

Строение поверхностных разрывов палеоземлетрясений в зоне Кубадринского разлома (Горный Алтай) по данным георадиолокации*

С. С. Бричёва^{1,2,3}, Е. В. Деев^{1,4}, О. В. Сафронов^{1,4}, А. Л. Энтин^{1,3}

¹Новосибирский государственный университет,
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

²Институт географии РАН,
Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

⁴Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптгоа, 3

Для цитирования: Бричёва, С. С., Деев, Е. В., Сафронов, О. В., Энтин, А. Л. (2024). Строение поверхностных разрывов палеоземлетрясений в зоне Кубадринского разлома (Горный Алтай) по данным георадиолокации. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 303–320. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.205>

Палеосейсмологические исследования в юго-восточной части Горного Алтая позволяют получить информацию о прошлых сейсмических событиях, их магнитуде, повторяемости, а также особенностях сейсмического режима региона. Система поверхностных разрывов палеоземлетрясений в зоне Кубадринского разлома была изучена на трех представительных участках методом георадиолокации в условиях слабоконсолидированных грубообломочных отложений верхней части разреза и развития мерзлоты. Геофизические исследования сопровождались аэрофотосъемкой с БПЛА и тренчингом, что позволило определить морфологические параметры палеосейсмодислокаций с высокой точностью и получить информацию об их глубинной структуре до 8 м для антенны 250 МГц и до 10 м для антенны 100 МГц. Анализ радарограмм показывает, что, помимо ранее определенных критериев, для выделения разломов существует еще ряд дополнительных признаков, позволяющих детализировать внутреннюю структуру системы сейсмогенных разрывов. Таковыми являются субвертикальные высокоамплитудные зоны, которые можно проследить на глубину до 6–8 м. Наличие таких зон можно объяснить трещиноватостью пород и отложений, их обводненностью, развитием процессов сейсмогенной флюидизации грунтов. Отложения колювиальных клиньев, сформировавшихся при разрушении поднятого крыла разлома, выделяются на радарограммах в виде чашеобразных западин с серией параллельных наклонных рефлекторов. Использование методики площадной георадарной съемки позволило расширить наши представления о строении палеосейсмодислокаций на большей площади. Полученные результаты продемонстрировали важность применения георадиолокации

* Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 21-17-00058. Тренчинговые исследования участка Бугузун 1 выполнены в рамках госзадания ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2022-0001). Аэрофотосъемка с БПЛА и фотограмметрическая обработка изображений выполнены с использованием аппаратного и программного обеспечения, предоставленного Центром коллективного пользования «Геопортал МГУ».

при изучении поверхностных разрывов палеоземлетрясений как на стадии определения местоположения и кинематики сейсмогенных разрывов до проходки траншеи, так и на этапе обоснования истории формирования разломных уступов.

Ключевые слова: поверхностные разрывы, палеоземлетрясения, георадиолокация, Кубадринский разлом, Горный Алтай.

1. Введение

Палеосейсмологические исследования направлены на выявление потенциально опасных сейсмических зон, они позволяют получить представление о максимально возможных магнитудах землетрясений в отдельном регионе, уточнить его сейсмический режим и оценить его опасность. Методически это направление геологии основано на предположении, что сильные сейсмические события прошлого оставляют на поверхности следы — палеосейсмодислокации, по которым можно оценить масштаб сейсмических событий, их возраст и повторяемость.

Геофизические методы применяются в палеосейсмологии наряду с классическими визуальными методами изучения морфологии разломных уступов и траншейными исследованиями (McCalpin, 1996). С их помощью оперативно определяется малоглубинная стратиграфия, выявляются смещенные, наклоненные слои в зоне разлома, разрывы прослеживаются на большую глубину, чем это доступно в траншеях. Кроме этого, они позволяют идентифицировать сегменты разлома без явных признаков поверхностных смещений или перекрытые рыхлыми отложениями. Успешное применение геофизических методов на разрывных нарушениях основано на том, что плотность, водонасыщенность и структурные характеристики отложений и пород в зоне разлома отличаются от параметров первичной ненарушенной среды.

Георадиолокация входит в число геофизических методов, часто применяемых при изучении разломных зон, благодаря высокой производительности и разрешающей способности метода. Метод позволяет выявить особенности зоны разлома (участки повышенной трещиноватости, разрывы и смещения литологических границ, области переувлажнения или повышения содержания глинистых частиц) даже в тех местах, где тренчинг трудноосуществим. Определенные трудности возникают при интерпретации данных георадиолокации, полученных на грубообломочных слабоконсолидированных толщах. К таким часто относятся отложения предгорных и внутригорных впадин, в которых формируются первичные палеосейсмодислокации. Для уточнения строения сейсмогенных разрывов прибегают к георадарному профилированию вкрест поверхностных разрывов (Reiss et al., 2003; Roberts et al., 2010; Lunina et al., 2016; Lunina et al., 2019; Lunina et al., 2023); вдоль стенок траншей (Anchuela et al., 2016; Zhang et al., 2023). Среди направлений развития метода для разломных зон выделяются использование разнообразных процедур атрибутного анализа радарограмм по аналогии с сейморазведкой (McClymont et al., 2008; Ercoli et al., 2020); численное моделирование (Bricheva et al., 2021b); комбинирование данных, полученных на различных частотах (Zhang et al., 2019; Bricheva et al., 2021a); комплексирование нескольких геофизических методов (Chwatal et al., 2005), а также применение методики площадной съемки, позволяющей очень детально отобразить подповерхностные структуры (Tronicke et al., 2006; Ercoli et al., 2021).

Цель представляемой работы — выявление характерных особенностей поверхностных разрывов палеоземлетрясений в зоне Кубадринского разлома Горного Алтая, локализованных в условиях слабokonсолидированных рыхлых отложений верхней части разреза, по данным георадиолокации.

2. Геологическая характеристика объекта исследования

Горный Алтай — часть системы внутриконтинентальных кайнозойских орогенов в северной части Центральной Азии, возникшей как отдаленный эффект коллизии Евразии и Индостана. Сокращение земной коры в его пределах, особенно усилившееся в начале четвертичного периода, сопровождается многочисленными землетрясениями. Наибольшая концентрация очагов инструментально зарегистрированных и исторических землетрясений наблюдается в юго-восточной части Горного Алтая (рис. 1). Очаги землетрясений здесь приурочены к Южно-Чуйской и Курайской зонам разломов, которые контролируют сочленение внутригорных впадин (Чуйской, Курайской и Кокоринской) и окружающих их хребтов (Южно-Чуйского, Северо-Чуйского, Сайлюгем и Курайского). Южно-Чуйская зона разломов сгенерировала самое сильное за инструментальный и исторический периоды наблюдений Чуйское (Алтайское) землетрясение (которое произошло 27 сентября 2003 г.; $M_s = 7.3$, $I_0 = IX$ баллов). Развернутыми в регионе с начала 1960-х годов сейсмологическими сетями вдоль Курайской зоны разломов регистрировались землетрясения только с $M \leq 5$ (Emanov et al., 2012). Нет в сейсмологических каталогах и данных об исторических землетрясениях, связанных с разломами зоны. Однако читаемые в рельефе многочисленные первичные палеосейсмодислокации и оползни указывают на то, что вдоль Курайской зоны разломов в геологическом прошлом происходили куда более сильные землетрясения (Deev et al., 2017; Deev et al., 2022a; Deev et al., 2022b; Deev et al., 2023a; Deev et al., 2023b; Deev, 2019; Deev et al., 2024; Turova et al., 2020).

Курайская зона разломов имеет положительную цветковую структуру. Ключевым разломом этой системы является Кубадринский (рис. 1). Нами исследована зона Кубадринского разлома на севере Кокоринской впадины. Согласно нашим данным, основная плоскость Кубадринского разлома проходит вдоль южного склона Курайского хребта от р. Кокоря до р. Сайлюгем, а ее сегменты расположены в виде левой кулисы. В западной части Кокоринской впадины перед фронтом Курайского хребта (абсолютные отметки до 3180 м) находится форберг с абсолютными высотами 2360–2600 м. Он ограничен с севера и юга взбросами, плоскости которых падают навстречу друг другу. Между форбергом и хребтом находятся узкие впадины шириной до 250 м, выполненные четвертичными отложениями. Смещение речных долин Курсакотугема (амплитуда 900 м) и Камтытыгема (450 м) с присутствием в них запирающих хребтов подтверждает тезис о том, что зона Кубадринского разлома, помимо взбросовой компоненты смещения, имеет выраженную правосдвиговую кинематику. Именно это сдвиговое смещение в условиях сжатия приводит к формированию цветковой структуры Курайской зоны разломов (Deev et al., 2022a).

Детальные структурно-геоморфологические исследования впервые позволили закартировать систему поверхностных разрывов, которая протянулась вдоль всего изученного фрагмента Кубадринского разлома на 22 км. Поверхностные разрывы вдоль зоны характеризуются выраженными в рельефе структурными признаками

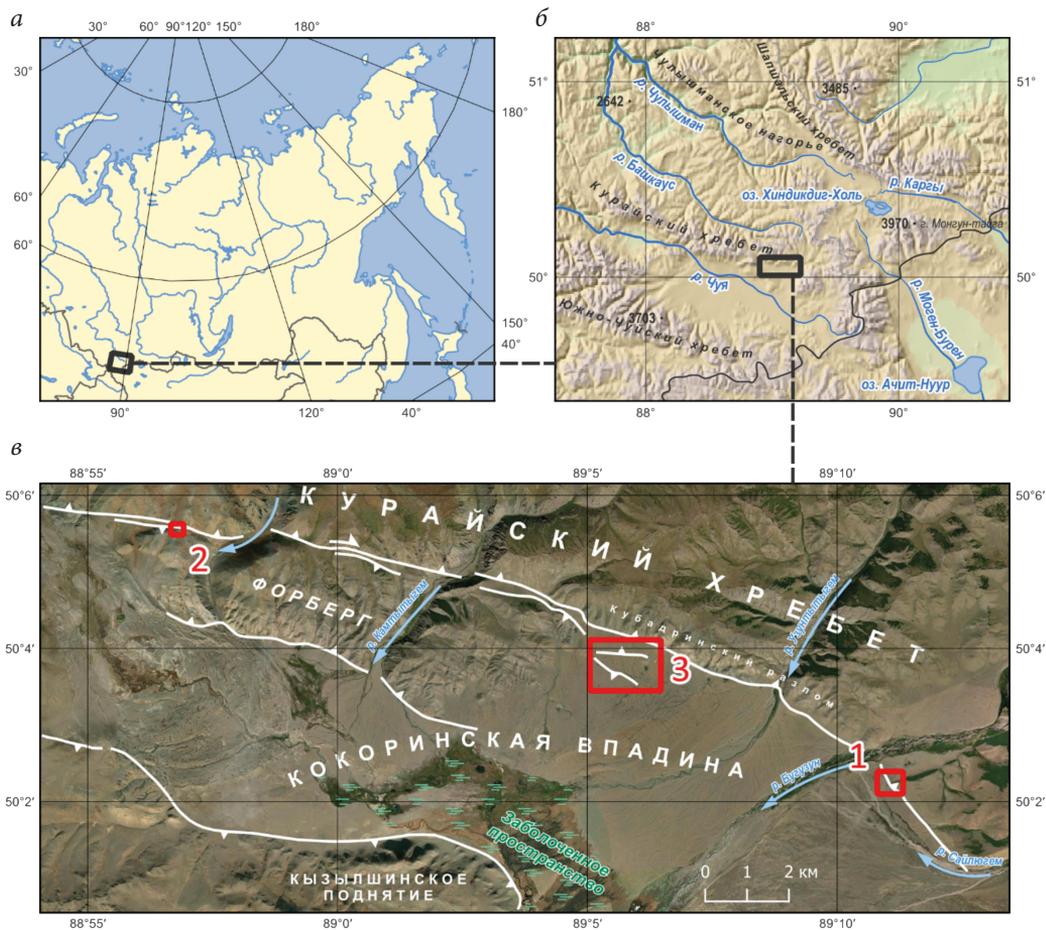


Рис. 1. Положение участка исследований на северо-востоке Евразии (а); на юго-востоке Горного Алтая (б); в зоне сочленения Курайского хребта и Кокоринской впадины (в). Основные морфоструктуры и активные разломы по (Deev et al., 2022a; Deev et al., 2022b) с изменениями. Красными прямоугольниками показаны участки георадарных исследований. В качестве основы использован снимок QuickBird. Доступно на: <http://earth.google.com>. (Дата доступа 20.08.2023)

в виде левых кулис и смещений русел водотоков (амплитуда до 21 м), которые свидетельствуют о правсдвиговой компоненте смещений. Вертикальная компонента смещения по поверхностным разрывам выражена в виде разломных уступов с поднятым южным или северным крылом (амплитуды вертикальных смещений — до 5 м). Морфоструктурный анализ и траншейные исследования на восточном фланге зоны поверхностных разрывов позволили обосновать формирование системы поверхностных разрывов в результате четырех палеоземлетрясений, Mw которых оценены в 6.7–7.6. Результаты радиоуглеродного датирования и археосейсмологических исследований согласованно указывают на то, что последние три палеоземлетрясения произошли не древнее 1.4 тыс. лет назад (Deev et al., 2022a; Deev et al., 2023a). Ниже мы приводим результаты георадарных исследований на трех ключевых участках системы поверхностных разрывов.

3. Методика исследований

На основе данных аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на различных участках системы поверхностных разрывов в зоне Кубадринского разлома построены детальные цифровые модели рельефа и мозаики фотоснимков, позволившие определять морфологические параметры палеосейсмодислокаций с точностью до 10–20 см.

В геофизических исследованиях применялся георадар «ОКО-3» (НПЦ «Геотех», г. Раменское, Россия) с антеннами 250 и 100 МГц. Разрешающая способность антенны 250 МГц оказалась не ниже 0.25 м, а глубинность достигала 6 м; антенны 100 МГц — не ниже 0.5 м, а глубинность достигала 12–15 м. Во все радарограммы был введен рельеф на основании цифровых моделей. Обработка производилась в стандартной программе CartScan. Процедуры обработки подбирались так, чтобы ослабить аппаратные и воздушные помехи (отражения от объектов в верхнем полупространстве), повысить соотношение сигнал/шум. Для высокочастотной антенны 250 МГц не применялась полосовая фильтрация, поскольку в спектре сигнала не было выраженных помех. В то же время высокая разрешающая способность антенны 250 МГц позволила связать границы на радарограмме с особенностями предполагаемой стратиграфии верхней части разреза или со стенкой траншеи и использовать эти данные для перевода радарограмм из масштаба времени (наносекунды) в глубину (метры). Среднее значение диэлектрической проницаемости, использовавшееся для такого перехода, составило 4.5. Помимо единичного профилирования, применялась площадная георадарная съемка (участки 1 и 2). При площадной съемке обработанные радарограммы собирались в трехмерный куб, который возможно анализировать по вертикальным и горизонтальным сечениям. Разломы на радарограммах проводились с учетом морфоструктурных исследований и данных тренчинга.

4. Результаты и их обсуждение

Участок 1. На юго-восточном фланге системы поверхностных разрывов (участок 1 на рис. 1) разломный уступ простирается по азимуту 140° между реками Бугузун и Сайлюгем на протяжении 3.5 км. На первых северо-западных 0.8 км сегменты разломного уступа с поднятым на 0.5–2 м северо-восточным крылом и западины вдоль их оснований образуют четко выраженную левую кулису (рис. 2 и 3, а). К юго-востоку высота разломного уступа увеличивается до 15–20 м, а его склон расщепляется на несколько более мелких уступов. Это говорит о том, что уступ сформировался в результате нескольких палеоземлетрясений. Разломный уступ нарушает толщу позднеплейстоцен-голоценовых водно-ледниковых, озерно-ледниковых, аллювиальных и пролювиальных отложений, мощность которых может достигать десятков метров. Гранулометрический состав отложений разнообразный: от алевритов до валунно-галечников. Непосредственно в верхних двух метрах разреза траншеей Бугузун 1 вскрыты преимущественно гравийно-галечники с песчаным заполнителем, а в основании уступа — разнозернистые пески, выполняющие структуру растяжения (рис. 3, б).

Вкрест одного из сегментов разломного уступа высотой около 2.5 м, где ранее была пройдена траншея Бугузун 1, выполнена серия из 10 профилей с шагом 1 м

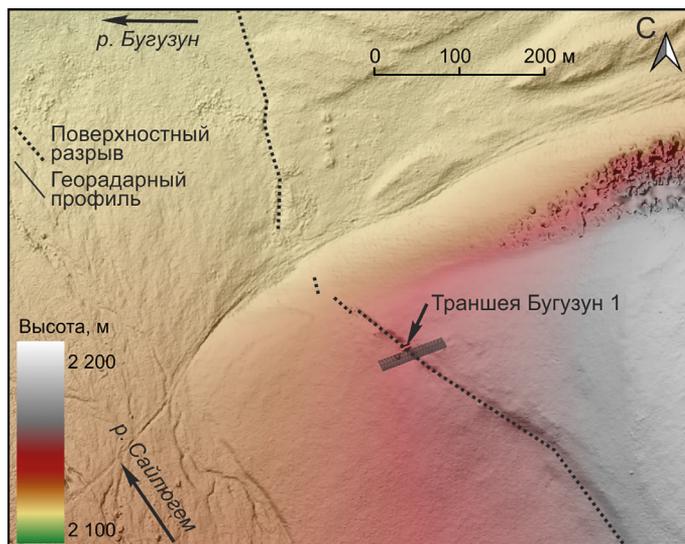


Рис. 2. Структура зоны поверхностных разрывов палеоземлетрясений на восточном фланге Кубадринского разлома и положение первого участка площадной георадарной съемки. В качестве подложки использована цифровая модель рельефа, полученная при съемке с БПЛА

(250 МГц) и 2 м (100 МГц) между ними (рис. 2 и 3, а). Длина каждого профиля составила 80 м.

На рис. 4 приведено сравнение результатов, полученных вдоль профиля 01, ближайшего к траншее, с антеннами 250 и 100 МГц. На радарограмме 250 МГц наблюдается отличие в характере отражений в приповерхностной части (георадарный комплекс I, 0–2 м): в поднятом северо-восточном крыле заметны небольшие смещения осей синфазности отражений, тогда как в опущенном крыле отражения гладкие, выдержанные по горизонтали. Причиной этого различия является разная степень нарушенности отложений по обе стороны от разрыва. На данных антенны 100 МГц картина верхних 2 м практически не меняется вдоль всего профиля. Здесь обращают на себя внимание только два разрыва осей синфазности с резким падением амплитуды: на отметках 28 и 35 м. В последнем случае этот признак хорошо соответствует положению взброса F1, выявленного в стенках траншеи Бугузун 1 (рис. 3, б).

Судя по разрезу траншеи Бугузун 1, приповерхностная часть сложена слоями гравийно-галечников. Резкое падение интенсивности отражений (георадарный комплекс II) глубже 2 м на большей части профиля, вероятно, связано с развитием многолетней мерзлоты. Тем не менее в интервале 37–45 м профиля (рис. 4) до глубины 10 м наблюдается субвертикальная зона с высокоамплитудными, прерывистыми отражениями (георадарный комплекс III). Ее границы выделяются по резкому падению амплитуды отражений. Эта область на георадарных профилях маркирует положение зоны поверхностного разрыва палеоземлетрясения, которая выражена в рельефе западиной, соответствующей трещине растяжения. Резкое увеличение глубинности зондирования здесь определяется тремя факторами: 1) деформированностью толщи гравийно-галечников в зоне разлома; 2) обводненностью этой зоны с деградацией многолетней мерзлоты; 3) движением флюидизированных

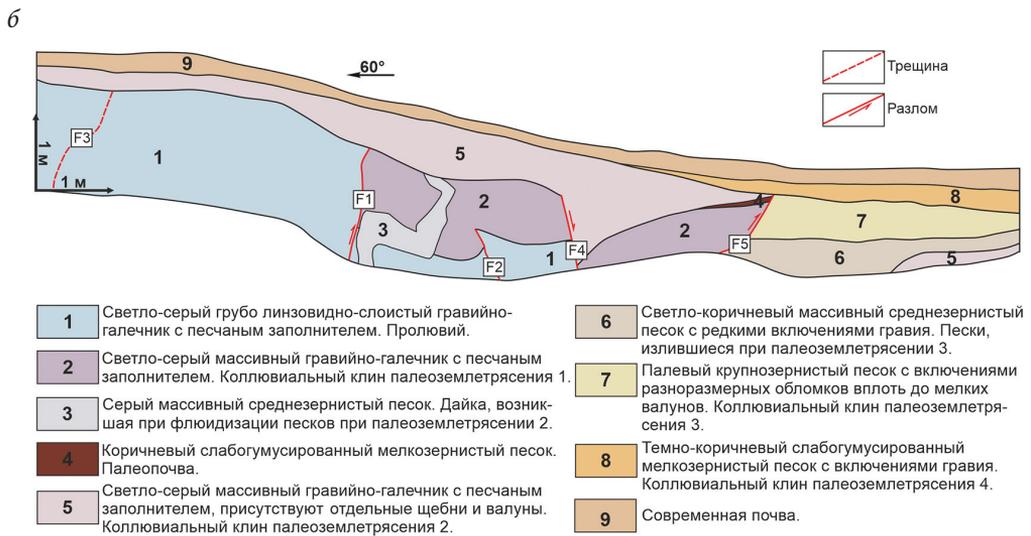


Рис. 3. Фрагмент системы поверхностных разрывов палеоземлетрясений к востоку от р. Бугузун. Сегменты разломного уступа и положение участка площадной георадарной съемки (**а**): белые стрелки — бровки сегментов разломного уступа, черные точечные линии — основания разломных уступов с локальными структурами растяжения; разрез юго-восточной стенки траншеи Бугузун 1 (**б**)

песков по этой зоне при палеоземлетрясении с формированием выделенного в траншее слоя 6 (рис. 3). На данных антенны 250 МГц (рис. 4, **а**) над георадарным комплексом III по чашеобразному понижению в основании уступа и сглаженной волновой картине его заполнения возможно выделить георадарный комплекс IV, соответствующий песчаным отложениям слоев 6–8 (рис. 3, **б**).

Еще одна высокоамплитудная зона присутствует в интервале 22–27 м профиля, выполненного с антенной 250 МГц (рис. 4). Она расположена в основании более древнего сглаженного разломного уступа на наклонной предгорной равнине. По аналогии мы можем предположить, что формирование аномалии связано с деградацией мерзлоты и обводненностью гравийно-галечников.

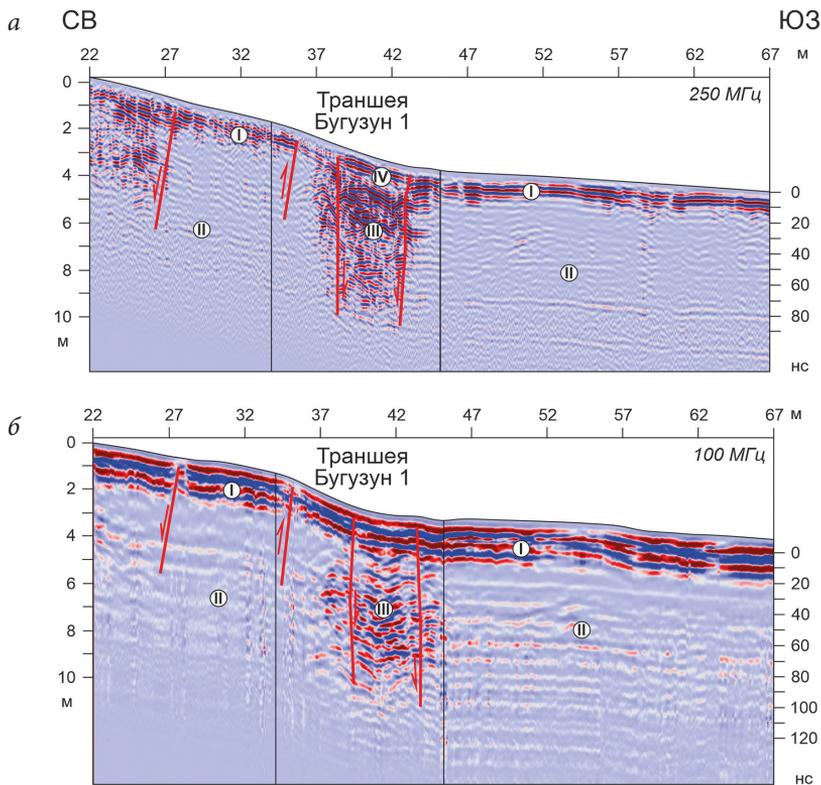


Рис. 4. Фрагменты георадарного профиля pr01 на первом участке исследований, 250 МГц (а) и 100 МГц (б). Красные линии — предполагаемые разломы и их кинематика. Римские цифры в кругах — георадарные комплексы

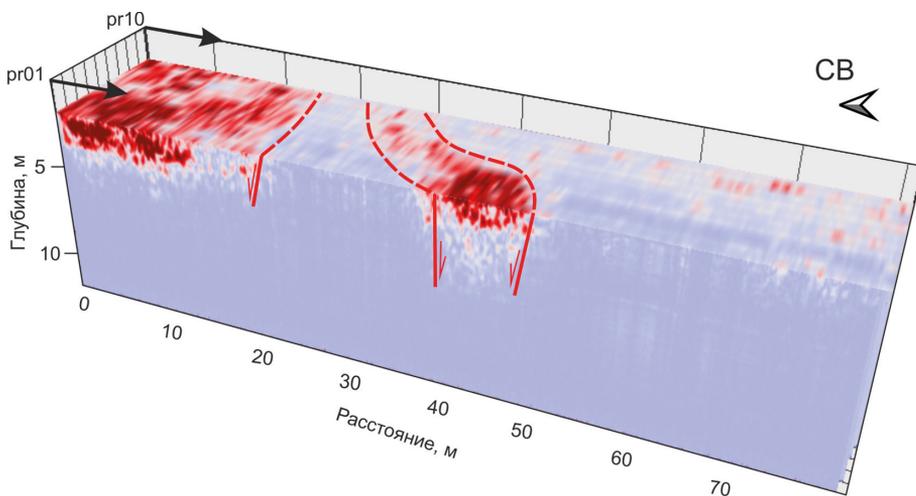


Рис. 5. Результат площадной георадарной съемки в виде трехмерного куба. Горизонтальное сечение проведено на глубине 2.3 м. Красные линии — разломы, пунктиром обозначены границы зоны разрывного нарушения

На серии профилей в виде трехмерного куба (рис. 5) видно, что выявленные особенности волновой картины сохраняются на всей площади профилирования, что исключает ошибки в интерпретации, связанные с локальной аномалией на единичном профиле.

Участок 2. На втором участке (см. рис. 1) поверхностные разрывы палеоземлетрясений прослеживаются вдоль разлома, ограничивающего северный склон форберга, растущего перед склоном Курайского хребта (рис. 6). Они образуют выраженную левую кулису, указывающую на праводвиговую компоненту смещений (рис. 6, а). Вертикальная компонента смещений выражена в формировании разломного уступа высотой до 2.5 м с южным поднятым крылом. Вкrest разломного уступа ранее была пройдена траншея Кокоринская-западная. В ее стенках вскрыты палеозойские сильно раздробленные песчаники, находящиеся в мерзлом состоянии уже на глубине 1 м. Высокая трещиноватость песчаников связана с их нарушенностью

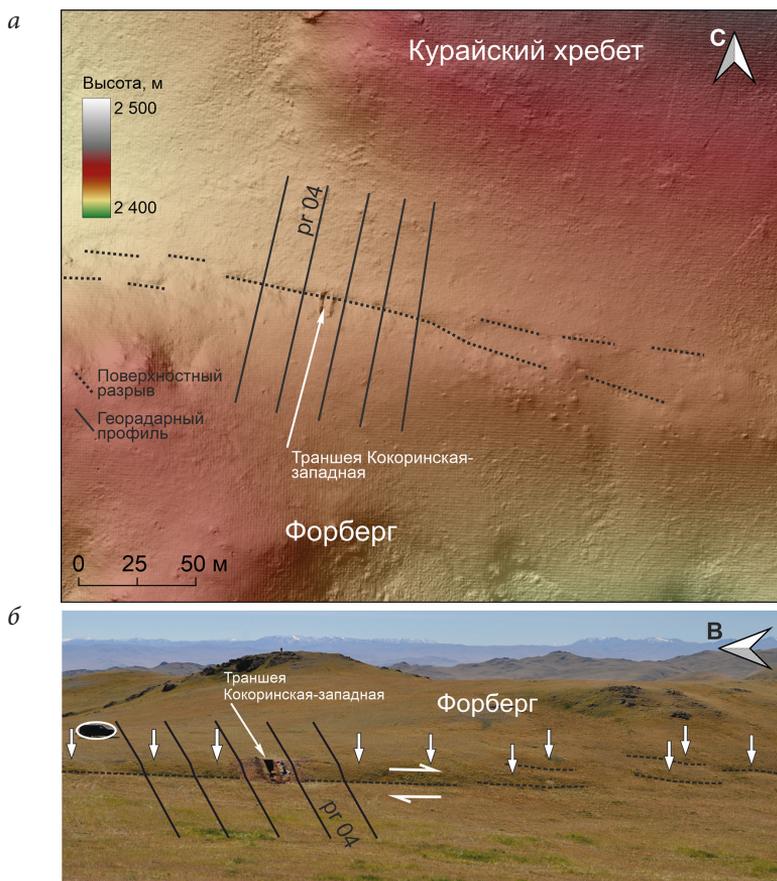


Рис. 6. Морфология поверхностных разрывов палеоземлетрясений и положение георадарных профилей на участке 2: вид сверху (а), в качестве подложки использована цифровая модель рельефа, полученная при съемке с БПЛА; вид на юг с Курайского хребта (б), белыми стрелками показана бровка разломного уступа, черным пунктиром — его основание, белые линии — георадарные профили. Машина в овале для масштаба

серией взбросов и надвигов с южным падением, выделенных вдоль всего склона разломного уступа. Амплитуды смещения по разломам в большинстве своем составляют первые десятки сантиметров и только у одного из них достигают 2.2 м. Эти разломы возникли в результате четырех палеоземлетрясений, а соответствующие коллювиальные клинья представлены щебенниками. В основании уступа траншеей вскрыт небольшой ров, северный борт которого ограничен падающими на юг сбросами, также характеризующимися небольшими амплитудами смещений.

Георадарные исследования проведены по пяти параллельным профилям с шагом 20 м с антеннами 250 и 100 МГц. Длина профилей — 100 м.

На рис. 7 приведено сопоставление данных с двух антенн вдоль ближайшего к траншее профиля. Наиболее глубокие отражения на этом участке соответствуют 4 м на профиле с антенной 250 МГц и 6 м с антенной 100 МГц и располагаются в зоне разрывного нарушения, которая, как и на участке 1, характеризуется субвертикальной зоной с высокими амплитудами отражений (георадарный комплекс I). В опущенном крыле до глубины 1–2 м в зависимости от использованной антенны прослеживаются субгоризонтальные границы (георадарный комплекс II), практически без смещения осей синфазности. В поднятом крыле к югу от зоны разлома видны многочисленные отражатели, формирующие гиперболы дифракции

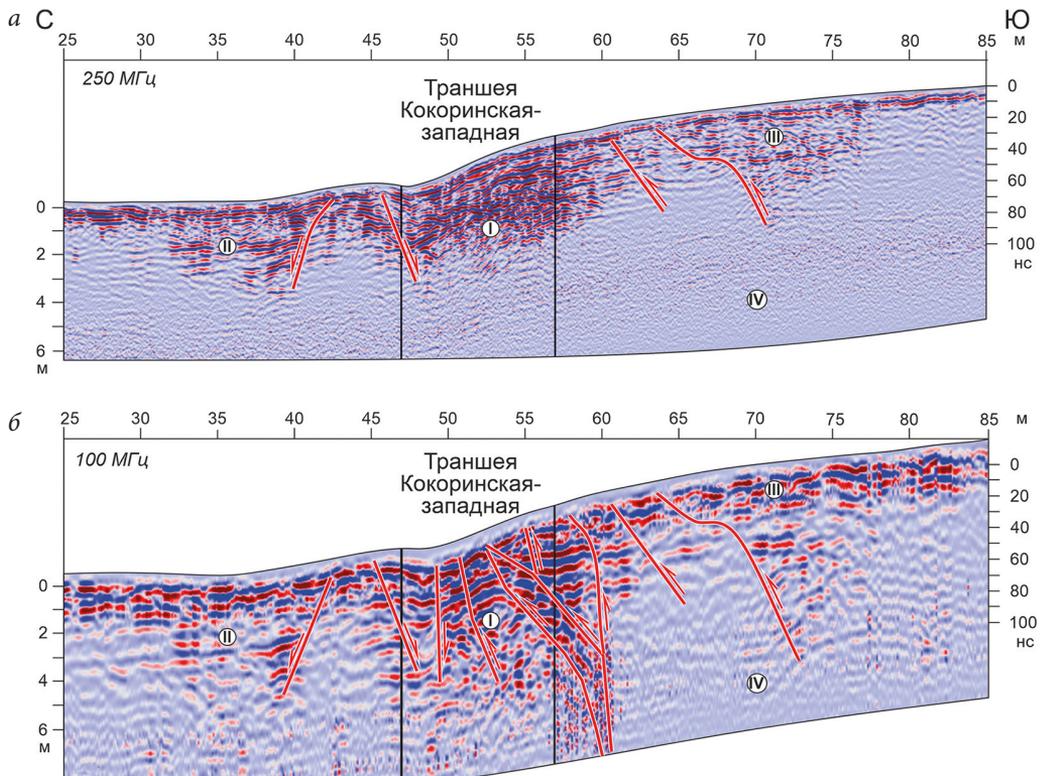


Рис. 7. Фрагменты георадарного профиля rг04 вблизи траншеи Кокоринская-западная 250 МГц (а) и 100 МГц (б). Обозначения такие же, как на рис. 4

(георадарный комплекс III). Эта картина характерна для сильно трещиноватых горных пород. На глубине более 3 м в опущенном крыле и 2 м в поднятом крыле располагаются отложения, формирующие георадарный комплекс IV, он характеризуется отсутствием отражений и ярко выраженной шумовой компонентой. Это — отложения и коренные породы, переходящие в мерзлое состояние.

Различия в волновых картинах георадарных комплексов и смещения осей синфазности позволяют наметить на разрезах самостоятельные разломы. Их морфология и кинематика в целом соответствуют таковым, установленным по данным тренчинга. Наиболее информативным в этом плане является профиль с антенной 100 МГц (рис. 7, б). В пределах склона разломного уступа на нем можно выделить серию малоамплитудных взбросов, в том числе образующих цветковую структуру. Такая структура хорошо согласуется с нашими морфоструктурными данными, указывающими на наличие правосдвиговой компоненты смещений при сейсмогенных подвижках. Показанные на рис. 8 пять параллельных профилей демонстрируют наличие интервала с сейсмогенными деформациями вдоль склона и подножия разломного уступа на всей площади участка 2.

Участок 3. В центральной части системы поверхностных разрывов, на наклонной предгорной равнине западнее р. Узунтытыгем, в рельефе читается молодая узкая (до 600 м) впадина, с двух сторон ограниченная встречными взбросовыми разломными уступами (см. участок 3 на рис. 1; рис. 9); высота южного уступа достигает 2.5 м, северного — 10 м. В пределах уступов в поднятие вовлекаются грубообломочные пролювиальные отложения.

На рис. 10 приведен профиль, проходящий через выраженный в рельефе южный уступ. В приповерхностной части (0–1 м, георадарный комплекс I), слабо меняющейся по профилю, обращает на себя внимание смена фазы на отметках 60, 77, 80 и 140 м. Она сопровождается разрывами осей синфазности в георадарном

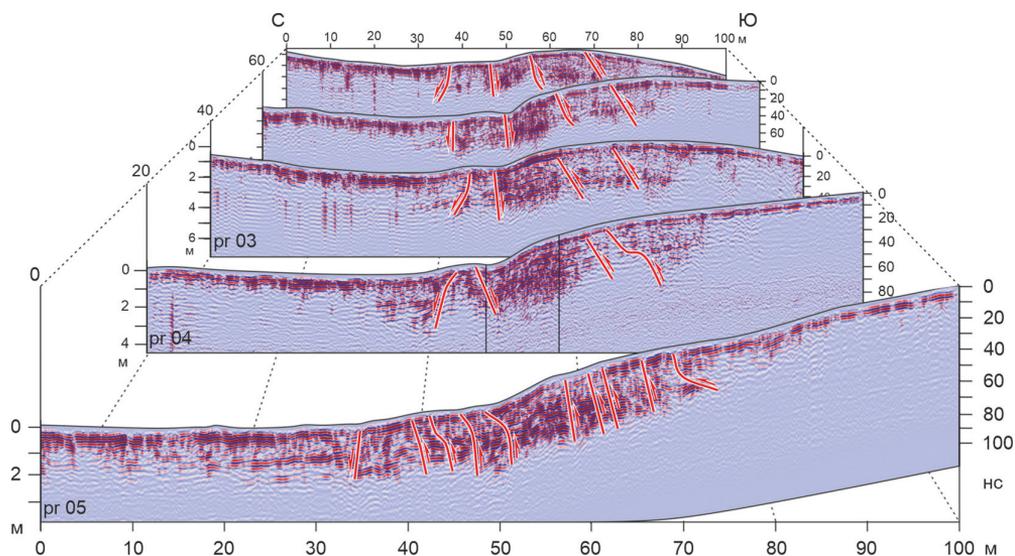


Рис. 8. Серия профилей через разломный уступ на участке 2, антенна 250 МГц. Красные линии — предполагаемые разломы и их кинематика

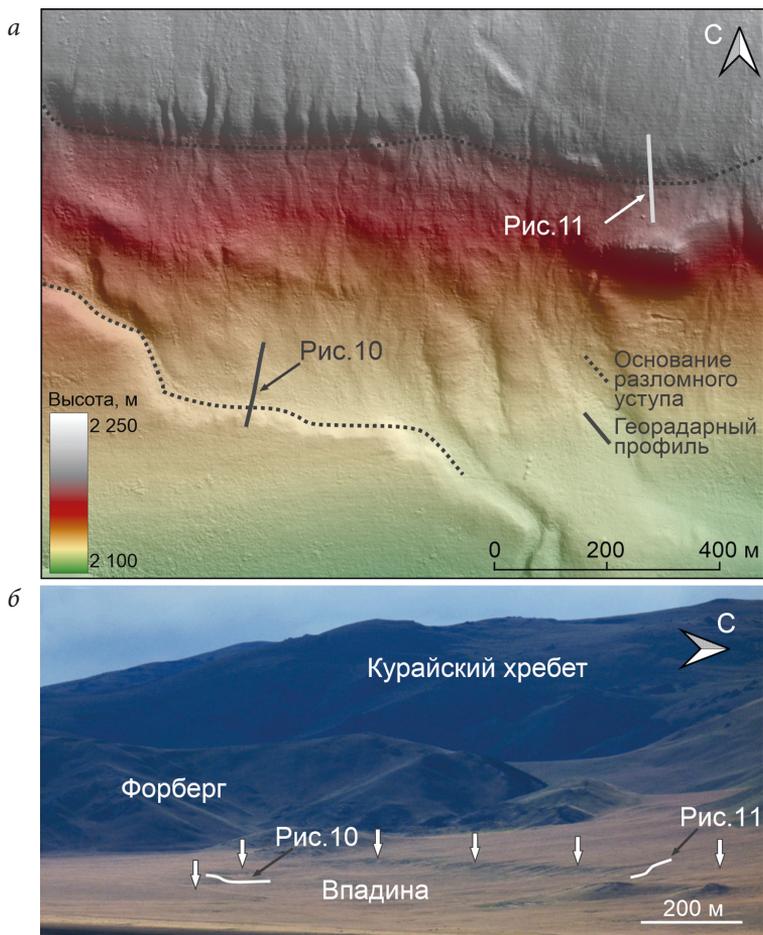


Рис. 9. Морфология поверхностных разрывов палеоземлетрясений и положение георадарных профилей на участке 3: *а* — вид сверху, в качестве подложки использована цифровая модель рельефа, полученная при съемке с БПЛА; *б* — вид на Курайский хребет, белыми стрелками показана бровка разломного уступа; белые линии — георадарные профили

комплексе II (2–6 м), что может являться признаком разрывных нарушений. Комплекс II характеризуется более низкой частотой записи и плавным убыванием амплитуд до минимальных значений в зоне комплекса V. Такой переход, как и на других участках, очевидно, связан с развитием мерзлоты. Волновая картина в пределах самого уступа крайне необычна — в ней ярко выражена серия параллельных наклоненных на север среднеинтенсивных отражений (георадарный комплекс III). На глубине 4–8 м отражения несогласно прилегают к высокоамплитудной границе (георадарный комплекс IV). Такое сочетание георадарных фаций вкупе с выделенными взбросами, оканчивающимися на разных стратиграфических уровнях, говорит в пользу двухэтапного формирования разломного уступа. После первой подвижки он был значительно эродирован с формированием отложений (коллювиальный клин), соответствующих георадарному комплексу III.

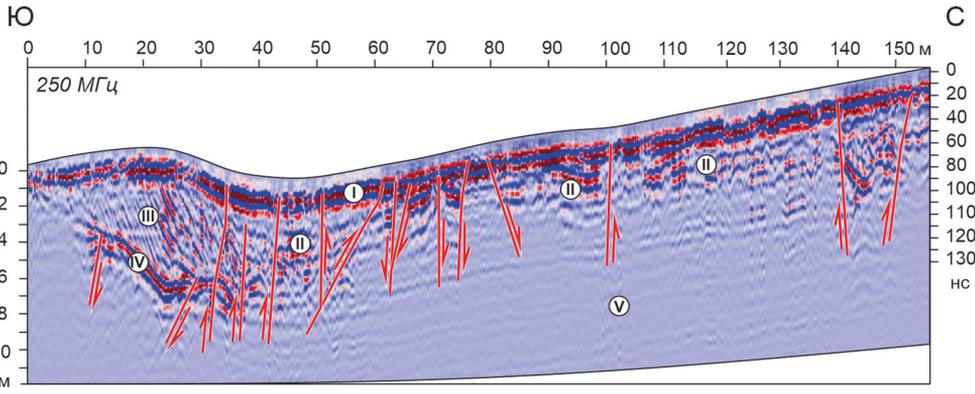


Рис. 10. Георадарный профиль, пересекающий южный уступ в тектонической впадине на наклонной предгорной равнине перед фронтом Курайского хребта (участок 3), антенна 250 МГц. Обозначения такие же, как на рис. 4

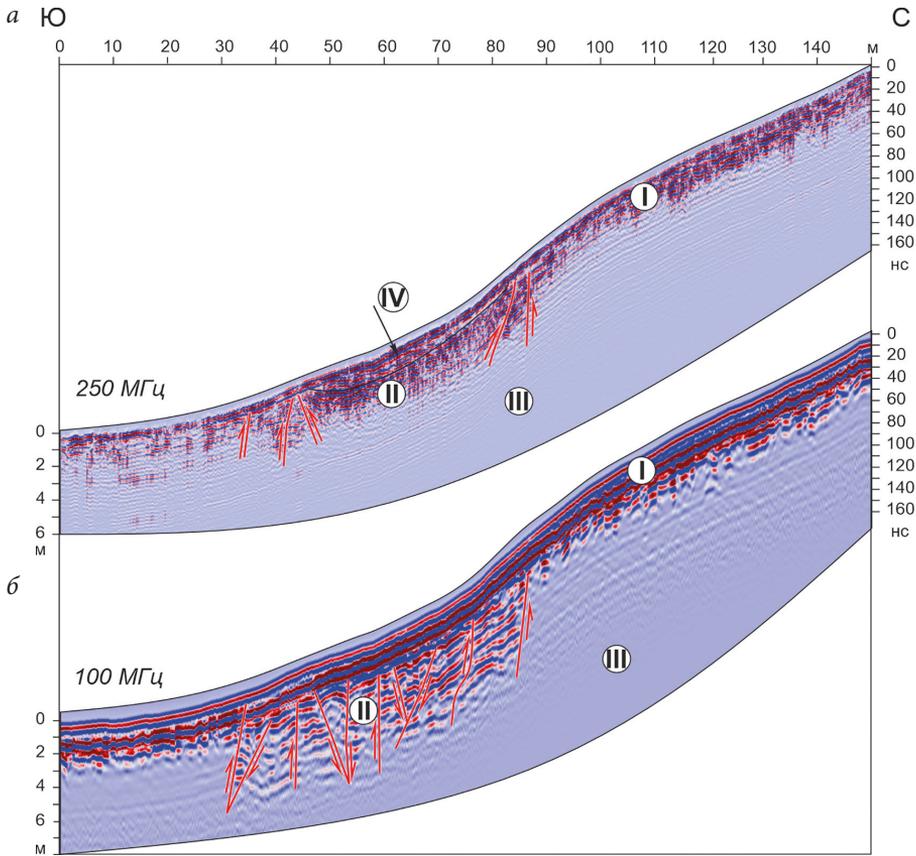


Рис. 11. Георадарный профиль, пересекающий северный уступ в тектонической впадине на наклонной предгорной равнине перед фронтом Курайского хребта (участок 3), антенна 250 МГц (а), 100 МГц (б). Обозначения такие же, как на рис. 4

Северный уступ был изучен с антеннами 250 и 100 МГц (рис. 11). Приповерхностная часть (георадарный комплекс I) здесь имеет стабильный характер на всем протяжении профиля: на данных 100 МГц отражения субгоризонтальные, на данных 250 МГц есть небольшие отличия в поднятом и опущенном крыле, связанные с высокой разрешающей способностью этой антенны. Наиболее значимые изменения происходят в центральной части профиля, у подножия уступа: георадарный комплекс II представляет собой субвертикальную зону с низкочастотными высокоамплитудными отражениями, разрывы осей синфазности наблюдаются до глубины 6–8 м и маркируют положение разломов сбросовой и взбросовой кинематики. Георадарные комплексы I и II вниз по разрезу сменяются комплексом III, который характеризуется более низкой частотой записи и плавным убыванием амплитуд до минимальных значений, что связано с наличием мерзлоты. На данных антенны 250 МГц в приповерхностной части разломной зоны можно выделить чашеобразное понижение, отражения внутри него имеют малую амплитуду, в них хорошо читается горизонтальная слоистость (георадарный комплекс IV). Вероятно, он маркирует положение отложений коллювиального клина, сформировавшегося при разрушении поднятого крыла уступа. Отложения, расположенные ниже 8 м, преимущественно проводящие, чем можно объяснить резкое затухание амплитуды отражающих границ (комплекс III).

5. Выводы

В настоящее время георадиолокационные исследования активно применяются при палеосейсмологических исследованиях для определения местоположения и кинематики сейсмогенных разрывов до проходки траншеи. Однако выделение разломов на радарограммах, полученных на грубообломочных слабоконсолидированных толщах, представляет определенные трудности: критерии выделения разломов могут отличаться в зависимости от индивидуальной специфики отложений, их обводненности, наличия мерзлоты и т. д. Использование георадиолокации совместно с тренчингом позволяет выявить эти критерии для каждой разломной зоны и подобрать оптимальную методику исследований, которая позволяет детализировать наши представления о строении палеосейсмодислокаций на большей глубине.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, проводились в пределах разломной зоны, секущей толщу позднеплейстоцен-голоценовых водно-ледниковых, озерно-ледниковых, аллювиальных и пролювиальных отложений. Гранулометрический состав отложений разнообразный: от песков до валунно-галечников, чем можно объяснить различие в волновых картинах зоны разлома. Анализ радарограмм показал, что, помимо ранее отмеченных критериев, для выделения активных разломов — разрывов осей синфазности и хаотических отражений в зоне разлома — существует еще ряд дополнительных признаков, позволяющих детализировать внутреннюю структуру системы сейсмогенных разрывов. Таковыми являются субвертикальные высокоамплитудные зоны, которые можно проследить на глубину до 10 м. Наличие таких зон можно объяснить трещиноватостью пород и отложений, их обводненностью, развитием процессов сейсмогенной флюидизации грунтов. Отложения коллювиальных клиньев, сформировавшихся при разрушении поднятого крыла разлома, выделяются на радарограммах в виде чашеобразных западин, серией параллельных наклонных рефлекторов. Анализ,

проведенный на участке 3, дал возможность, помимо выделения самих разломных плоскостей, обосновать двухэтапную историю их формирования, а соответственно и формирования южного разломного уступа. Использование площадной съемки позволило конкретизировать строение палеосейсмодислокаций на большей площади, а также исключить возможные технические погрешности записи на индивидуальном профиле. При этом глубинность зондирования резко ограничивается расположением кровли многолетней мерзлоты. Породы и отложения в мерзлом состоянии характеризуются низкой частотой спектра, плавным убыванием амплитуд до минимальных значений. В приповерхностной части отражения на радарограммах соответствуют литологическим комплексам, выделенным в траншеях.

6. Заключение

Система поверхностных разрывов палеоземлетрясений в зоне Кубадринского разлома Горного Алтая была изучена на трех представительных участках методом георадиолокации в условиях слабоконсолидированных грубообломочных отложений верхней части разреза и развития мерзлоты. Выявлены характерные особенности поверхностных разрывов по данным георадиолокации: смены фазы приповерхностных отражений, сопровождающиеся разрывами осей синфазности, субвертикальные высокоамплитудные зоны, низкочастотные области с плавным убыванием амплитуд до минимальных значений в кровле многолетнемерзлых пород; чашеобразные западины или серии параллельных наклонных рефлекторов, соответствующие отложениям коллювиальных клиньев. На одном из участков по данным георадиолокации обоснована двухэтапная история формирования разломного уступа. Использование площадной съемки позволило расширить наши представления о строении палеосейсмодислокаций на большей площади. Интерпретации радарограмм хорошо согласуются с данными тренчинга.

Таким образом, полученные результаты георадарных работ продемонстрировали важность применения их при изучении поверхностных разрывов палеоземлетрясений. Они существенно детализируют представления о площадном и глубинном строении активных разломов относительно локальных участков тренчинга, характеризующих строение верхних 2–3 м разломов. Ограниченность георадарного метода по глубине в условиях развития многолетней мерзлоты предполагает его дальнейшее комплексирование с более глубинными для данных условий методами зондирования, прежде всего с методами вертикального электрического зондирования и малоглубинной сейсморазведки.

Литература/References

- Anchuela, Ó. P., Lafuente, P., Arlegui, L., Liesa, C. L., Simón, J. L. (2016). Geophysical characterization of buried active faults: the Conclud Fault (Iberian Chain, NE Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 105, 2221–2239. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1283-y>
- Bricheva, S. S., Deev, E. V., Dubrovin, I. O., Doroshenkov, M. M., Entin, A. L., Panin, A. V., (2021a). Ground-penetrating radar evidence of faulting in unconsolidated coarse sediments. *Conference Proceedings, NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 2021, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120241>
- Bricheva, S. S., Dubrovin, I. O., Lunina, O. V., Denisenko, I. A., Matasov, V. M., Turova, I. V., Entin, A. L., Panin, A. V., Deev, E. V. (2021b). Numerical simulation of ground-penetrating radar data for studying the geometry of fault zone. *Near Surface Geophysics*, 19, 261–277. <https://doi.org/10.1002/nsg.12153>

- Chwatal, W., Decker, K., Roch, K. (2005). Mapping of active Capable Faults by high-resolution geophysical methods: examples from the Central Vienna Basin. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 97, 52–59.
- Deev, E., Borodovskiy, A., Entin, A. (2023a). Earthquake-induced deformation at archaeological sites in southeastern Gorny Altai (Siberia, Russia). *Archaeological Research in Asia*, 34, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.ara.2023.100431>
- Deev, E., Dublyansky, Y., Kokh, S., Scholz, D., Rusanov, G., Sokol, E., Khvorov, P., Reutsky, V., Panin, A. (2023b). Large Holocene paleoseismic events and synchronized travertine formation: a case study of the Kurai Fault Zone (Gorny Altai, Russia). *International Geology Review*, 65 (15), 2426–2446, <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2145510>
- Deev, E. V. (2019). Localization zones of ancient and historical earthquakes in Gorny Altai. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55 (3), 451–470. <https://doi.org/10.1134/S1069351319030030>
- Deev, E. V., Krzhivoblotskaya, V. E., Borodovskiy, A. P., Entin, A. L. (2022a). Active faults and late Holocene surface rupturing earthquakes in the Kokorya Basin (Gorny Altai, Russia). *Doklady Earth Sciences*, 506 (1), 666–670. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22700039>
- Deev, E. V., Turova, I. V., Borodovskiy, A. P., Zolnikov, I. D., Oleszczak, L. (2017). Unknown large ancient earthquakes along the Kurai fault zone (Gorny Altai): New results of paleoseismological and archaeoseismological studies. *International Geology Review*, 59 (3), 293–310. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1258675>
- Deev, E. V., Panin, A. V., Solomina, O. N., Bricheva, S. S., Borodovskiy, A. P., Entin, A. L., Kurbanov, R. N. (2024) Large paleoearthquakes and Holocene faulting in the Southeastern Gorny Altai: implications for ongoing crustal shortening in Central Asia. *International Geology Review*, <https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2333000>
- Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Kurbanov, R. N., Panin, A. V., Murray, A., Korzhenkov, A. M., Turova, I. V., Pozdnyakova, N. I., Vasiliev, A. V. (2022b). OSL dating of the Sukor earthquake-induced rockslide in Gorny Altai: paleoseismological and paleogeographic implications. *Russian Geology and Geophysics*, 63 (6), 743–754. <https://doi.org/10.2113/RGG20204300>
- Emanov, A. F., Emanov, A. A., Leskova, E. V., Kolesnikov, Y. I., Yankaitis, V. V., Filina, A. G. (2012). The Ms = 7.0 Uureg Nuur earthquake of 15.05.1970 (Mongolian Altai): The aftershock process and current seismicity in the epicentral area. *Russian Geology and Geophysics*, 53 (10), 1090–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.009>
- Ercoli, M., Cirillo, D., Pauselli, C., Jol, H. M., Brozzetti, F. (2021). Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, Southern Apennines, Italy». *Solid Earth*, 12, 2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
- Ercoli, M., Forte, E., Porreca, M., Carbonell, R., Pauselli, C., Minelli, G., Barchi, M. R. (2020). Using seismic attributes in seismotectonic research: An application to the Norcia Mw=6.5 earthquake (30 October 2016) in Central Italy. *Solid Earth*, 11, 329–348. <https://doi.org/10.5194/se-11-329-2020>
- Lunina, O. V., Denisenko, I. A., Gladkov, A. A., Braga, C. (2023). Enigmatic surface ruptures at cape Rytty and surroundings, Baikal Rift, Siberia: seismic hazard implication. *Quaternary*, 6, 22. <https://doi.org/10.3390/quat6010022>
- Lunina, O. V., Gladkov, A. S., Afonkin, A. M., Serebryakov, E. V. (2016). Deformation style in the damage zone of the Mondy fault: GPR evidence (Tunka basin, southern East Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 57 (9), 1269–1282. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.012>
- Lunina, O. V., Gladkov, A. S., Gladkov, A. A. (2019). Surface and shallow subsurface structure of the Middle Kedrovaya paleoseismic rupture zone in the Baikal Mountains from geomorphological and ground-penetrating radar investigations. *Geomorphology*, 326, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.009>
- McCalpin, J. P., ed. (1996). *Paleoseismology*. San Diego: Academic Press.
- McClymont, A. F., Green, A. G., Streich, R., Horstmeyer, H., Tronick, J., Nobes, D. C., Pettinga, J., Campbell, J., Langridge, R. (2008). Visualization of active faults using geometric attributes of 3D GPR data: an example from the Alpine Fault Zone, New Zealand. *Geophysics*, 73, B11–23. <https://doi.org/10.1190/1.2825408>
- Reiss, S., Reicherter, K. R., Reuther, C. (2003). Visualization and characterization of active normal faults and associated sediments by high-resolution GPR. *Geological Society, London, Special Publications*, 211, 247–55. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.20>
- Roberts, G. P., Raithatha, B., Sileo, G., Pizzi, A., Pucci, S., Walker, J. F., Wilkinson, M., McCaffrey, K., Phillips, R. J., Michetti, A. M., Guerrieri, L., Blumetti, A. M., Vittori, E., Cowie, P., Sammonds, P., Galli, P.,

- Boncio, P., Bristow, C., Walters, R. (2010). Shallow subsurface structure of the 2009 April 6 Mw 6.3 L'Aquila earthquake surface rupture at Paganica, investigated with ground-penetrating radar. *Geophysical Journal International*, 183, 774–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04713.x>
- Tronicke, J., Villamor, P., Green, A. G. (2006). Detailed shallow geometry and vertical displacement estimates of the Maleme Fault Zone, New Zealand, using 2D and 3D georadar. *Near Surface Geophysics*, 4, 155–161. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005041>
- Turova, I., Deev, E., Pozdnyakova, N., Entin, A., Nevedrova, N., Shaparenko, I., Bricheva, S., Korzhenkov, A., Kurbanov, R., Panin, A. (2020). Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai Fault Zone (Gorny Altai, Russia): Trenching and geophysical evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 197, 104399. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2020.104399>
- Zhang, D., Li, J., Liu, S., Wang, G. (2019). Multi-frequencies GPR measurements for delineating the shallow subsurface features of the Yushu strike slip fault. *Acta Geophysica*, 67, 501–515. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00271-9>
- Zhang, D., Li, J., Wu, Z., Ren, L. (2023). Reconstructing the geometry of the Yushu Fault in the Tibetan Plateau using TLS, GPR and trenching. *Remote Sensing*, 15 (8), 1994. <https://doi.org/10.3390/rs15081994>

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2023 г.
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Бричёва Светлана Сергеевна — bricheva@igras.ru
Деев Евгений Викторович — deev1@yandex.ru
Сафронов Олег Вадимович — o.safronov@g.nsu.ru
Энтин Андрей Львович — aentin@geogr.msu.ru

The structure of paleoearthquake surface ruptures along the Kubadru Fault (Gorny Altai): Ground-penetrating radar evidence*

S. S. Bricheva^{1,2,3}, E. V. Deev^{1,4}, O. V. Safronov^{1,4}, A. L. Entin^{1,3}

¹ Novosibirsk State University,
2, ul. Pirogova, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russian Federation

³ Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

⁴ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, pr. Akademika Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

For citation: Bricheva, S. S., Deev, E. V., Safronov, O. V., Entin, A. L. (2024). The structure of paleoearthquake surface ruptures along the Kubadru Fault (Gorny Altai): Ground-penetrating radar evidence. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 303–320. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.205> (In Russian)

* The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation project no. 21-17-00058. Trenching studies of the Buguzun 1 site were carried out within the framework of the state assignment of the A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences (project FWZZ-2022-0001). Aerial UAV survey and photogrammetric processing of the images were carried out with the hardware and software from the Centre of collective usage “Geoportal MSU”.

The Gorny Altai is part of the system of intracontinental Cenozoic orogens that originated from the Eurasia-India collision. There is crustal contraction, which is followed by numerous earthquakes, and the highest concentration of earthquake sources is observed in the south-eastern part of the region. The system of paleoearthquake surface ruptures in the Kubadru Fault Zone was studied at three representative sites using the GPR method in conditions of weakly consolidated coarse clastic deposits in the upper part of the section and permafrost development. UAV aerial photography and trenching supported the geophysical studies. By using a 250 MHz antenna, we determined morphological parameters of paleoseismic scarps with high accuracy and learned about the fault's deep structures up to 8 m. A 100 MHz antenna provided the same information up to 10 m. Identifying active faults by looking for reflection discontinuities and chaotic reflections is not enough. Additional features from GPR datasets are necessary to detail the internal structure of the seismogenic fault zone. These are subvertical high-amplitude zones that can be traced to depths of up to 6–8 metres. The presence of such zones can be explained by the fracturing of rocks and sediments, their waterlogging, the development of processes of seismogenic fluidization of soils. Deposits of colluvial wedges are distinguished on GPR profiles as depressions filled with layered deposits, with a series of parallel inclined reflectors. A 3D GPR survey helped identify paleofaults over a larger area and eliminated errors on individual profiles. The permafrost table sharply limited the depth of sounding. A low frequency of the spectrum, a smooth decrease in amplitudes to minimum values characterized rocks and sediments in the frozen state. Shallow reflections on the GPR profiles correspond to the lithological complexes observed in the trenches. The acquired findings demonstrate the importance of employing geophysics in investigating the surface ruptures of paleoearthquakes both at the stage of determining the location and kinematics of seismogenic ruptures prior to trenching, and at the stage of substantiating the history of the formation of faults.

Keywords: surface rupture, paleoearthquake, ground penetrating radar, Kubadru Fault, Gorny Altai.

Received: September 15, 2023

Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

Svetlana S. Bricheva — bricheva@igras.ru

Evgeny V. Deev — deev1@yandex.ru

Oleg V. Safronov — o.safronov@g.nsu.ru

Andrey L. Entin — aentin@geogr.msu.ru