов в частности. В настоящее время считается, что землетрясения представляют собой подвижку по разлому, переводящую тектонические напряжения в деформации отдельными импульсами, которые разделены периодами покоя продолжительностью в сотни и тысячи лет. В случае выхода плоскости подвижки в очаге землетрясения на поверхность возникают сеймотектонические разрывы, отражающие основные тенденции современного тектонического развития того или иного региона. Более того, конкретные морфологические параметры сеймотектонических разрывов современности – длина, величина и кинематика смещений – лежат в основе оценки сейсмической опасности с использованием постоянно совершенствуемых методов тектонической геоморфологии и палеосейсмологии.

Одна из основных задач палеосейсмологических исследований – сегментация крупных сейсмогенерирующих структур, под которой подразумевается выделение индивидуальных сейсмических очагов с оценкой их сейсмического потенциала, размеров и кинематики подвижек [Палеосейсмология, 2011]. С появлением модели типичных (характерных) землетрясений в мировой практике оценки сейсмической опасности стала широко применяться гипотеза о том, что отдельные сегменты конечной длины генерируют землетрясения в узком диапазоне магни-

туд, близком к максимальному уровню или достигающим его [Schwartz, Coppersmith, 1984]. Один из вариантов применения модели характерных землетрясений на практике предполагает, что повторяемость характерных землетрясений может быть расшифрована в одном пункте каждого сегмента, поскольку каждое сильное палеоземлетрясение должно было охватывать сегмент на всю его длину.

Исследования Каахемской системы активных разломов в Тувинской Республике см.: [Чернов, 1998; Аржанников, 1998; Сугорокова, Бутанаев, 2014]) были инициированы сразу после Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. и продолжены после, в течение нескольких полевых сезонов. Основной задачей полевых исследований, помимо изучения эпицентральной зоны землетрясений 2011–2012 гг., было установление и прослеживание одноактных и разновозрастных сеймотектонических уступов, рвов и валов в разновозрастных формах рельефа, включая проходку канав для изучения и датирования подвижек радиоуглеродным методом. Датирование выполнено в Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН и Лаборатории палеогеографии и геохронологии четвертичного периода факультета географии и геоэкологии СПбГУ. По результатам исследований выполнена сегментация Каахемской системы активных разломов (рис. 1). Оценка сейсмического потенциала основана на параметрах палеоземлетрясений – размерах очага и величине подвижки, напрямую отражающих магнитуду события. Размеры очага определялись по длине четко выраженного в рельефе сейсморазрыва.

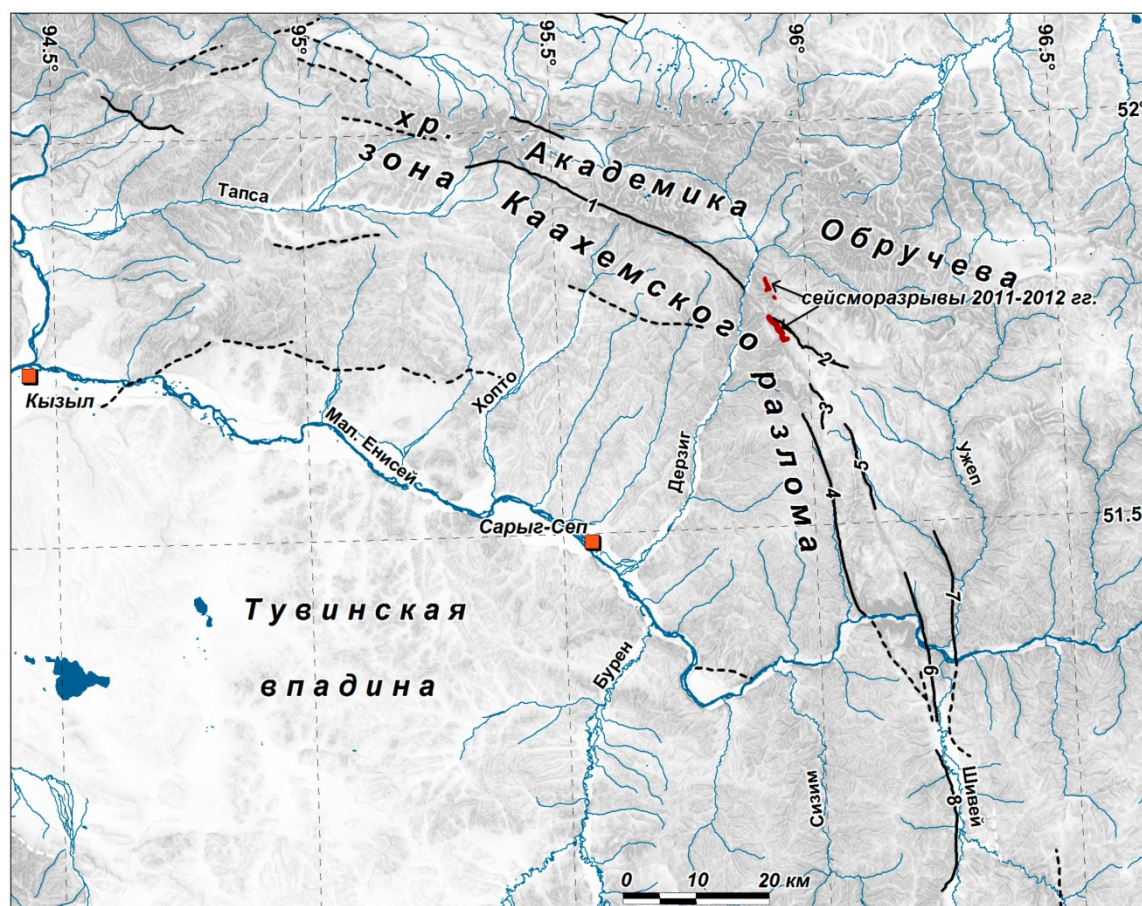


Рис. 1. Сегментация Каахемской системы активных разломов

1 – Хоптинский; 2 – Час-Тайгинский; 3 – Осерцовский; 4 – Шуйский; 5 – Чайминский; 6 – Усть-Шивейский; 7 – Ужепский; 8 – Шивейский. Пунктиром показаны предполагаемые активные разломы

Fig. 1. Segmentation of the Kaachem system of active faults

1 – Khoptinskiy; 2 – Chas-Tayginskiy; 3 – Osertsovskiy; 4 – Shuyskiy; 5 – Chayminskiy; 6 – Ust'-Shiveyskiy; 7 – Uzhepskiy; 8 – Shiveyskiy. The dotted line shows the estimated active faults

Тувинские землетрясения 2011–2012 гг.

Оперативное сейсмотектоническое и сейсмологическое изучение Тувинских землетрясений 27.12.2011 и 26.02.2012 с $M = 6,7$ и $6,8$ соответственно [Еманов и др., 2014] послужило отправной точкой в изучении основных черт строения сейсмических очагов Каахемской зоны. Согласно решениям механизмов ГС РАН подвижка при первом землетрясении имела преимущественно сдвиговую кинематику, при втором – преимущественно взбросовую с компонентой сдвига (рис. 2). Сейсморазрыв 1-го землетрясения устроен относительно просто и представлен правым сдвигом с величиной смещений на 50–60 см по плоскости субмеридионального простирания. При 2-м землетрясении общее простирание плоскости смещения отклонилось к субширотному направлению. При этом возникли отдельные системы разрывов как сдвиговой, так и взбросо-надвиговой кинематики. Они связаны между собой

постепенными переходами, в целом образуя закономерный взбросо-сдвиговой 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 [Овсяченко и др., 2016].

Сейсморазрывы возникли на ограничениях мелких морфоструктур, существовавших до землетрясений. Правый сдвиг в очаге 1-го землетрясения возник в спрямленной долине ручья Медвежий, а в ее верховьях – на ограничениях грабена-седловины. При 2-м землетрясении разрывы возникли вдоль подножия валов-поднятий или вдоль бортов небольших депрессий в днище Каахемской приразломной впадины, отразив сжатие с правым сдвигом и подрастание хребта Час-Тайга. В целом смещения по разрывам продолжили тенденции развития морфоструктур, прослеживаемые на протяжении позднего плиоцена – голоцена.

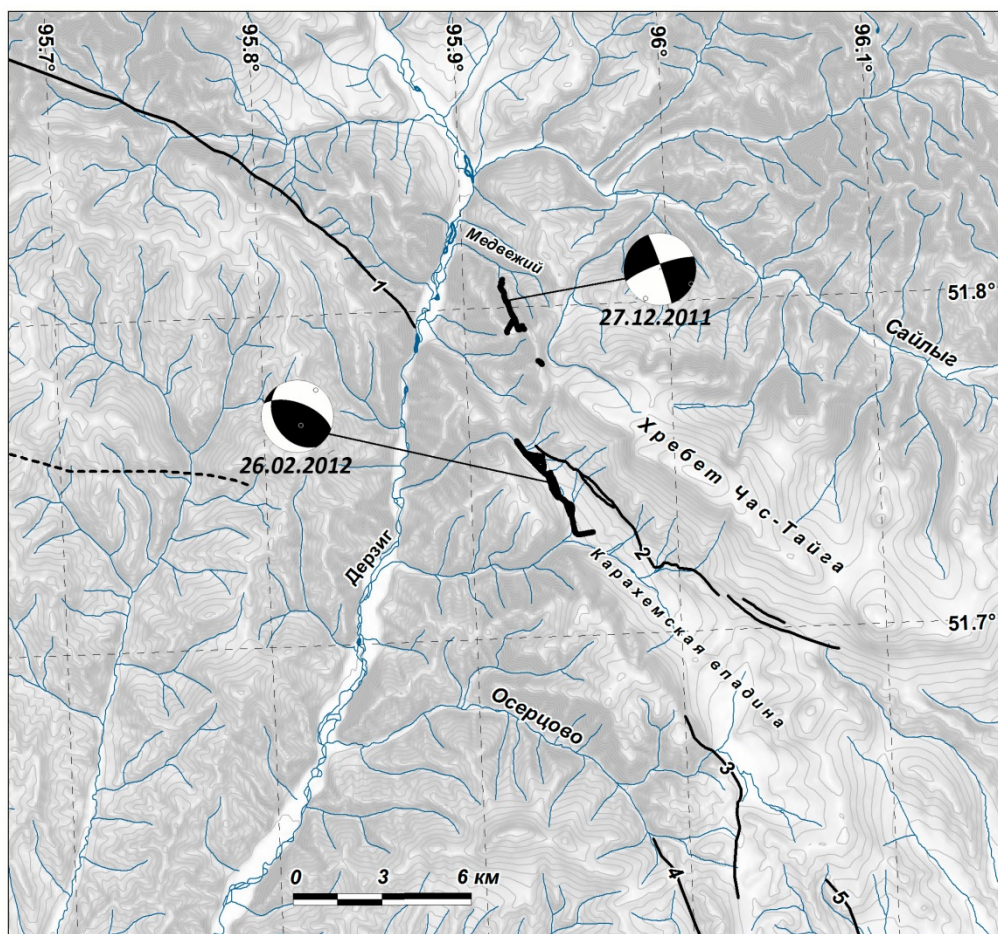


Рис. 2. Положение сейсморазрывов землетрясений 2011–2012 гг. (жирные линии) в Каахемской системе активных разломов

Показаны механизмы очагов землетрясений по данным ГС РАН (<http://www.ceme.gsras.ru>). Горизонтالي рельефа проведены через 50 м. Номера активных разломов см. на рис. 1

Fig. 2. The position of earthquakes seismic 2011-2012. (thick lines) in the Kaahem active fracture system

The mechanisms of earthquake foci are shown according to the GS RAS (<http://www.ceme.gsras.ru>). The contours of the relief are drawn through 50 m. For active fault numbers, see fig. 1

Направленность развития морфоструктур заключена в сжатии и горизонтальном сокращении земной поверхности в зоне Каахемского разлома с сопоставимой праводвиговой компонентой смещений. Для Карахемской впадины получены оценки скорости позднеплейстоцен-голоценового горизонтального сокращения ее поверхности на участке с сейсморазрывом 2012 г. – 1,1–2,2 мм/г. [Овсяченко и др., 2017]. Таким образом, сейсморазрывы четко вписались в пределы уже существовавших морфоструктур, обнаружив совпадение по размерам и тенденции долговременного развития.

Взаимоотношения сейсморазрывов между собой позволяют заключить, что в рассматриваемом районе активные разломы разного простирания образуют сложный дизъюнктивный узел. Он расположен на стыке гораздо более протяженных сегментов Ка-

ахемской системы активных разломов разного простирания.

Палеосейсмологические исследования

Для прояснения вопроса об одновозрастности и одноактности протяженных сегментов они были пересечены несколькими канавами на окончаниях и центральных флангах. Хоптинский разрыв, прослеженный на протяжении 43 км, был детально изучен четырьмя канавами, интерпретация которых опубликована ранее [Овсяченко и др., 2017].

Шуйский разрыв длиной около 30 км был изучен в пяти канавах (рис. 3).

В районе северного окончания Шуйский разрыв был изучен в канаве К-9 на водоразделе, в истоках рек Шуй и Осерцово (см. рис. 4, 5).

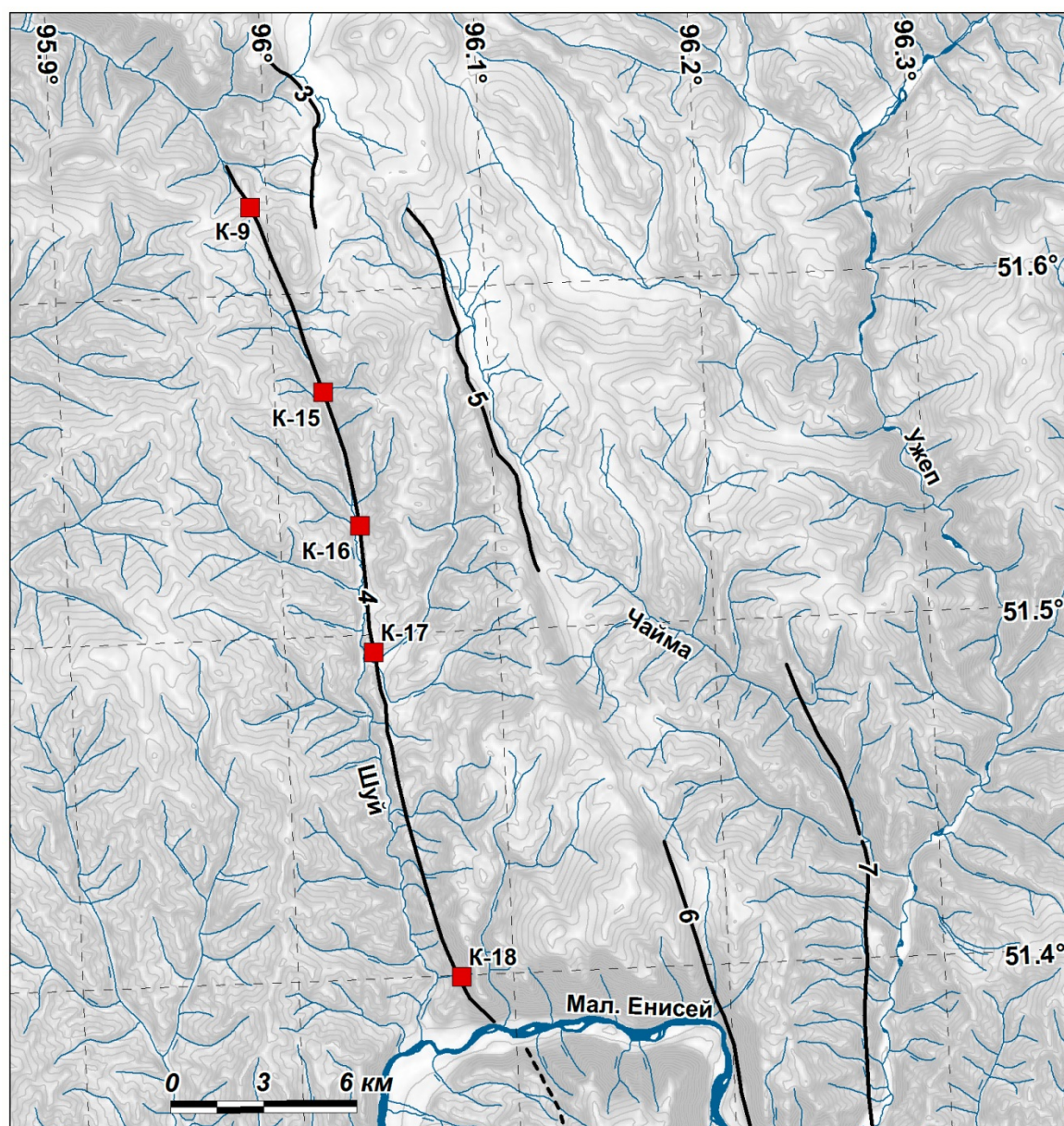


Рис. 3. Шуйский разрыв с положением пройденных канав (квадраты). Горизонтالي рельефа проведены через 50 м. Остальные обозначения на рис. 1

Fig. 3. Shuy break with the position of the trenches passed (squares). The contours of the relief are drawn through 50 m. The remaining designations in Fig. 1

В истоке притока р. Осерцово линейный вал ССЗ простирания высотой до 1 м отсекает водосборную воронку ручья. Ручей пререзает вал и спускается из водосборной воронки, постепенно формируя зрелую долину. В разрезе канавы к основанию вала приурочен субвертикальный тектонический разрыв, по которому в результате нескольких голоценовых подвижек произошло соприкосновение осадков, накопившихся в различных условиях – грубообломочных склоновых и глинистых болотных. Склоновая

осыпь в результате правосторонних сдвиговых подвижек была перемещена в заболоченную водосборную воронку ручья, оказалась ниже по течению ручья относительно болотных глин и неоднократно подпруживала долину.

Самый представительный участок для изучения последовательности позднеголоценовых смещений по Шуйскому разрыву, где хорошо сохранились разновозрастные аккумулятивные формы рельефа, расположен в районе канавы К-15.

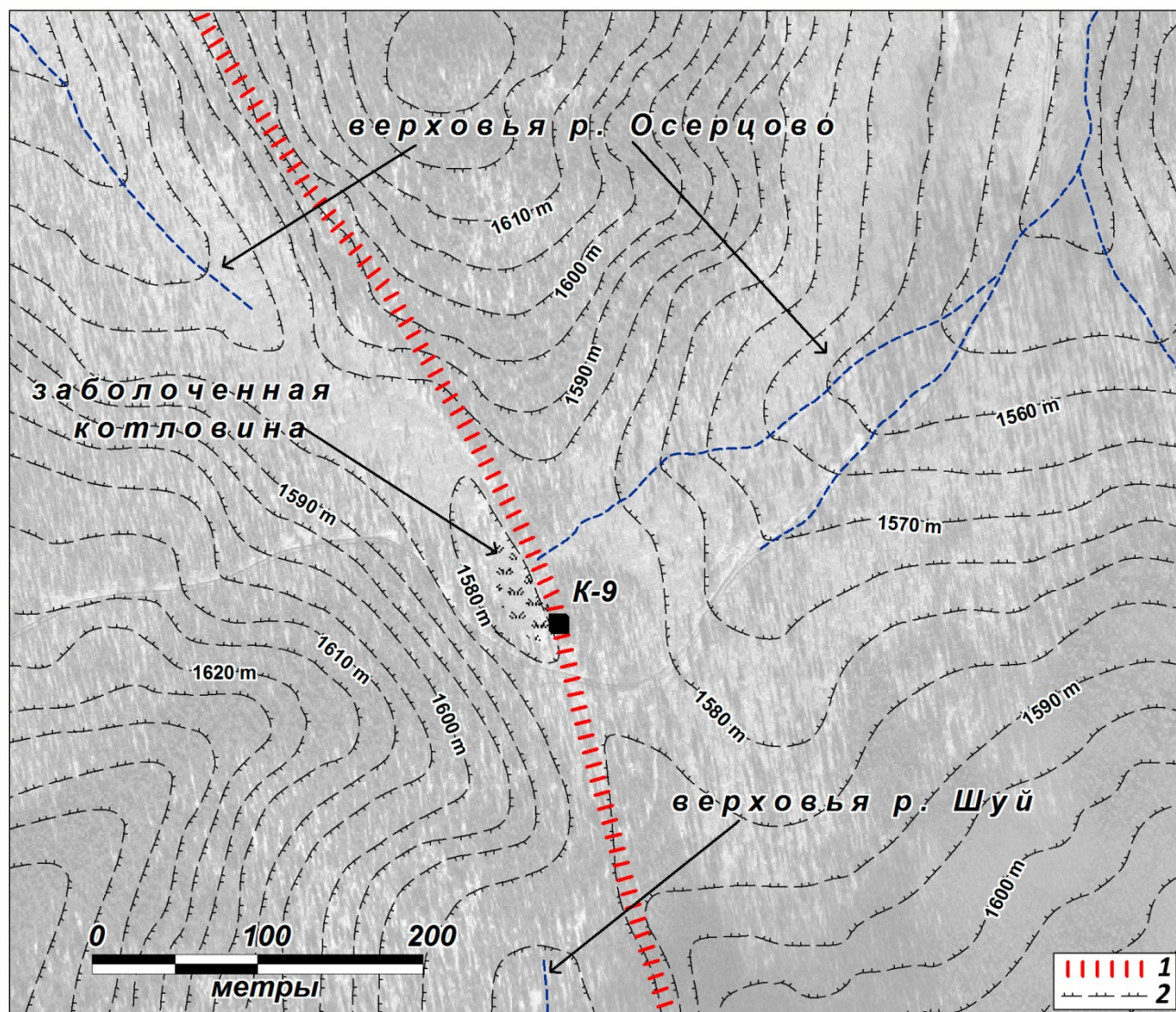


Рис. 4. Морфологическая схема района канавы К-9 в истоках рек Шуй и Осерцово. Основа – космоснимок с разрешением 0,6 м (http://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/)
 1 – тектонический разрыв; 2 – горизонтали рельефа через 5 м по данным цифровой модели рельефа SRTM и полевой съемки

Fig. 4. Morphological diagram of the K-9 ditch region in the headwaters of the Shui and Oserctsovo rivers.

The basis is a space image with a resolution of 0.6 m

(http://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/)

1 – tectonic gap; 2 – relief horizontals in 5 m according to the SRTM digital terrain model and field survey

Аккумулятивные поверхности рассечены молодым линейным рвом, который хорошо сохранился от нивелирующего воздействия экзогенных процессов. Участок расположен в приустьевой части небольшого ручья – левого притока реки, где узкое днище долины р. Шуй заполнено мощным конусом выноса, отложившимся в условиях осадконакопления, не соответствующих современным (см. рис. 6). В поверхность конуса врезаны две надпойменные террасы левого притока. Поверхность конуса и террасы рассечены прямолинейным рвом шириной до 5 м с поднятым восточным крылом. Вдоль рва наблюдаются правые сдвиги уступов всех террас,

за исключением пойменной. Величина правого сдвига увеличивается с 3–4 м (уступ I надпойменной террасы) до 6–7 м (уступ и тыловой шов II). Вторая величина (6–7 м), по всей видимости, накопилась в результате двух подвижек. Столь яркие проявления разрыва в рельефе не оставляли сомнений в его сейсмотектонической природе. В связи с этим канава К-15 была пройдена с целью датирования отложений, заполнивших ров у его приподнятого борта. Ров пересечен канавой на поверхности конуса выноса притока р. Шуй – самой высокой и древней аккумулятивной формы рельефа на рассматриваемом участке (см. рис. 7).



Рис. 5. Общий вид места проходки канавы К-9 (показана линией). Вид со стороны заболоченной котловины на отсекающий ее вал (на восток)

Fig. 5. General view of the place of penetration of the ditch K-9 (shown in line). View from the marshy hollow at the shaft cutting off (east)

По литолого-фациальным особенностям и условиям залегания в разрезе канавы К-15 можно выделить три разновозрастных комплекса. Они различаются составом, условиями осадконакопления и характером залегания. Нижний комплекс залегает с более крутым наклоном и представлен аллювиально-селевыми осадками конуса выноса, на которых сформировался маломощный почвенный покров (калиброванный возраст – 5780–6270 лет, обр. ЛУ-7431). Выше залегают горизонтально слоистые болотные оглеенные глины с примесью песка (средний комплекс). Они маркируют резкое изменение условий осадконакопления, связанное с заложением на поверхности конуса сейсмотектонического рва, в котором на слаборазвитом молодом почвенном покрове начали накапливаться болотные глины. Первично горизонтальные слои в болотных глинах сохранились плохо – они сильно деформированы мелкой дисгармоничной складчатостью. В общих чертах слоистость испытала наклон, параллельный кровле подстилающих аллювиально-селевых осадков.

Эта деформация произошла во время болотного осадконакопления, на что указывают: конволюцион-

ный характер складчатости, возникшей в обводненных (жидких) глинистых осадках и отсутствие почвенного покрова на контакте среднего и верхнего комплексов. В результате второй подвижки слои нижнего комплекса претерпели перекося, оказались задранны в сторону высокого (восточного) борта рва и с разрывом и угловым несогласием перекрыты более пологими слоями.

В основании верхнего комплекса залегает «базальный» галечно-гравийный горизонт, переотложенный с поднятого борта рва. Он отвечает наиболее опущенной части рва и выклинивается у его приподнятого восточного борта. Выше накопились буровато-коричневые, легкие, пористые суглинки (иллювиальный горизонт палеопочвы). В них залегает погребенный гумусовый горизонт палеопочвы с углями и переотложенными обломками в верхней части (калиброванный возраст по углю – 2970–3250 лет, по гуминовым кислотам – 2780–2920 лет, обр. ЛУ-7433). По-видимому, захоронение палеопочвы склоновым материалом произошло в результате резкого проседания рва при третьей подвижке, последней из зафиксированных в разрезе.

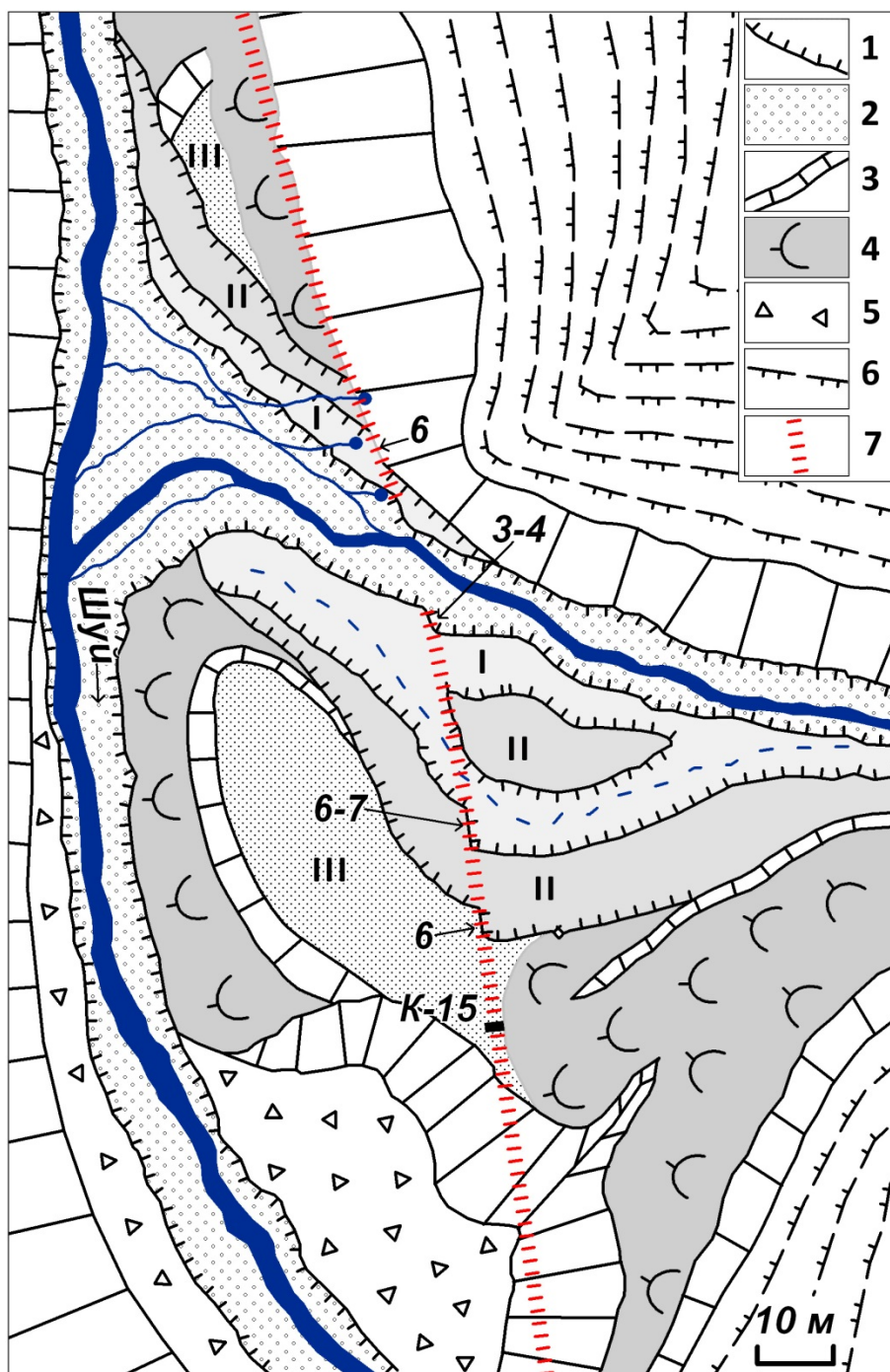


Рис. 6. Геоморфологическая схема района канавы К-15 в верховьях долины р. Шуй.

Цифрами указаны амплитуды горизонтальных смещений тыловых швов террас, метры

1 – тыловые швы террас (низкие эрозионные уступы); 2 – пойменный аллювий; 3 – высокие эрозионные уступы; 4 – склоновые (солифлюкционно-оползневые) суглинисто-обломочные накопления; 5 – обвал; 6 – условные горизонталы рельефа на горных склонах; 7 – тектонический разрыв

Fig. 6. Geomorphological scheme of the K-15 ditch area in the headwaters of the r. Shui. The numbers indicate the amplitudes of the horizontal displacements of the rear seams of the terraces, meters

1 – rear seams of the terraces (low erosion ledges); 2 – floodplain alluvium; 3 – high erosion ledges; 4 – slope (solifluction-landslide) loamy-detrital accumulations; 5 – collapse; 6 – conditional relief contours on the mountain slopes; 7 – tectonic gap

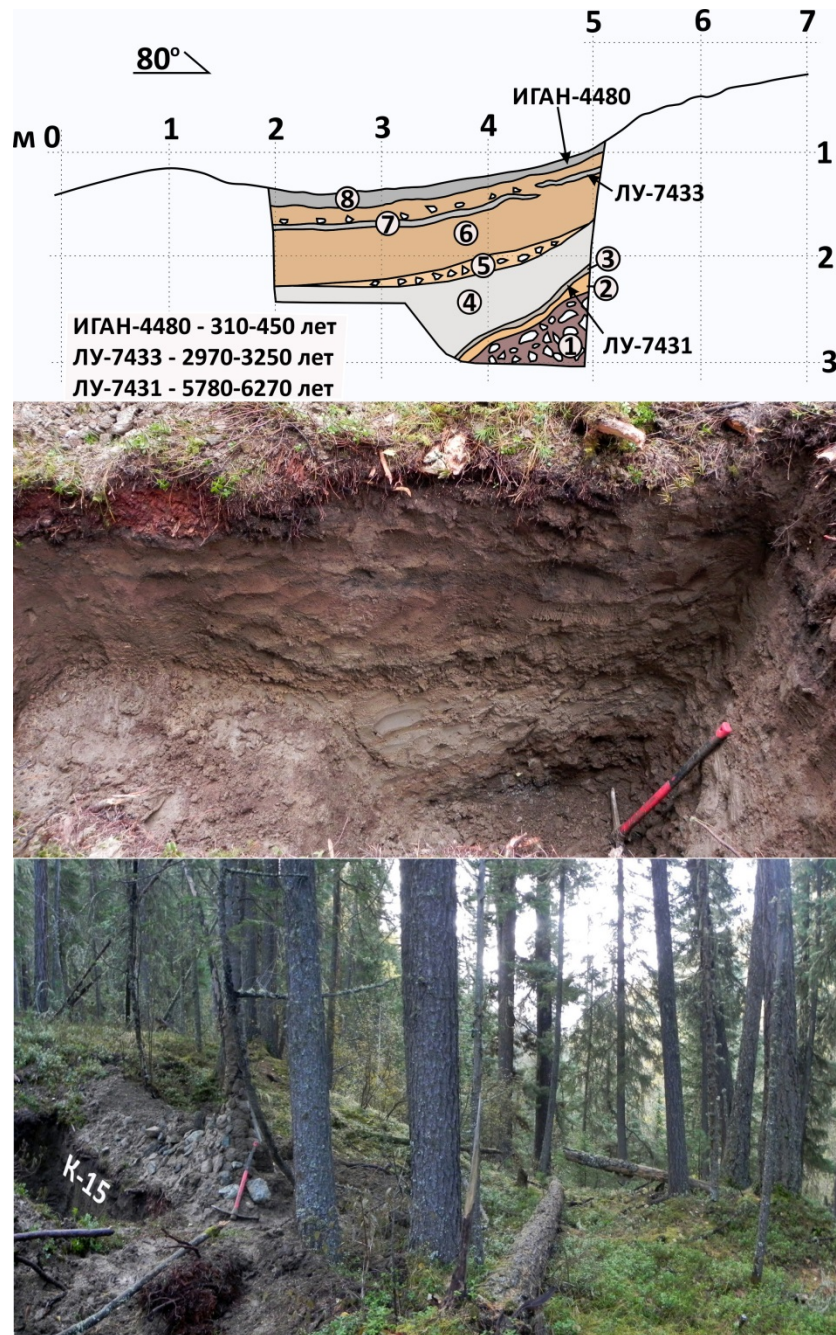


Рис. 7. Зарисовка и фото канавы К-15, пройденной вкrest простираия рва (Шуйский разрыв)

1 – галька, валуны с обколотыми краями, реже неокатанные обломки разнообразного состава (светло-серые, розовые гранитоиды, габброиды) с косо-слоистым песчано-гравийным заполнителем (аллювиально-селевые осадки конуса выноса); 2 – бурый песок с гравием (иллювиальный горизонт палеопочвы); 3 – гумусовый горизонт палеопочвы со следами переотложения дерна и мхов; 4 – светло-серые пылеватые оглеенные супеси с жилками льда, в верхней части горизонтально-слоистые (параллельно кровле слоя); 5 – бурый галечно-гравийный горизонт с тонкими прослоями супеси (выполнение рва выклинивается у его приподнятого восточного борта); 6 – буровато-коричневые, легкие, пористые суглинки (иллювиальный горизонт палеопочвы); 7 – гумусовый горизонт палеопочвы с углями и переотложенными обломками в верхней части; 8 – гумусовый горизонт современной почвы с подзолом

Fig. 7. Sketch and photo of the K-15 ditch, traversed across the ditch's stretch (Shuysky gap)

1 – pebbles, boulders with chipped edges, less often unmilld fragments of various composition (light gray, pink granitoids, gabbroids) with cross-stratified sand-gravel aggregate (alluvial-mud flow of the outflow cone); 2 – brown sand with gravel (illuvial horizon of paleosol); 3 – humus horizon of the paleosol with traces of re-deposition of turf and mosses; 4 – light gray silty gley sandy loam with veins of ice, horizontally layered in the upper part (parallel to the roof of the layer); 5 – brown pebble-gravel horizon with thin interlayers of sandy loam (making a ditch, pinned out at its elevated eastern side); 6 – brownish-brown, light, porous loams (illuvial horizon of paleosol); 7 – humus horizon of the paleosol with coal and redeposited debris in the upper part; 8 – humus horizon of modern soil with podzol.

Таким образом, в канаве К-15 изучены следы трех подвижек, произошедших примерно 5500–6000 л.н., между 5500–3250 и около 2800–3000 л.н. Принимая величины правого сдвига уступов надпойменных террас за амплитуду одноактного смещения 3–4 м, исходя из регрессионных соотношений [Wells, Coppersmith, 1994], получаем $M_w = 7,2–7,5$.

В среднем течении р. Шуй разрыв приобретает субмеридиональное простирание и существенную вертикальную компоненту смещений. На этом участке долина реки имеет облик тектонической впадины – широкое (до 250 м) днище долины почти полностью заполнено конусами выноса боковых притоков, среди которых меандрирует русло. Наиболее выраженный крутой уступ протягивается цепью эрозионно-тектонических фасет вдоль подножия правого борта долины р. Шуй. Он пересекает надпойменную террасу правых притоков, где имеет высоту 1,5–2,5 м. В канаве К-16 изучен уступ на поверхности 1-й надпойменной террасы р. Биче-Ары-Хем высотой 1,8 м. К востоку от уступа, во впадине

р. Шуй, терраса погружается под уровень поймы и покрыта заболоченным кочкарником, по которому меандрирует русло притока с песчаным, хорошо сортированным русловым аллювием. У подножия уступа, из кровли пойменной глины отобраны углефицированные растительные остатки (калиброванный возраст – 3420–3660 лет, обр. ЛУ-7434). Глина залегает на русловом, галечном аллювии и перекрыта комковатой бурой супесью, переотложенной с поднятого крыла разлома.

Близкий возраст получен по торфу (калиброванный возраст – 3394–3564 лет, обр. ИГАН-4461), захороненному в схожих условиях южнее, в районе устья р. Эзерлиг-Хем (К-17).

В низовьях долины р. Шуй разрыв вновь приобретает ССЗ простирание, постепенно отклоняясь в СЗ направлении в районе устья реки. Здесь он прослеживается вдоль левого борта долины, где смещает вправо долины всех ручьев – притоков. В районе канавы К-18 величина правого сдвига долины мелкого левого притока – 35–40 м, тылового шва пойменной террасы – 3–3,5 м (рис. 8).



Рис. 8. Правый сдвиг (между стрелками) в правом борту р. Шуй в районе К-18

Fig. 8. Right shift (between arrows) in the right side of the river. Shui in the K-18

Канава К-18 пройдена на гребне водораздела – крутого и узкого отрога, также смещенного в результате последней подвижки (выраженной относительно свежими скальными обрывами) на 3–3,5 м. Здесь гребень нарушен рвом, заполненным рыхлым материалом, образующим ровную площадку на гребне у подножия крутого скального обрыва. Днище рва – ровное, шириной около 6 м, покрыто бурой лесной почвой и кедрово-лиственнично-березовой тайгой. В К-18 вскрыт разрез суглинисто-обломочных склоновых отложений, перемежаемых с двумя погребенными палеопочвами. Нижняя палеопочва – светло-серая, пылеватая с тонкими фрагментами и дернами и корнями степных трав (калиброванный возраст – 3690–4090 лет, обр. ЛУ-7437) – залегает на глубине 1–1,2 м на выветрелых до дресвы гранитоидах. Верхняя палеопочва с хорошо развитым каштановым гумусовым горизонтом (мощностью 20 см) залегает на глубине 0,5–0,7 м (калиброванный возраст – 2850–3170 лет, обр. ЛУ-7435). Оба горизонта захоронены дресвяно-щебнистыми отложениями, постепенно переходящими в суглинистый иллювиальный горизонт. Вероятнее всего, они были захоронены в результате сейсмостектонического опускания днища рва примерно 3600–3500 и 2500–2800 лет назад. Последняя дата близка к датировке последнего события в верховьях р. Шуй (К-15).

Заключение

На основании собранных материалов можно полагать, что землетрясение с $M_w = 7,2–7,5$ около 2500–2800 лет назад охватило весь или почти весь Шуйский разрыв. Следы землетрясения 3400–3600 лет назад продатированы в среднем и нижнем течениях р. Шуй (К-16, К-17, К-18). Можно предположить, что именно это событие зафиксировано в верховьях р. Шуй (К-15) в интервале между 5500–3250 лет назад. В таком случае, событие 3400–3600 лет назад также можно считать катастрофическим ($M_w = 7,2–7,5$) и охватывавшим весь или почти весь Шуйский разрыв. Следы самого

древнего землетрясения (5500–6000 лет назад) обнаружены только в одном месте – в верховьях р. Шуй (К-15). Скорее всего, в других местах изучения следы этого события либо не были вскрыты, либо уничтожены экзогенными процессами. В связи с этим магнитуду события определить не удалось.

Степень изученности сейсмической истории Каахемской системы в целом более всего представительна для последних 3–4 тыс. лет. Выявлены следы четырех мощных сейсмических активизаций из нескольких сильнейших для этой зоны землетрясений. Катастрофическими были четыре землетрясения, произошедшие 800–1000, 1800–2100 лет назад (Хоптинский разрыв) [Овсяченко и др., 2017], 2500–2800 и 3400–3600 лет назад (Шуйский разрыв). Величина одноактных смещений достигает 4 м, а длина сегментов – 40 км. Это говорит о том, что магнитуда землетрясений достигала $M = 7,5$. В эти эпохи сейсмических активизаций происходили и более слабые землетрясения с $M = 6,5–7,0$, рассмотрение которых – отдельный вопрос. Такие события при каждой сейсмической активизации охватывали разные сегменты, т.е. происходили в разных участках Каахемской системы разломов, отстоящих друг от друга на расстоянии до 100 км.

Последние землетрясения в Каахемской системе разломов произошли в 2011–2012 гг. Сейсморазрывы в очагах этих землетрясений возникли на ограничениях мелких морфоструктур. Смещения по разрывам продолжили направленность развития этих морфоструктур в течение очень длительного времени. Кроме того, сейсморазрывы четко вписались в пределы уже существовавших морфоструктур, показывая необходимость и адекватность использования морфоструктурного анализа при оценке сейсмической опасности в Алтае-Саянском сейсмоактивном регионе.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект «Комплексные научные исследования влияния природных катастрофических процессов на историко-культурное развитие Тувы в долгосрочном аспекте», грант 17-45-170568 p_a).

ЛИТЕРАТУРА

- Аржанников С.Г. Сейсмостектоника Восточно-Тувинского нагорья : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск : ИЗК СО РАН, 1998. 16 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.
- Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кужугет К.С., Бутанаев Ю.В. Геологические исследования Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43, № 1. С. 5–29.
- Овсяченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С., Кужугет К.С. О повторяемости сильных сейсмических событий в районе Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. по данным палеосейсмологических исследований // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 11. С. 1784–1793. DOI: 10.15372/GiG20171112
- Палеосейсмология : в 2 т. / ред. Дж.П. Мак-Калпин. М. : Научный мир, 2011.
- 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. URL: http://ipc-publisher.ru/collections_1.aspx?id_sb=11
- 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.
- Schwartz D.P., Coppersmith K.J. Fault behavior and characteristic earthquakes – Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones // J. Geophys. Res. 1984. № 89. P. 5681–5698.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seis. Soc. Am.* 1994. V. 84, № 4. P. 974–1002.

Авторы:

Овсюченко Александр Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия. E-mail: ovs@ifz.ru

Бутанаев Юрий Владимирович, младший научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия. E-mail: jyra3@mail.ru

Сугорокова Амина Мидхатовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия. E-mail: samina51@inbox.ru

Мараханов Александр Владимирович, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия. E-mail: marahanov@ifz.ru

Ларьков Александр Сергеевич, научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия. E-mail: LaS119@yandex.ru

Geosphere Research, 2019, 1, 6–16. DOI: 10.17223/25421379/9/1

A.N. Ovsyuchenko¹, Yu.V. Butanayev², A.M. Sugorakova², A.V. Marahanov¹, A.S. Lar'kov¹

¹*The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia*

²*Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, Kyzyl, Russia*

RESEARCH OF THE KAAKHEM SYSTEM OF ACTIVE FAULTS IN TUVA: SEGMENTATION AND MODEL OF SPECIFIC EARTHQUAKES

The marks of four powerful seismic activations from several strongest earthquakes for this zone are considered. Four earthquakes that occurred 800–1000, 1800–2100 (the Koptinsky fault), 2500–2800 and 3400–3600 (the Shuysky fault) years ago were catastrophic. The value of one-act displacements reaches 4 m, and the length of the segments is 40 km. This suggests that the magnitude of earthquakes reached $M = 7.5$. Weaker earthquakes with $M = 6.5–7.0$ also occurred during the periods of seismic activations but this is the other issue for considering. Such events at each seismic activation included different segments, i.e. occurred in different parts of the Kaakhem fault system located about 100 km apart.

The last earthquakes in the Kaakhem fault system occurred in 2011–2012. Seismic fractures in these earthquake centers occurred within small morphostructures. Displacements along the fractures furthered the direction of these morphostructures for a long time. Further seismic fractures clearly fit into the existing morphostructures which points the relevance of morphostructural analysis use in seismic hazard rating within the Altai-Sayan seismically active region.

Keywords: Tuva earthquakes, paleoseismology, seismic fault, fault zone, Shui.

References

- Arzhannikov S.G. *Sejsmotektonika Vostochno-Tuvinskogo nagor'ja* [Seismotectonics of the East Tuva Highlands]. Avtoref. diss. kand. geol.-min.nauk. Irkutsk, IZK SO RAN, 1998. 16 p. In Russian
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Seleznev, V.S., Fateev, A.V.. The Tuva earthquakes of December 27, 2011, $ML = 6.7$, and February 26, 2012, $ML = 6.8$, and their aftershocks. // *Doklady Earth Science*. 2014. 456 (1), pp. 594–597.
- Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A., Marahanov A.V., Lar'kov A.S., Novikov S.S., Kuzhuget K.S., Butanaev Ju.V. *Geologicheskoe issledovanie Tuvinskih zemletrjasej 2011–2012 gg.* [Geological studies of Tuva earthquakes, 2011–2012.] // *Voprosy inzhenernoj sejsmologii*. 2016. Vol.43, № 1. pp. 5–29. In Russian
- Ovsyuchenko A.N., Butanaev Ju.V., Marahanov A.V., Lar'kov A.S., Novikov S.S., Kuzhuget K.S. Recurrence of strong seismic events in the area of the 2011–2012 Tuva earthquakes according to paleoseismological data// *Russian Geology and Geophysics*. 2017. 58. pp.1417–1425
- Paleoseismologija*. [Paleoseismology] V 2-h tomah. / Red. Dzh.P. Mak-Kalpin. Moscow: Nauchnyj Mir, 2011. In Russian
- Sugorakova A.M. Butanaev Ju.V. *Kaa-Hemskaja riftogennaja zona (istorija zalozenija i razvitiya)* [Kaa-Khem rift zone (history of development and development).] // *Tuvinskie zemletrjasej 2011–2012 gg.* Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN, 2014. pp. 83–85. In Russian
- Chernov G.A. *K izucheniju sejsmogeologii i neotektoniki Altae-Sajanskoj gornoj oblasti* [To the study of seismogeology and neotectonics of the Altai-Sayan mountain region] // *Sejsmogeologija vostochnoj chasti Altae-Sajanskoj gornoj oblasti*. Novosibirsk: Nauka, 1978. pp. 6–27. In Russian
- Schwartz D.P., Coppersmith K.J. Fault behavior and characteristic earthquakes – Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. // *J. Geophys. Res.* 1984. No. 89. pp. 5681–5698.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // *Bull. Seis. Soc. Am.* 1994. V. 84, No. 4. pp. 974–1002.

Authors:

Ovsyuchenko Alexander N., Cand. Sci.(Geol.-Miner), Leading Researcher, the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia. E-mail: ovs@ifz.ru

Butanayev Yury V., Junior Researcher, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, Kyzyl, Russia. E-mail: jyra3@mail.ru

Sugorakova Amina M., Cand. Sci.(Geol.-Miner), Leading Researcher, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, Kyzyl, Russia. E-mail: samina51@inbox.ru

Marahanov Aleksandr V., Senior Researcher, the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia. E-mail: marahanov@ifz.ru

Lar'kov Aleksandr S., Researcher, the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia. E-mail: LaS119@yandex.ru