

УДК 550.348/349(517)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИБИРИ

© 2013 г. В. С. Имаев¹, А. Л. Стром², А. В. Чипизубов¹, О. П. Смекалин¹,
Л. П. Имаева¹, И. Ю. Лободенко²

¹Институт Земной Коры СО РАН, Иркутск, 664033, ул. Лермонтова, д. 128

²ЦСГНЭО – Филиал ОАО “Институт Гидропроект”, Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 2

Поступила в редакцию 29.11.2011 г.

Масштабные изыскательские работы при выборе трассы нефтепровода Восточная Сибирь–Тихий океан (ВСТО) показали высокую востребованность и актуальность проведения детальных палеосейсмологических исследований с применением новых приемов такого анализа при помощи материалов лазерного сканирования. Анализ материалов лазерного сканирования позволил не только “увидеть” и подробно откартировать многочисленные приразломные уступы, но и получить их морфометрические характеристики (высоту, крутизну) и выделить уступы, образовавшиеся в результате как одноактных, так и многоактных сейсмогенных подвижек. Высокая эффективность использованных материалов лазерного сканирования требуют скорейшего обязательного внесения их в арсенал проведения палеосейсмологических работ.

DOI: 10.7868/S0016853X1303003X

ВВЕДЕНИЕ

Палеосейсмологический метод был разработан Н.А. Флоренсовым, В.П. Солоненко и их учениками, как мощный и, практически, безальтернативный инструмент, позволяющий существенно расширить наши знания о сильных землетрясениях в высокосейсмичных, но слабо населенных районах Восточной Сибири и Монголии, где, несмотря на ряд сильнейших землетрясений XIX и XX веков, явно недоставало исторических сведений о таких событиях [3, 4]. Не случаен тот интерес, который проявили к этим пионерским исследованиям выдающиеся американские сейсмологи Ч. Рихтер и К. Аллен, во многом благодаря усилиям которых, труды советско-монгольской экспедиции по изучению последствий Гоби-Алтайского землетрясения были переведены и изданы на английском языке [34]. Несмотря на то, что еще в 1872 году американский геолог К. Жилберт впервые описал связь картируемых структур с возможными следами предшествующих землетрясений в зоне Усатчского разлома в окрестностях г. Солт-Лэйк-Сити [19, 30, 32], приемы палеосейсмологического анализа прочно вошли в арсенал методов сейсмогеологических исследований ученых из разных стран мира именно в конце 60-х, начале 70-х годов прошлого века, после выхода в свет на английском языке трудов Н.А. Флоренсова и В.П. Солоненко.

Первоначально палеосейсмологические исследования в нашей стране проводились преимущественно в Прибайкалье и Забайкалье. Их первые результаты были обобщены в монографии “Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья”, вышедшей под редакцией В.П. Солоненко в 1966 году. Именно благодаря использованию палеосейсмологического метода было проведено сейсмическое районирование и доказана высокая сейсмическая активность обширных малообжитых территорий Восточной Сибири, ранее считавшихся практически асейсмичными [3, 4, 20].

Справедливости ради следует отметить, что для российских исследователей наблюдения за следами разрушительных землетрясений известны были и ранее благодаря публикациям К.И. Богдановича, И.В. Мушкетова и многих других [1, 11].

Позднее сейсмогеологическими исследованиями были охвачены как смежные районы Восточной Сибири, так и горные сооружения Кавказа, Средней Азии, некоторых районов Дальнего Востока [2, 5–18, 23–27].

К сожалению, приходится отметить, что дальнейшее совершенствование методических основ палеосейсмологии, и в первую очередь методов изучения строения сеймотектонических дислокаций в разрезе в специально пройденных траншеях, происходило, в основном, за рубежом. Здесь следует упомянуть обобщающие работы американских сейсмогеологов, в первую очередь

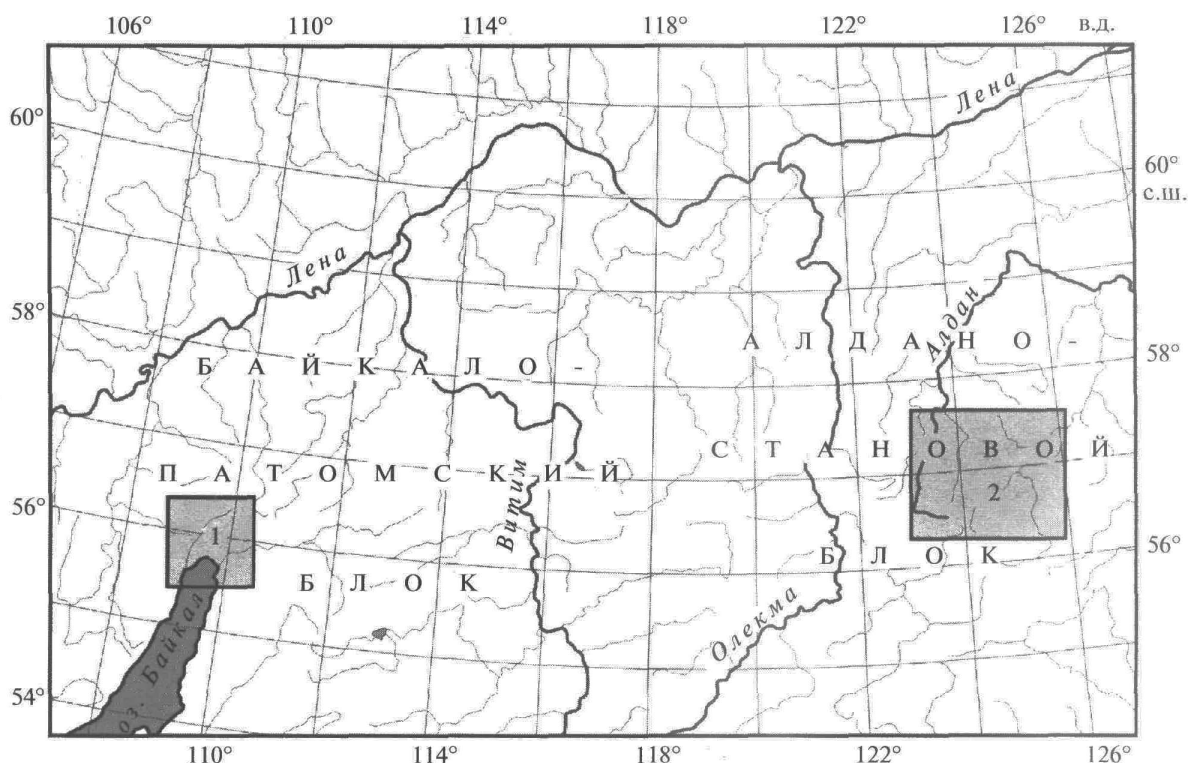


Рис. 1. Местоположение Кичерской (1) и Чульмаканской (2) палеосейсмогенных структур

фундаментальный труд “Paleoseismology” (“Палеосейсмология”) под редакцией Д. Мак-Калпина, выдержавший уже 2 издания (в 1996 и 2009 гг.), а также монографию Р. Йетса, К. Си и К. Аллена “Геология землетрясений” (“The Geology of Earthquakes”), вышедшую в 1997 г. [29–32].

Начиная с середины 70-х годов прошлого века, развитие палеосейсмологического метода за рубежом приобрело лавинообразный характер. Он с успехом применялся в Японии, США, Италии, Китае, Индии, и теперь трудно найти страну, где не используется эта методика, позволяющая восстановить историю сильных землетрясений за последние десятки тысяч лет [22–33].

Современные исследования, проводимые в сейсмоопасных регионах России, во многом базируются на обширном фактическом материале, собранном нашими предшественниками и коллегами В.П. Солоненко, В.С. Хромовских, В.А. Хилько, В.В. Николаевым, С.В. Ласточкиным, М.Г. Демьяновичем [4]. Внедряются в практику и новые методы палеосейсмологического анализа. Палеосейсмологические исследования, особенно при решении прикладных задач, связанных, в частности, со строительством ГЭС, магистральных трубопроводов, других ответственных сооружений, проводятся сотрудниками ИЗК

СО РАН совместно с коллегами из Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Геологического института РАН, Института динамики геосфер РАН, Института “Гидропроект”, Института тектоники и геофизики ДВО РАН, Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и других научно-исследовательских и изыскательских организаций.

Лазерное сканирование и картирование сейсмогенных разломов

Примером высокой востребованности и актуальности палеосейсмологических исследований для районов Восточной Сибири могут служить работы, проводившиеся в связи с проектированием нефтепровода Восточная Сибирь–Тихий океан (ВСТО), в ходе которых установление предельно возможной магнитуды землетрясений и их повторяемости во многом определялось именно по результатам палеосейсмологических исследований. При этих работах, по-видимому, впервые в нашей стране, широко использовались материалы лазерного сканирования, проведенного по трассе проектируемого нефтепровода, что позволило, даже в сильно залесенной местности, получить цифровые модели рельефа (ЦМР) интересующих

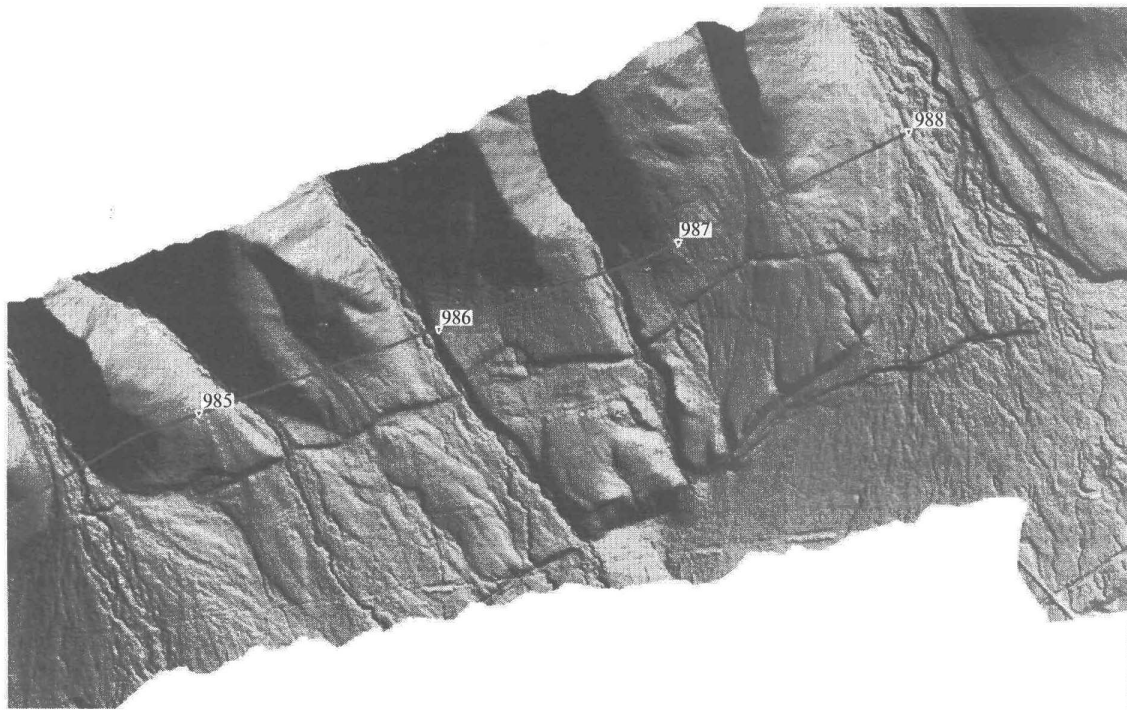


Рис. 2. Фрагмент Кичерской палеосейсмогенной структуры. Цифровая модель рельефа (ЦМР) по материалам лазерного сканирования. Отчетливо видно, что разрыв, расположенный выше по склону, не затрагивает молодую террасу на конусе выноса реки, в то время как разлом, проходящий ближе к оси впадины, смещает этот конус, но, в свою очередь, не затрагивает современную пойму. Высота уступа верхнего разрыва, где он пересекает молодые конуса выноса, существенно меньше, чем высота между ними, что свидетельствует о многократных подвижках по разрыву. Показано положение первого варианта трассы ВСТО, отвергнутого, в том числе из-за сложных сеймотектонических условий

нас участков с детальностью, соответствующей топографической карте м-ба 1 : 2000. Анализ материалов лазерного сканирования в бортах долины р. Кичера и Чульманской впадины (рис. 1) позволил не только “увидеть” и подробно откартировать многочисленные приразломные уступы, но и получить их морфометрические характеристики (высоту, крутизну) и выделить уступы, образовавшиеся в результате как одноактных, так и многоактных подвижек (рис. 2, рис. 3).

Необходимо подчеркнуть, что в условиях густой тайги некоторые из этих дислокаций практически неразличимы ни на космических и аэрофотоснимках, ни при аэровизуальном обследовании.

В дальнейшем, некоторые из выявленных приразломных уступов были вскрыты траншеями, в которых было изучено строение молодых разрывов и отобраны образцы для определения возраста подвижек. Все это позволило существенно повысить достоверность выделяемых палеосейсмодислокаций, а также установить количество возможных палеоземлетрясений, связанных с конкретными активными разломами [14, 15, 21, 22, 33].

Для изучения эволюции сейсмического процесса в зоне Кичерского разлома — одного из наиболее сейсмоопасных в Байкальской рифтовой зоне, через обнаруженный нами сейсмогенный уступ были пройдены две траншеи. В ходе проведенных исследований было установлено что формирование Кичерской палеосейсмогенной структуры, в том числе и основного фронтального уступа происходило на протяжении верхнего плейстоцен — голоцена, особенно интенсивно в периоды тектонической активизации. Последняя активизация относится к позднему голоцену. Сейсмогенные дислокации в зоне Кичерского сброса проявляются в полосе шириной до 500 м и более. Ближе к бортам впадины дислокации имеют более молодой возраст, что свидетельствует о расширении границы впадины за счет ее горного обрамления. Для позднечетвертичного времени приблизительно определена граница между завершением этапа последнего относительного сеймотектонического затишья и началом голоценовой сеймотектонической активизации в зоне разлома. Впервые в ходе проведенных траншейных исследований получены данные о внутреннем строении этой сейсмодислокации и параметрах единовременных подвижек (рис. 4,

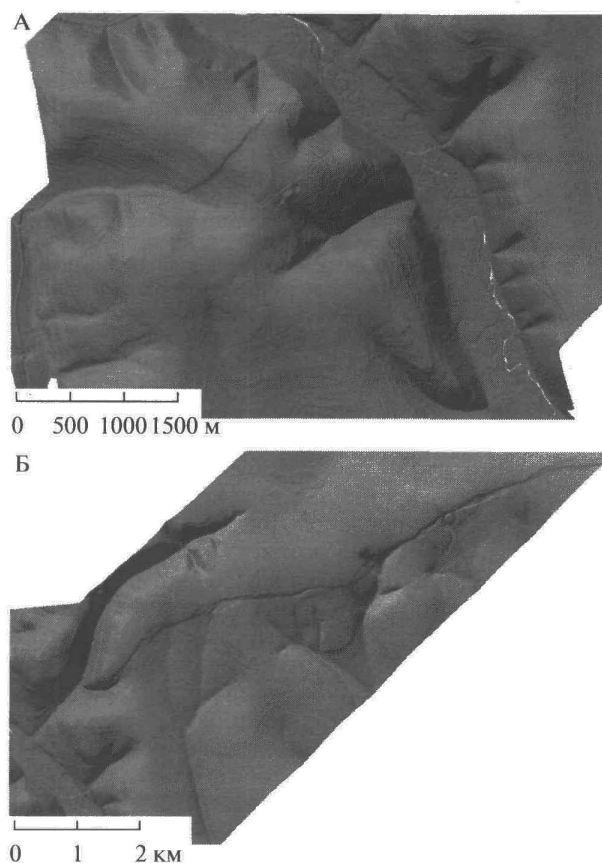


Рис. 3. Выраженность Чульмаканского разрыва на материалах лазерного сканирования по трассе проектируемой ВЛ-500 кВ Нерюнгри-Алдан. А – на правом берегу и Б – на левобережье р. Чульмакан (масштабы ЦМР разные). Обращает на себя внимание отсутствие видимых следов смещений в долине р. Чульмакан и наличие отчетливых приразломных грабенов на опущенном крыле разрыва

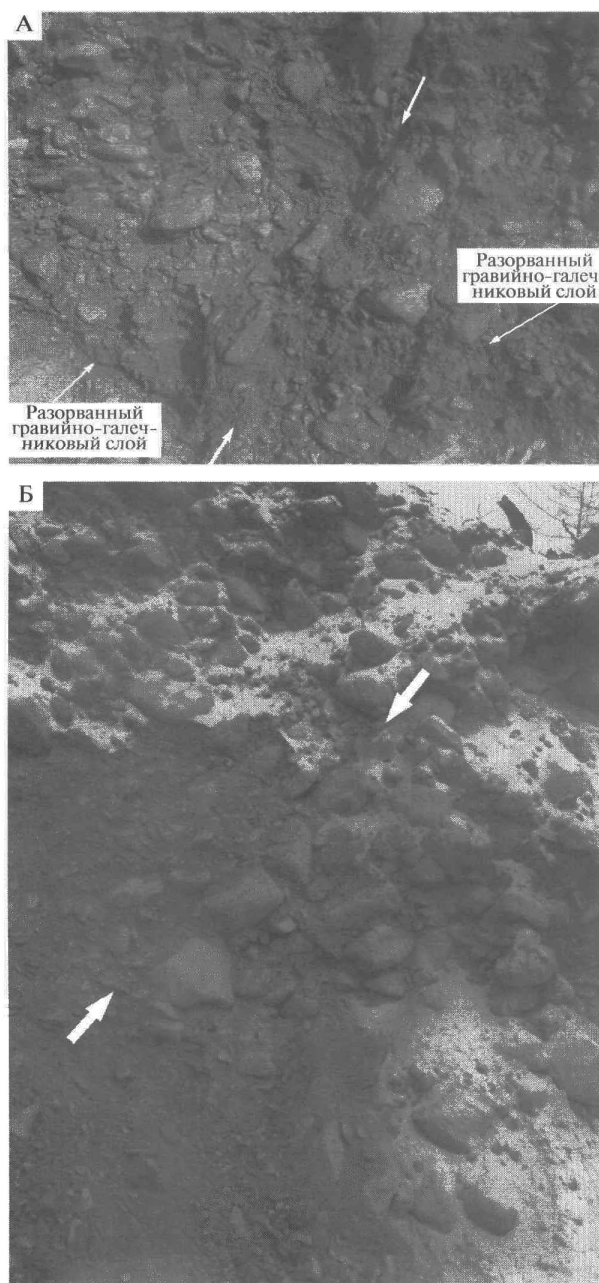


Рис. 4. Фрагменты деформированных слоев валунно-галечниковых отложений Кичерской палеосейсмогенной структуры в верхней (А) и нижней (Б) частях канавы

рис. 5). В частности, установлено, что сейсмогенные сбросовые уступы на конусах выноса сформированы в результате нескольких (2–3) разрывообразующих землетрясений происходивших с интервалами в 2–3 тысячи лет. По предварительным оценкам за период с конца позднего плейстоцена произошло, как минимум, три разрывообразующих землетрясения [21].

При этом, исходя из соотношений амплитуда смещения – магнитуда, рассчитанных эмпирически для современных дислокаций, последняя (для значения $MD = 3–5$ м, “maximum displacement”) принимает значения $M = 7.15$ или $M = 7.04$ [30]. Установленная протяженность Кичерских дислокаций составляет около 26 км. Амплитуда смещения 2.5–3 м согласуется с такой протяженностью разрывов, т.е. не выходит за пределы соотношений между этими параметрами,

полученными по совокупности данных для исторических и современных землетрясений [22, 23].

В разрезе канавы отчетливо выражен сбросовый характер смещения по разлому. Есть признаки (специфические трещины – клинья или крэки), указывающие на вероятное выполаживание плоскостей сместителя на небольших глубинах, и



Рис. 5. Задокументированная горная канава — тренчинг через Кичерскую палеосейсмогенную структуру
 1 — современный почвенно-растительный слой черного цвета, представленный супесью с включениями валунов и гальки; 2 — гравийно-галечниковый грунт с крупнозернистым песчаным заполнителем; 3 — валунно-галечниковый грунт с грубозернистым песчаным заполнителем; 4 — крупный щебень и небольшие глыбы; 5 — прослой сортированного ориентированного по напластаванию гравийно-галечникового аллювия; 6 — разломы с видимым смещением отчетливо выраженные в стенках канавы (а) и предполагаемые разрывы (б); 7 — песчано-галечниковые прослои с четко ориентированной слоистостью

возможный латеральный срыв слоев. Плоскость сместителя маркируется ориентированно расположенными вдоль нее уплощенными валунами, которые лежат в зоне рыхлого коллювия, заполняющего трещину раскрытия. Также отсутствуют следы существования козырькового выступа в строении приподнятого крыла. Кроме того, по разрезу широко развиты трещины, имеющие падение как в сторону впадины, так и в сторону горного обрамления, для которых характерна сбросовая кинематика. В основании уступа, вблизи к исходной наклонной поверхности, коллювием перекрыта еще одна клиновидная трещина, связанная с растяжением. Подобного вида трещины раскрытия имеют место и в строении взбросовых деформаций, но там они локализируются вблизи верхней бровки и возникают в результате изгиба или обрушения козырька надвинутого крыла под воздействием силы тяжести.

Главные деформации, обеспечивающие основную долю вертикальной амплитуды смещения, проецируются на центральную часть уступа (12–15 метры на разметке канавы, см. рис. 4). Здесь проходит условная граница между поднятым северо-западным и опущенным юго-восточным крыльями Кичерского разлома. Собственно, как таковых плоскостей смещений в данном месте разреза не сохранилось. Наблюдаемые линейные несогласия в рыхлых отложениях представляют собой поверхности осыпавшихся стенок крэков — трещин раскрывшихся в момент сброса.

Ранее неизвестный молодой разрыв, образовавшийся при сильных доисторических землетрясениях, был обнаружен В.М. Бесстрашновым в восточной части Чульманской впадины при анализе цифровой модели рельефа, построенной по материалам лазерного сканирования, проведенного по трассам магистрального нефтепровода Восточная Сибирь—Тихий океан и сопутствующей высотной линии электроснабжения (ВЛ-500 кВ) Нерюнгри-Алдан (см. рис. 2 и 3) [33]. Поскольку съемка проводилась именно по трассам, она захватила лишь часть общей протяженности этого нарушения (от 3 км при съемке по трассе магистрального трубопровода ВСТО до ~15 км по

трассе высоковольтной линии 500 кВ). За пределами полосы лазерного сканирования приразломный уступ был прослежен на космических снимках ALOS PRISM с разрешением 2.5 м. Его общая протяженность составила более 50 км. Разрыв проявляется в рельефе, как ярко выраженный уступ общей высотой до 10–12 м, нарушающий водораздельную поверхность, выработанную на близгоризонтально залегающей толще юрских угленосных отложений.

Полевые наблюдения подтверждают сбросовой характер движения по этому разлому и наличие незначительной лево-сдвиговой компоненты, составляющей 1.5–2.5 метра. Суммарное вертикальное смещение дневной поверхности по сбросу на нескольких участках достигает 8–10.5 м. Широкое развитие приразломных грабенов в опущенном крыле у подножия основного уступа указывает на выполаживание плоскости разрыва на глубине и на наличие значительного поперечного растяжения при подвижках по разрыву, что должно учитываться при проектировании пересекаемых им сооружений. Величина поперечного растяжения оценена графическим методом, описанным в работе [30] (рис. 6).

В траншеях, пройденных через одну из ветвей основного уступа непосредственно вдоль трубопровода и через встречный уступ примерно по линии профиля 1.2 на рис. 3, выявлены следы двух подвижек, сформировавших наблюдаемые формы рельефа. Выработка, пройденная через основной уступ, вскрыла два горизонта погребенных почв, перекрытых коллювиальными клиньями (рис. 7). В канаве, пройденной через встречный оперяющий разрыв, обнаружены суглинистые отложения, накопившиеся в приразломном грабене после первой подвижки, а также следы разжижения обломочных грунтов, подстилающих эти суглинки, и их внедрения в толщу суглинков. По нашему мнению, разжижение скорее всего произошло при следующем землетрясении, даже если оно и не сопровождалось подвижкой по оперяющему разрыву.

Для определения возраста подвижек были отобраны образцы на ¹⁴C. Анализы выполнялись в лаборатории палеогеографии и геохронологии четвертичного периода факультета географии и геоэкологии СПбГУ. Дополнительная сложность связана с тем, что на этом участке на поверхность выходят пласты юрских углей, мелкие частицы которых могут загрязнить пробы. Их практически невозможно отделить от древесных углей позднечетвертичного возраста. Наиболее достоверные датировки получены для образца, отобранного из верхней погребенной почвы из разреза в опущенном крыле главного уступа. Возраст, определенный по гуминовым кислотам, выделенным из погребенной почвы, отделенной от угольков, соста-

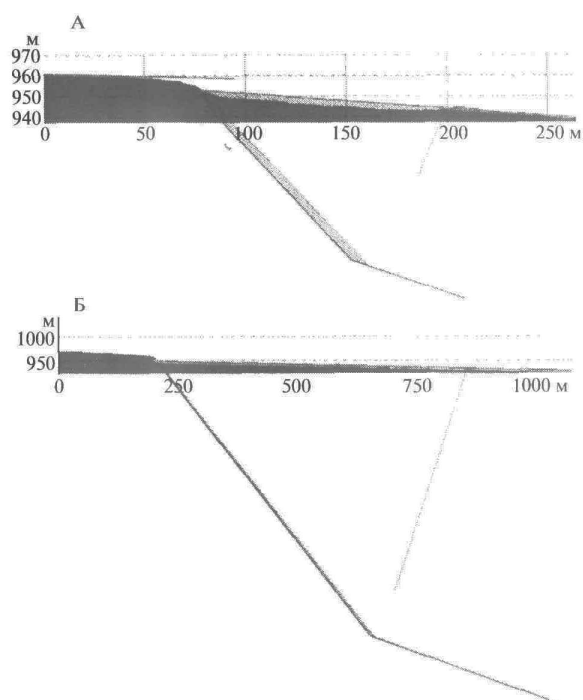


Рис. 6. Примеры определения поперечного растяжения по Чульмаканскому разлому графическим методом, описанным в работе [30, Fig. 3.19]. Положение профилей показано на рис. 7. А – по профилю 4.2 через узкий приразломный грабен. Поперечное растяжение ≈ 5 м. Б – по профилю 5.1 через широкий грабен, указывающий на выполаживание плоскости разрыва на большей глубине. Поперечное растяжение ≈ 4 м

вил 3650 ± 160 лет (ЛУ-6702А, cal BP), а по обломкам древесины, отобранным из той же пробы – 1600 ± 120 лет (ЛУ-6702В, cal BP). Калибровка производилась с использованием программы “CalPal” Кёльнского университета [35]. В ходе исследований было установлено, что отдельные фрагменты обломков древесины захоронены не *in situ*, а представляют собой корни более молодых растений. С другой стороны, возраст, определенный по гуминовым кислотам, соответствует некоторому среднему возрасту для периода формирования почвы, который в суровом климате Южной Якутии мог быть весьма продолжительным. На сегодня можно утверждать, что последняя подвижка по Чульмаканскому разлому заведомо моложе 3650 ± 160 и, возможно, моложе 1600 ± 120 лет. Остальные пробы дали существенно более древние возрасты (в частности, суглинки из заполнения приразломного грабена – 22060 ± 1090 лет, ЛУ-6701, cal BP), но, как уже отмечено, достоверность этих датировок недостаточна.

Следует обратить внимание на то, что Чульмаканский разлом нарушает толщу угленосных от-

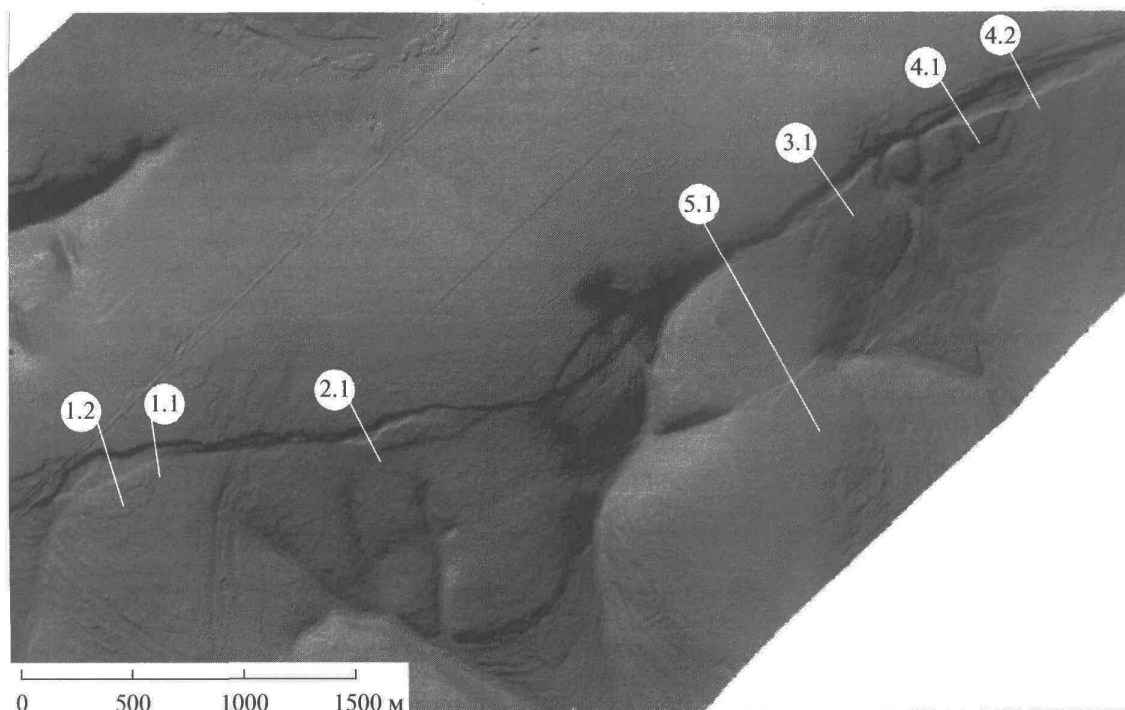


Рис. 7. Положение и номера профилей, построенных через уступ Чульмаканского разлома и приразломные грабены для определения величины возможного растяжения поперек разрыва. Прямая линия в левой части рисунка – нефтепровод ВСТО

ложений юрского возраста, залегающую близгоризонтально и без каких-либо признаков движений по разрыву за период между накоплением этих отложений и формированием уступа на современной водораздельной поверхности (рис. 8). Амплитуда перемещения отдельных пачек юрских углей сопоставима с амплитудой перемещения поверхности. Нет и морфоструктурных признаков, указывающих на сколько-нибудь длительную историю движений по этому нарушению. Это позволяет предполагать, что в данном случае мы имеем дело с чрезвычайно редким явлением – новообразованным разломом, выраженный в рельефе уступ которого образовался в результате 2 подвижек в позднечетвертичное время.

Судя по анализу профилей, построенных через уступ, величины смещения при отдельных подвижках могли составлять примерно $1/3$ и $2/3$ от общей высоты уступа, а максимальное вертикальное смещение при одном событии могло составлять порядка 7–8 м. Магнитуда землетрясения, при котором по разрыву протяженностью ~40 км могло произойти такое смещение, составляла 7.0–7.5, а его интенсивность должна была быть не менее 9 баллов по шкале MSK-64 [34].

Приведенные примеры, один из которых, Кичерская дислокация, относится к “заведомо” вы-

сокосейсмичному региону Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), сильная залесенность которого, однако, затрудняет поиск, картирование и детальное изучение палеосейсмодислокаций, а второй, Чульмаканский разлом – к району с редкими и не всегда уверенно выделяемыми палеосейсмодислокациями, иллюстрируют высочайшую эффективность метода лазерного сканирования при проведении палеосейсмологических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практика использования материалов лазерного сканирования примененная нами при изучении сейсмоактивных разломов трассы магистрального трубопровода ВСТО, убедительно показала, что необходимо и целесообразно переходить от использования материалов лазерного сканирования, сделанного по трассам магистральных трубопроводов и случайным образом пересекающих активные разломы или захватывающих их участки, к целенаправленному составлению полосовых карт активных разломов. Это позволит существенно пополнить каталог сейсмодислокаций Восточной Сибири, составленный коллективом лаборатории сейсмогеологии ИЗК СО РАН, и тем самым намного повысить объективность оценки сейсмической опасности для

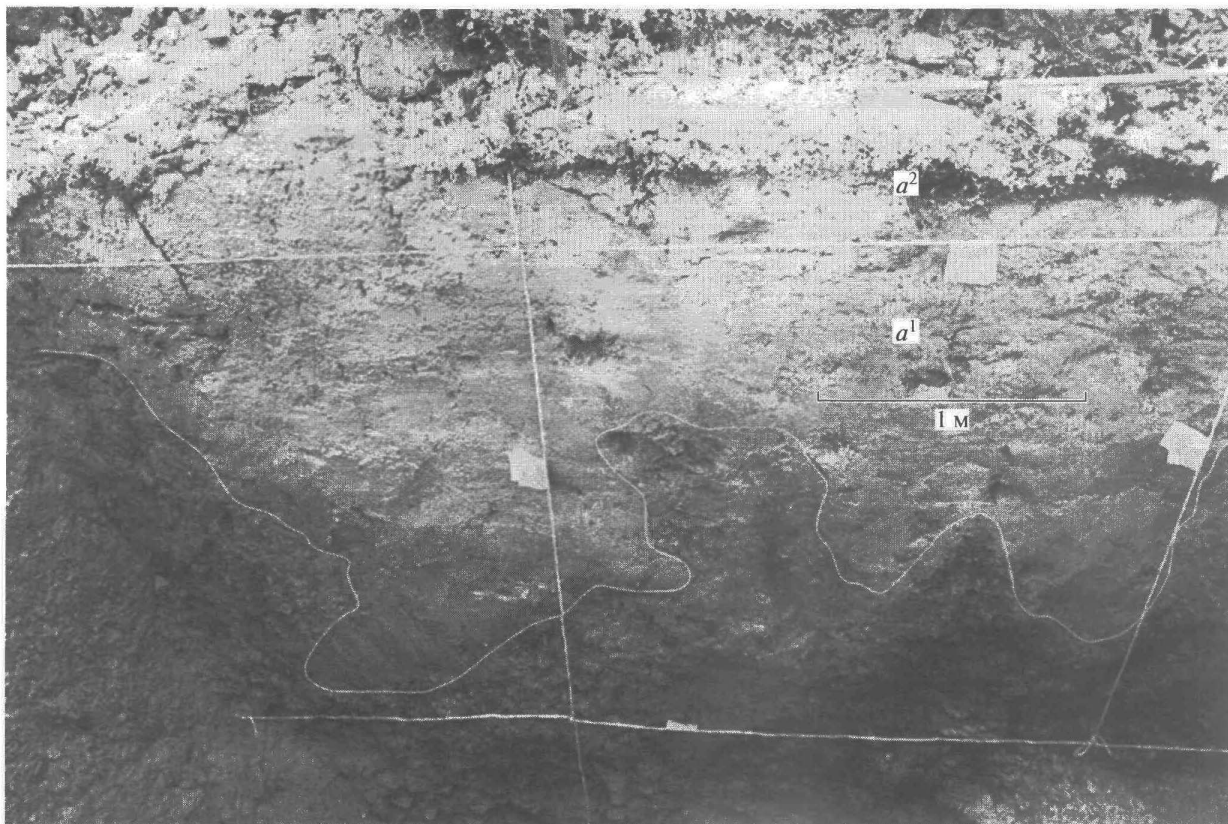


Рис. 8. Взаимоотношения алевролитов и углей (a^1), внедрившихся в толщу суглинистого горизонта (a^2) при сеismoгенном разжижении отложений, установленные в траншее-тренинге, пройденной через Чульмаканский разлом

этой территории. Анализ ЦМР, построенных по материалам лазерного сканирования, должен предшествовать полевым работам, что значительно повысит эффективность палеосейсмологических исследований.

Работа была выполнена при поддержке фонда РФФИ (гранты №№ 09-05-00727а, 10-05-00573а и 12-05-00767а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович К.И., Карк И.М., Корольков В.Я., Мушкетов Д.И. Землетрясение в северных цепях Тянь-Шаня 22 декабря 1910 г. // Труды Геол. ком. 1914. Вып. 89. 270 с.
2. Важенин Б.П. Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. 205 с.
3. Гоби-Алтайское землетрясение. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 392 с.
4. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья / Под ред. В.П. Солоненко. М.: Наука, 1966. 230 с.
5. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктурная тектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 201 с.
6. Копп М.Л., Расцветаев Л.М., Трифонов В.Г. Тектонические трещины, образовавшиеся при голоценовом землетрясении Центрального Копетдага и его предгорий // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1964. № 7. С. 59–69.
7. Корженков А.М. Сейсмогеология Тянь-Шаня (в пределах территории Кыргызстана и прилегающих районов). Бишкек: Илим, 2006. 289 с.
8. Кучай В.К. Использование палеосейсмодислокаций при изучении сейсмического режима (на примере плейстоценовой области Чаткальского землетрясения 1946 г.) // Геология и геофизика. 1971. № 4. С. 124–129.
9. Кучай В.К. Зонный орогенез и сейсмичность. М.: Наука, 1981. 164 с.
10. Лукьянов А.В. Горизонтальные движения по разломам, происходящие при современных катастрофических землетрясениях // Разломы и горизонтальные движения земной коры. М.: изд-во АН СССР. 1963. С. 34–112.
11. Мушкетов И.В. Верненское землетрясение 28 мая (9 июня) 1887 г. // Труды Геол. ком. 1889. Т. 10. Вып. 1. С. 9–41.
12. Никонов А.А. Палеосейсмогеологический подход при сейсмическом районировании и оценке сейсмической опасности // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2–3. М.: Наука, 1995. С. 46–62.

13. *Никонов А.А., Ваков А.В., Веселов И.А.* Сейсмо-тектоника и землетрясения зоны сближения Памира и Тянь-Шаня. М.: Наука, 1983. 240 с.
14. *Овсяченко А.Н., Трофименко С.В., Мараханов А.В., Карасев П.С., Рогожин Е.А.* Сейсмо-тектоника переходной области от Байкальской рифтовой зоны к орогенному поднятию Станового хребта // Геотектоника. 2010. № 1. С. 29–51.
15. *Овсяченко А.Н., Трофименко С.В., Мараханов А.В., Карасев П.С., Рогожин Е.А., Имаев В.С., Никитин В.М., Гриб Н.Н.* Детальные геолого-геофизические исследования зон активных разломов и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 4. С. 55–74.
16. *Олейников А.В., Олейников Н.А.* Палеосейсмогеология. Владивосток: изд-во Далькнига, 2009. 209 с.
17. *Рогожин Е.А., Платонова С.Г.* Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: изд-во ИФЗ РАН, 2002. 129 с.
18. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Отв. ред. В.П. Солоненко. Новосибирск.: Наука, 1977. 302 с.
19. *Солоненко В.П.* Новосибирск.: изд-во СО РАН, 2004. 182 с.
20. *Солоненко В.П., Флоренсов Н.А.* Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 г. // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1960. № 10. С. 85–89.
21. *Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С., Бесстрашнов В.М., Мельников А.И.* Палеосейсмогеологические исследования зоны Кичерского разлома (Северное Прибайкалье) // Тихоокеанская геология, 2007. Т. 26. № 2. С. 82–92.
22. *Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С.* Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // Геотектоника. 2010. № 2. С. 77–96.
23. *Стром А.Л.* Сопоставление параметров современных и палеосейсмо-тектонических дислокаций // Физика Земли. 1993. № 9. С. 38–42.
24. *Трифонов В.Г.* Позднечетвертичный орогенез М.: Наука, 1983. 224 с.
25. *Трифонов В.Г.* Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С. 81–92.
26. *Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.И.* Изучение и картирование активных разломов // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: РАН, 1993. Т. 1. С. 198–206.
27. *Хромовских В.С., Солоненко В.П., Семенов Р.М., Жилкин В.М.* Палеосейсмогеология Большого Кавказа. М.: Наука, 1979. 188 с.
28. Living on the active Earth. Washington: The National Academic Press, 2003. 407 p.
29. *McCalpin J.P.* Paleoseismology N.-Y.: Academic press, 1996. 587 p.
30. *McCalpin J.P.* Paleoseismology (second edition). International Geophysics Series. 2010. Vol. 95. 614 p.
31. *McCalpin J.P., Khromovskikh V.S.* Holocene paleoseismicity of the Tunka fault, Baikal rift, Russia // Tectonics. 1995. Vol. 14. № 3. P. 594–605.
32. *Yeats R.S., Sieh K., Allen C.R.* The Geology of Earthquakes. New York: Oxford University Press, 1997. 567 p.
33. *Strom A.L., Besstrashnov V.M., Imaev V.S., Chipizubov A.V.* Paleoseismology of Chulman basin (Southern part of the Siberian platform // Harbin press associated. Conference materials. 2009. P. 11–19.
34. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Am. 84. 1994. P. 974–1002.
35. *Wenger B., Joris O., Danzeglocke U.* Radiocarbon calibrate method // Radiocarbon Calibration News. May 2006. (www.calpal.de)

Рецензенты: В.Г. Трифонов, Е.А. Рогожин