

Позднечетвертичные смещения вдоль Зундукского разлома по данным георадиолокации и морфоструктурного анализа (северо-западное побережье оз. Байкал)*

И. А. Денисенко, О. В. Лунина

Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,
Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128

Для цитирования: Денисенко, И. А., Лунина, О. В. (2021). Позднечетвертичные смещения вдоль Зундукского разлома по данным георадиолокации и морфоструктурного анализа (северо-западное побережье оз. Байкал). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (2), 374–395. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.210>

В статье рассмотрены результаты георадиолокационных исследований активизированного в позднечетвертичное время участка Зундукского разлома между мысом Ото-Хушун и р. Зундук. Разлом протягивается вдоль береговой линии северо-западного побережья оз. Байкал от мыса Ядыртуй до п. Зама на суше и далее своим окончанием уходит в оз. Байкал. Целью данной работы является уточнение кинематического типа, определение вертикальных амплитуд смещений и углов падения Зундукского активизированного в позднечетвертичное время, а также определение максимальной магнитуды землетрясения, которое может произойти в результате активизации разлома. Для выявления и прослеживания разрывных нарушений в зоне Зундукского разлома на участке длиной 14 300 м, вкрест простираения активного разлома было пройдено 12 георадиолокационных профилей длиной от 34 до 244 м. Работы выполнялись георадаром «ОКО-2» с экранированными антенными блоками «АБ-250М», «АБ-90» и неэкранированной антенной «АБДЛ-Тритон». В дополнение к основному методу использовался морфоструктурный анализ уступа. В результате выполненных работ было установлено, что Зундукский разлом в позднечетвертичное время был активизирован в условиях тектонического растяжения с преобладающей сбросовой кинематикой смещения. Одноактные вертикальные смещения по сейсморазрыву изменяются с ЮЗ на СВ с 6.9 до 1.6 м. При образовании позднечетвертичного уступа Зундукского разлома определенное значение имела пластическая компонента смещения, вклад которой составляет от 18 до 78 % в полное смещение. Магнитуда палеоземлетрясения, рассчитанная по максимальному вертикальному смещению, равна $M_w = 7.3$ и $M_s = 7.5$.

Ключевые слова: Зундукский разлом, георадиолокация, вертикальное смещение, Байкальская рифтовая зона.

* Морфоструктурные исследования выполнялись при частичной финансовой поддержке ИЗК СО РАН в рамках базового проекта НИР № FWEF-2021-0009. Георадиолокационное профилирование, обработка и интерпретация данных выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90003.

1. Введение

На северо-западном побережье оз. Байкал расположены главные структурообразующие разломы Байкальской рифтовой зоны. Большинство из них было сформировано в раннем палеозое в результате становления коллизионной системы. В это время происходило столкновение Сибирского кратона и многочисленных микротеррейнов, составляющий композитный Ольхонский террейн (Федоровский и др., 1995; Fedorovsky et al., 2005; Федоровский и Скляр, 2010). В связи с этим считается, что многие разломы северо-западного побережья были образованы задолго до образования Байкальской рифтовой зоны (Обухов и Ружич, 1971; Шерман и Днепровский, 1989; Лунина и др., 2002; Мац, 2015). Уже в кайнозойе произошла повторная активизация разломов, которая и привела к формированию современного рельефа. Зундукский разлом является одним из таких дизъюнктивов. В ряде работ он отнесен к одной из ветвей Приморского разлома, но с некоторых пор выделен в самостоятельную структуру с собственным названием (Хлыстов и др., 2000).

Зундукский разлом протягивается вдоль береговой линии северо-западного побережья озера Байкал от мыса Ядыртуй до п. Зама на суше и далее своим окончанием уходит в оз. Байкал (Лунина, 2016; Хлыстов и др., 2000) (рис. 1). Протяженность разлома, согласно электронной базе данных ActiveTectonics, составляет 73 км, простирание — 55° , азимут падения, определенный по данным сеймопрофилирования высокого разрешения, — 145° (activetectonics.ru, n. d.). Морфологически разлом выражен в виде уступа, а в отдельных местах тектоническими рвами, погребенными под аллювиальными и делювиально-пролювиальными отложениями. Наиболее отчетливо разрыв проявлен в районе устья р. Зундук в виде уступа, секущего отложения конуса выноса.

Несмотря на то что Зундукский разлом имеет юго-восточное падение, существуют различные точки зрения на его кинематику. По мнению коллектива авторов (Чипизубов и др., 2015), данная структура является продолжением Приморского разлома с взбросовым типом смещения, что весьма дискуссионно. Мы придерживаемся мнения о сбросовой кинематике, что согласуется с данными, представленными в работе (Хлыстов и др., 2000). Целью наших работ является уточнение кинематического типа, определение вертикальных амплитуд смещений и углов падения Зундукского активного разлома, активизированного в позднечетвертичное время, а также определение максимальной магнитуды землетрясения, которое может произойти в результате активизации этой структуры.

2. Методика работ

Для выявления и прослеживания разрывных нарушений в зоне Зундукского разлома на участке длиной 14 300 м, вкрест простирания активного разлома было пройдено 12 георадиолокационных профилей длиной от 34 до 244 м (рис. 1). Для учета рельефа местности электронным тахеометром Leica на каждом профиле сделаны гипсометрические измерения с шагом 1–1.5 м.

Работы выполнялись георадаром «ОКО-2» с экранированными антенными блоками «АБ-250М», «АБ-90» и неэкранированной антенной «АБДЛ-Тритон».

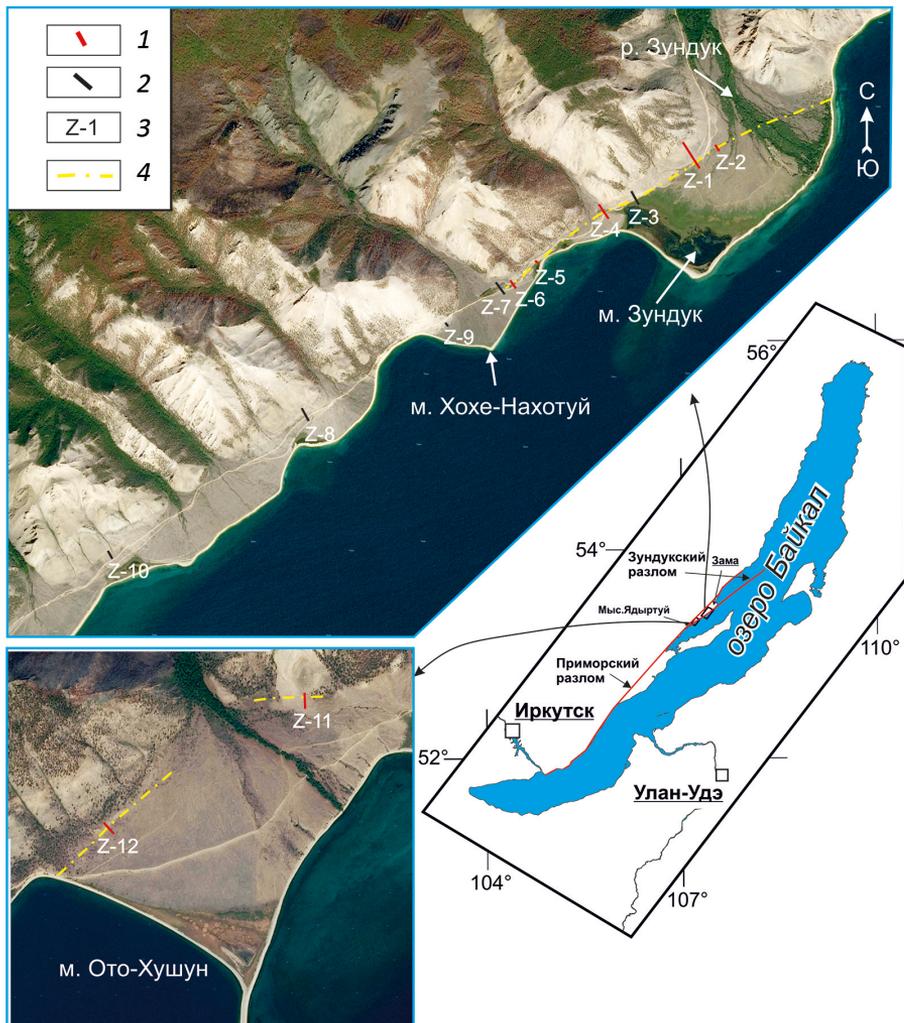


Рис. 1. Обзорная схема участка исследования с элементами дешифрирования (SAS Планета, Яндекс.Карты, n. d.):

1 — георадиолокационный профиль с выявленным разрывным нарушением; 2 — георадиолокационный профиль без выявленного разрывного нарушения; 3 — номер профиля; 4 — положение сейсморазрыва

Принцип действия георадарного оборудования основан на излучении электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства (Владов и Старовойтов, 2004). Более подробную информацию о принципах работы георадарного оборудования можно найти в ряде фундаментальных публикаций (Владов и Старовойтов, 2004; Daniels, 1996; Davis and Annan, 1989). В данной работе в основном иллюстрируются радарограммы, полученные с помощью низкочастотной неэкранированной антенны «АБДЛ-Тритон» с 100 МГц и в некоторых, наиболее благоприятных для проведения работ условиях с помощью экранированной антенны «АБ-90», с глубиной исследования 16 м, согласно спецификации оборудования

(Радиотехнический прибор..., 2009). Они оказались наиболее показательными из-за большего проникновения сигнала на глубину, так как в геологическом разрезе выявлен мощный слой отложений до 6 м, перекрывающий разломные структуры. Кроме того, в результате интерпретации обнаружены достаточно большие вертикальные амплитуды смещения от 1.6 до 6.9 м, которые можно зафиксировать только антеннами «АБДЛ-Тритон» или «АБ-90» из всей линейки антенных блоков георадара «ОКО-2».

При интерпретации полученных данных в первую очередь определялось значение диэлектрической проницаемости среды (эпсилон) на конкретных участках исследования. Это одно из необходимых условий для преобразования скоростного георадиолокационного разреза в глубинный. В работе был применен способ определения эпсилон по дифрагированным волнам (гиперболам), возникающим при отражении от локального объекта. На радарограммах профилей Z-1, Z-4 и Z-11 (антенна «АБ-250М») гиперболическим способом была определена диэлектрическая проницаемость среды ϵ , имеющая значения 8.5, 8.8 и 8.4 соответственно. В целом геологический разрез для всей площади работ подобен и представлен рыхлыми преимущественно грубообломочными отложениями с песчаным и супесчаным заполнителем. Специальных исследований по их датированию не проводилось, но, согласно геологической карте (Геологическая карта, 1959), возраст этих пород отнесен к голоцену. Разница значений ϵ , равных 8.5, 8.8 и 8.4, лежит в пределах разрешающей способности прибора. В связи с этим было принято решение использовать для всего полигона исследования значение $\epsilon = 8.5$. Далее проводилась стандартная интерпретация георадиолокационных данных в последовательности, описанной (Владов и Судакова, 2017) и примененной нами в других районах Байкальской рифтовой зоны (Лунина и др., 2016; Лунина и др., 2018).

На следующем этапе были выделены георадарные комплексы, являющиеся аналогами горных пород и имеющие разные электрофизические свойства. Границы георадарных комплексов проводились вдоль осей синфазности отраженных волн на основании различий в волновой картине. Далее были выделены основные разрывные нарушения в зоне Зундукского разлома. В георадиолокационном разрезе разрывные нарушения проявляются смещением георадарных комплексов, изменением волновой картины на определенном участке радарограммы и/или резким падением осей синфазности.

В дополнение к георадиолокационным работам использовался морфоструктурный метод исследования, который позволяет по данным гипсометрических измерений определить основные параметры современного приразломного уступа (McCalpin, 2009). Для наиболее верного определения вертикального смещения по разрыву была применена методика из работы (Buckman and Anderson, 1979). В расчетах использовался угол падения разлома, определенный по данным георадиолокации. Пренебрегать этим показателем нельзя, так как при пологом угле разлома амплитуда будет всегда больше, чем при крутом. Таким образом, с использованием данных георадиолокации будут получены более верные параметры сейсмогенного уступа. Согласно определению Букмана и Андерсона (Buckman and Anderson, 1979), высота уступа (H_2) является не просто вертикальным расстоянием между подошвой уступа и его бровкой, а расстоянием по вертикали между пересечениями

плоскости, образованной наиболее крутой частью склона уступа, и уровнями нарушенной исходной поверхностями. Вертикальное смещение по разрыву (Н1) — это расстояние по вертикали между пересечениями плоскостей разрыва с проекциями нарушенной исходной поверхности.

Как известно, в образовании приразломного уступа участвует не только хрупкая, разломная составляющая, но и пластичная (или гравитационная) компонента смещения (Homberg et al., 2018). В связи с этим на заключительном этапе по георадиолокационным данным нами была определена полная амплитуда смещения георадарных комплексов, которая включает в себя значения хрупкой и пластической компоненты смещения (A2). Далее с помощью вычитания разрывной компоненты (A1) из полной амплитуды был определен вклад пластической компоненты смещения, участвующей в образовании приразломного уступа.

3. Результаты исследований

В результате проведенных работ были получены данные георадиолокационных исследований по 12 профилям. В ходе интерпретации и анализа данных выделено 7 профилей, на которых зафиксированы разрывные нарушения и определены их основные параметры. На остальных пяти профилях разрывы зафиксированы не были (рис. 1). Ниже будут рассмотрены результаты исследований по всем георадиолокационным профилям.

3.1. Профиль Z-1

Георадиолокационный профиль Z-1 расположен на правом берегу р. Зундук в конусе выноса, сложенного делювиально-пролювиальными отложениями. Координаты начала профиля — 53.39846° с. ш. и 107.42403° в. д., конца — 53.400021° с. ш. и 107.4219° в. д. Длина профиля составляет 244 м, азимут простирания — 150°. В месте исследования наблюдается наиболее ярко выраженное проявление сейсмогенного разрыва в виде уступа высотой 5.6 м и с углом падения склона 20° (рис. 2).

По результатам интерпретации георадиолокационных данных на отметках 150–210 м выделены зона сейсмогенных разрывов. В интервале 150–190 м выделяется серия субпараллельных разрывов с падением на юго-восток с углами, изменяющимися от 52 до 75°. В районе бровки уступа выделяется главный сейсмогенный разрыв f3 с углом падения 58°. На отметке 210 м картируется разрыв встречного падения f6 с углом 46°, образующий в узле пересечения с разрывом f3 грабенообразную структуру шириной 47.1 м (рис. 2, з). По геофизическим данным также была определена ширина сейсмогенной зоны разрывов, равная 59 м.

По данным гипсометрических измерений морфоструктурным методом были определены значения высоты уступа Н2 (5.6 м) и величины смещения поверхности по разрыву Н1 (4.4 м) (рис. 2, б).

3.2. Профиль Z-2

Профиль Z-2 находится на 215 м восточнее от профиля Z-1 к руслу р. Зундук (рис. 1). Координаты начала профиля — 53.40015° с. ш. и 107.42603° в. д., конца —

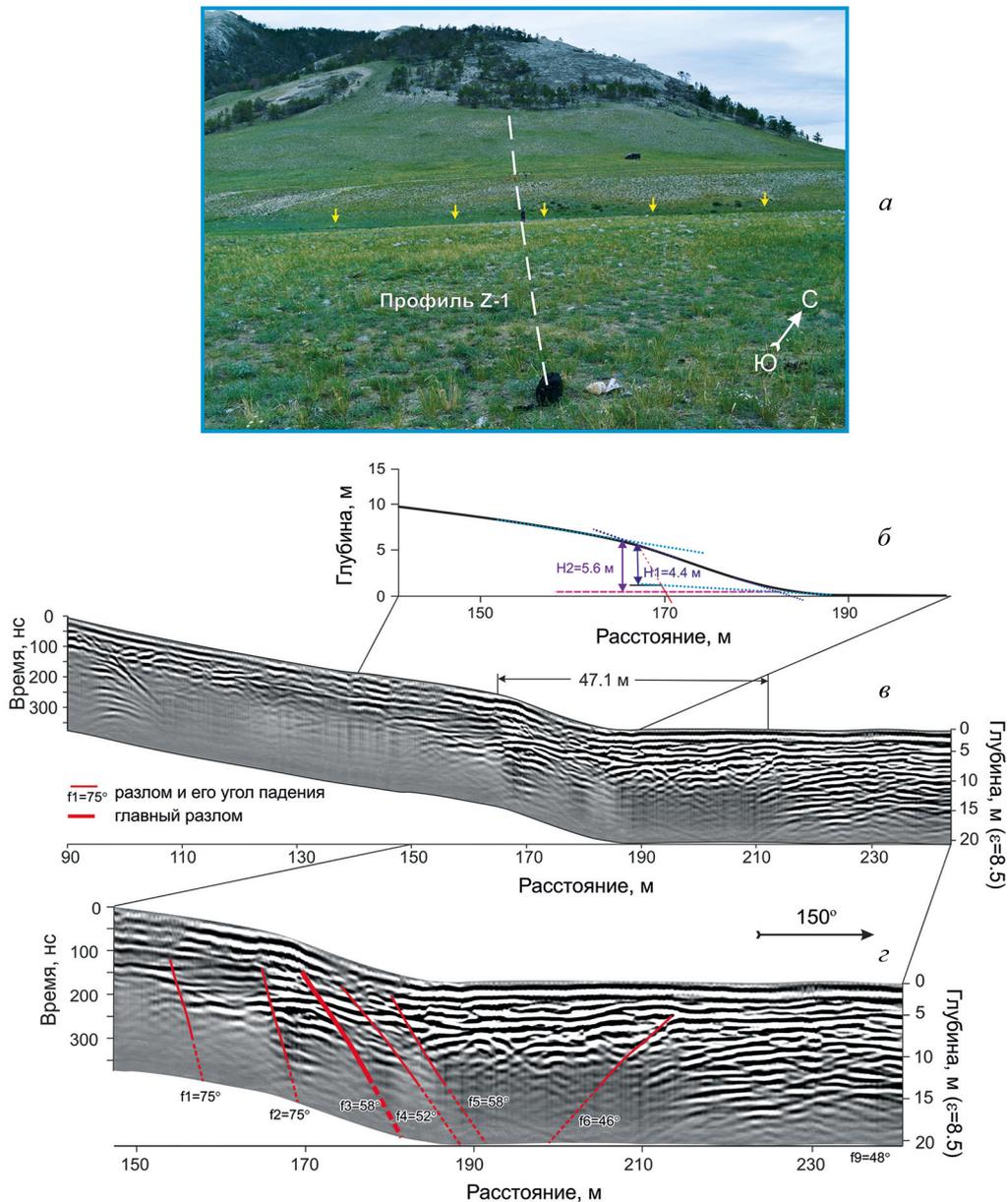


Рис. 2. Положение профиля Z-1 на участке исследования (а), гипсометрический профиль приразломного уступа, построенный по методу Букмана и Андерсона (Buckman and Anderson, 1979) (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемый геофизический разрез (г) (синим цветом показана граница кровли георадарного комплекса). Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров

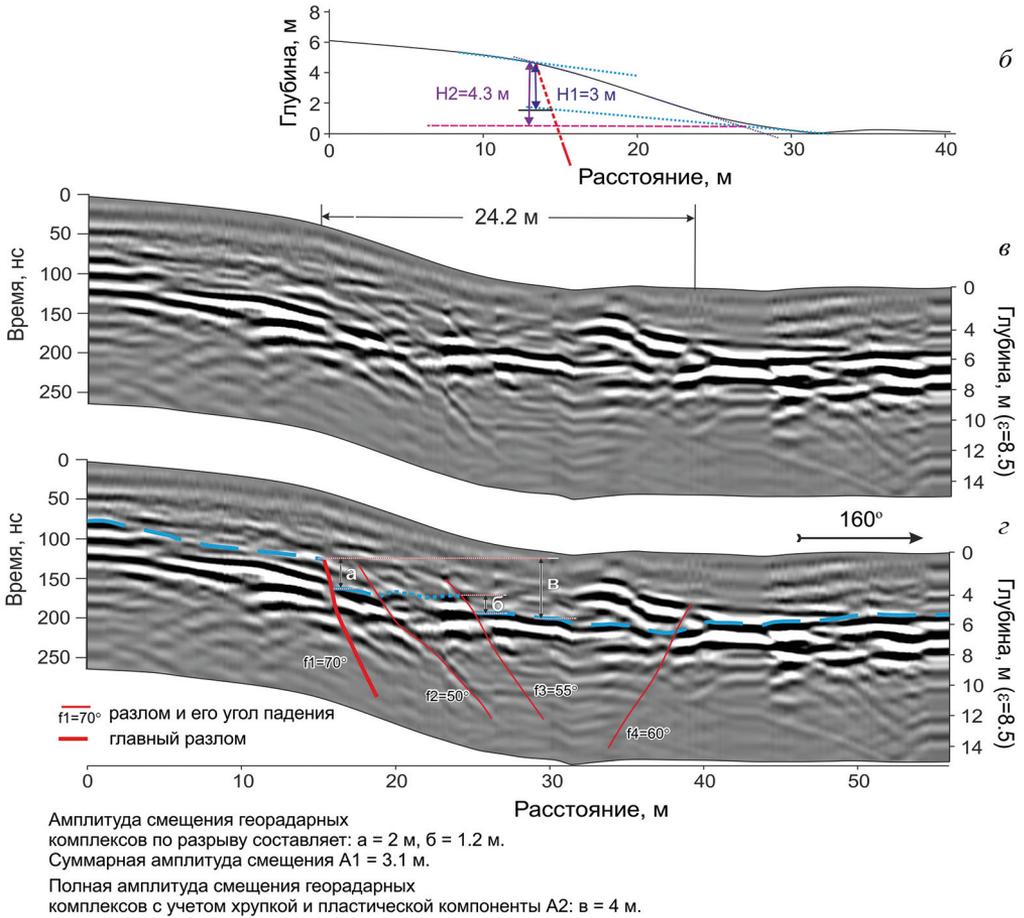
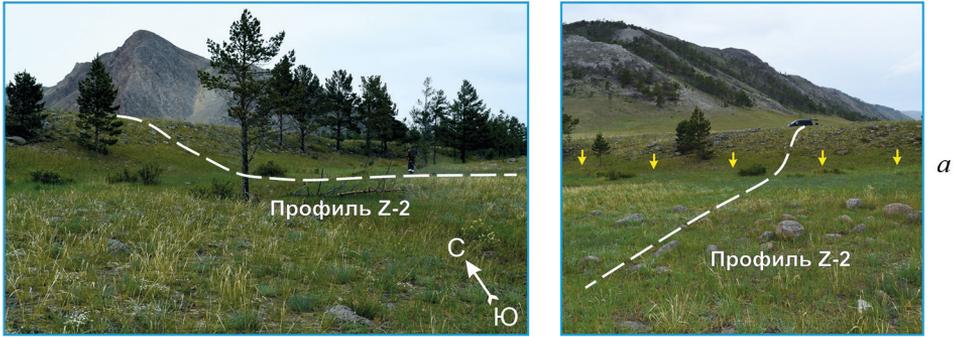


Рис. 3. Положение профиля Z-2 на участке исследования (а), гипсометрический профиль (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемый геофизический разрез (г). Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров

53.39971° с. ш. и 107.42641° в. д. В точке исследования профиль пересекает уступ, разрывающий конус выноса (рис. 3). Высота уступа согласно данным гипсометрических измерений равна 4.3 м, угол падения склона — 19°. Длина профиля составляет 56 м, азимут простирания — 150°. На местности в нижней части уступа наблюдается ров шириной 10 м и глубиной около 0.3 м (рис. 3, а).

В результате интерпретации георадиолокационных данных по прослеживанию осей синфазности была выделена граница, интерпретируемая как кровля слоя горных пород, смещенная по разрыву (рис. 3, з). В интервале 15–40 м выделяется разломная зона, представленная тремя субпараллельными разрывами с падением на ЮВ и одним сопряженным с падением на СЗ. Углы падения разрывов изменяются от 50 до 70°. В пределах бровки уступа выделяется главный сейсмогенный разрыв f1 сбросового типа с вертикальной амплитудой смещения 2 м и углом падения 70°. Суммарная вертикальная амплитуда, определенная с учетом смещения маркирующего слоя по синтетическим разрывам, равна 3.1 м. Полная амплитуда смещения георадарных комплексов с учетом хрупкой и пластической компоненты равна 4 м. Ширина разломной зоны равна 17 м.

По расположению и ориентировке разрывных нарушений на радарограмме отчетливо выделяется грабенообразная структура шириной 24.2 м, которая также подтверждается морфологическим проявлением рва в нижней части уступа.

По данным гипсометрических измерений были определены значения высоты уступа Н2 (4.3 м) и величины смещения поверхности по разрыву Н1 (3 м) (рис. 3, б).

3.3. Профиль Z-4

Георадиолокационный профиль проходит на левом берегу временного водотока в устьевой части распадка через уступ, который сечет современные отложения конуса выноса (рис. 1 и 4). Высота уступа согласно данным гипсометрических измерений в месте исследования равна 6 м, максимальный угол склона 21°. При приближении к руслу уступ полностью нивелируется. Координаты начала профиля — 53.39576° с. ш. и 107.41202° в. д., конца — 53.39473° с. ш. и 107.41306° в. д. Длина георадарного профиля составляет 136 м, азимут простирания — 160°.

В результате интерпретации данных георадиолокации в интервале 60–120 м была определена зона разрывных нарушений, представленная главным разрывом f1 юго-восточного падения с углом 64° и тремя антитетическими нарушениями с углами от 39 до 51°. На основании различий волновой картины были выделены георадарные комплексы, ассоциируемые со стратиграфическими слоями горных пород (рис. 4, з). Граница между ними проведена по оси синфазности отраженной волны, соответствующей положительным фазам импульсов. По смещению георадарного комплекса была определена вертикальная амплитуда смещения по разрыву f1 — 4.3 м. Вертикальная амплитуда (Н1), определенная по данным гипсометрическим измерений, равна 4.7 м (рис. 4, б). Ширина разломной зоны составляет 70 м. На глубине 15 м в правой части радарограммы отмечается граница, имеющая близгоризонтальное положение. На радарограмме она выделяется по резкому изменению электрофизических свойств горных пород, поэтому можно предположить, что такой границей является положение уровня грунтовых вод.

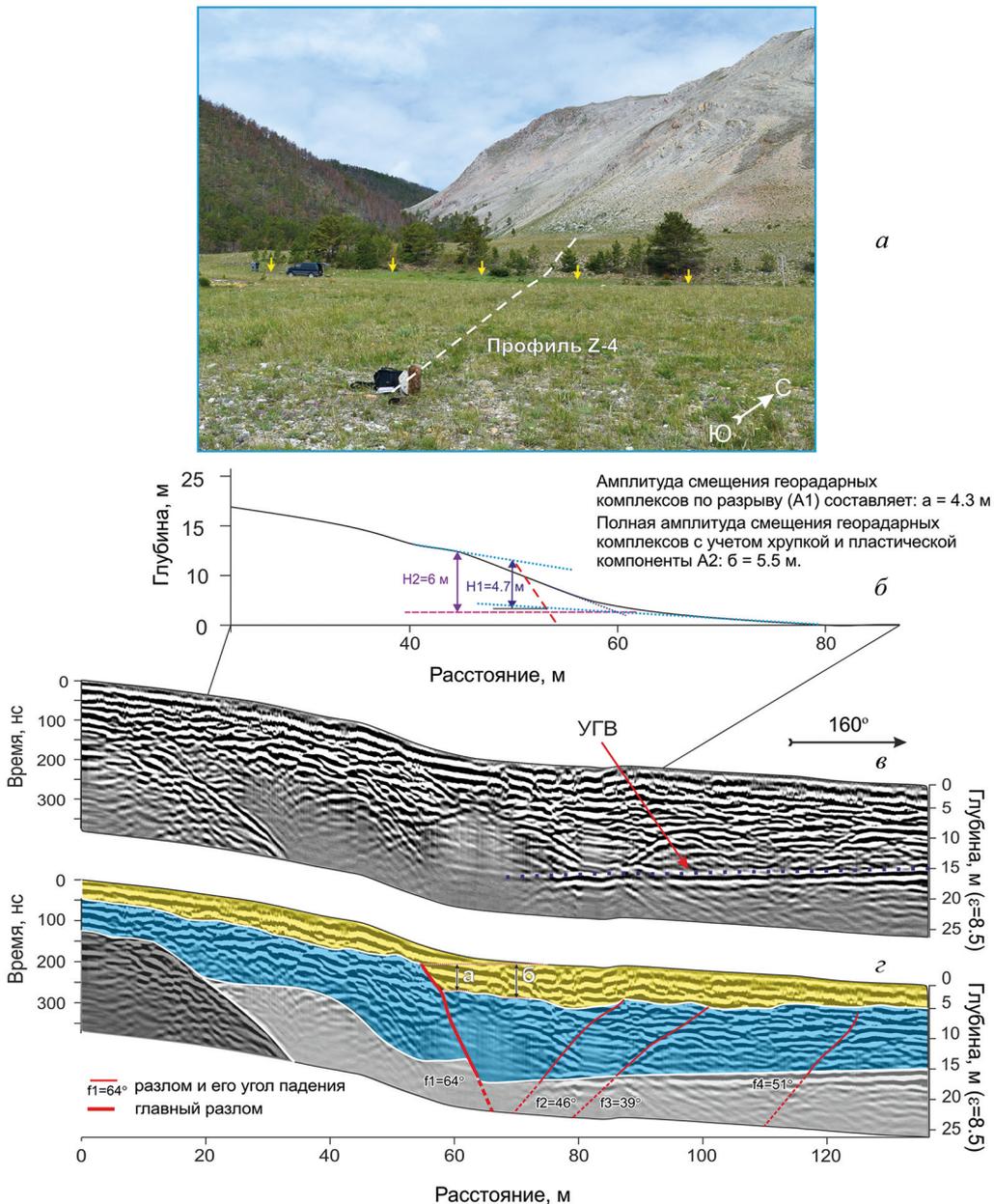


Рис. 4. Положение профиля Z-4 на участке исследования (а), гипсометрический профиль (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемый геолого-геофизический разрез (г). Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров

3.4. Профиль Z-5

Профиль Z-5 проходит в основании склона Зундукского разлома (рис. 1). Ниже профиля находится заболоченная местность. Высота уступа в месте исследования, определенная по морфоструктурным данным, равна 4.2 м. Координаты начала профиля — 53.39173° с. ш. и 107.40445° в. д., конца — 53.39151° с. ш. и 107.40469° в. д. Длина георадарного профиля составляет 30 м, азимут простираения — 170°.

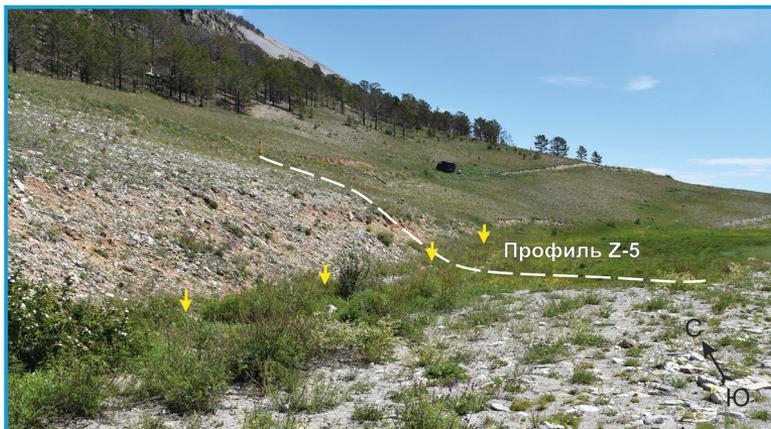
В результате интерпретации геофизических данных на всем протяжении георадиолокационного профиля выявлены разрывные нарушения. С отметки 5–20 м интерпретируются субпараллельные разрывы юго-восточного падения с углами от 77 до 84°. С отметки 20–30 м разрывы встречного северо-западного падения с углами 74 и 69°. В правой части радарограммы выделяется зона, ограниченная с двух сторон навстречу падающими разрывами f4 и f5 с углами падения 77 и 74° соответственно. Мы предполагаем, что в целом структура является рвом, который образовался в условиях растяжения земной коры во время землетрясения и заполнился впоследствии склоновыми отложениями. Морфологически структура проявлена в виде рва шириной 8.7 м. В районе бровки уступа интерпретируется главный сейсмогенный разрыв f2 с углом падения 80° и смещением георадарного комплекса, равным 3.4 м. Ширина разломной зоны составляет 23 м. Вертикальная амплитуда, определенная по данным гипсометрическим измерений, равна 3.9 м (рис. 5, б, г).

3.5. Профиль Z-6

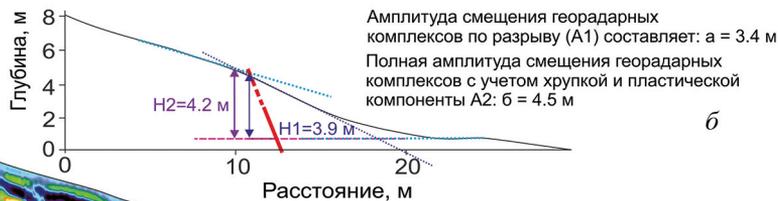
Профиль Z-6 расположен в левой части конуса выноса временного водотока, сформировавшего м. Хохе-Нахотуй (рис. 1). В месте исследования находится уступ, который при пересечении долины временного водотока испытывает коленообразный изгиб с заходом вверх по долине (рис. 6, а). В правой части конуса выноса уступ полностью сnivelирован временными водотоками. Георадиолокационный профиль был задан вблизи коленообразного изгиба, вдоль горной выработки, описанной в работе (Чипизубов и др., 2015) (рис. 6, б). Координаты начала профиля — 53.39028° с. ш. и 107.40096° в. д., конца — 53.38961° с. ш. и 107.40186° в. д. Длина георадарного профиля составляет 99 м, азимут простираения — 150°.

Исследования выполнялись антенными блоками «АБДЛ-Тритон» и «АБ-90». Радарограмма, полученная с помощью антенны «АБДЛ-Тритон», показывает общую структурную картину с основными разрывными разрушениями, сосредоточенными в пределах уступа сейсмогенного разрыва. На радарограмме отчетливо выделяются разрывы, ограничивающие приразломный ров, а также подчеркивается общая структура погружения слоев горных пород в ров (рис. 6, е).

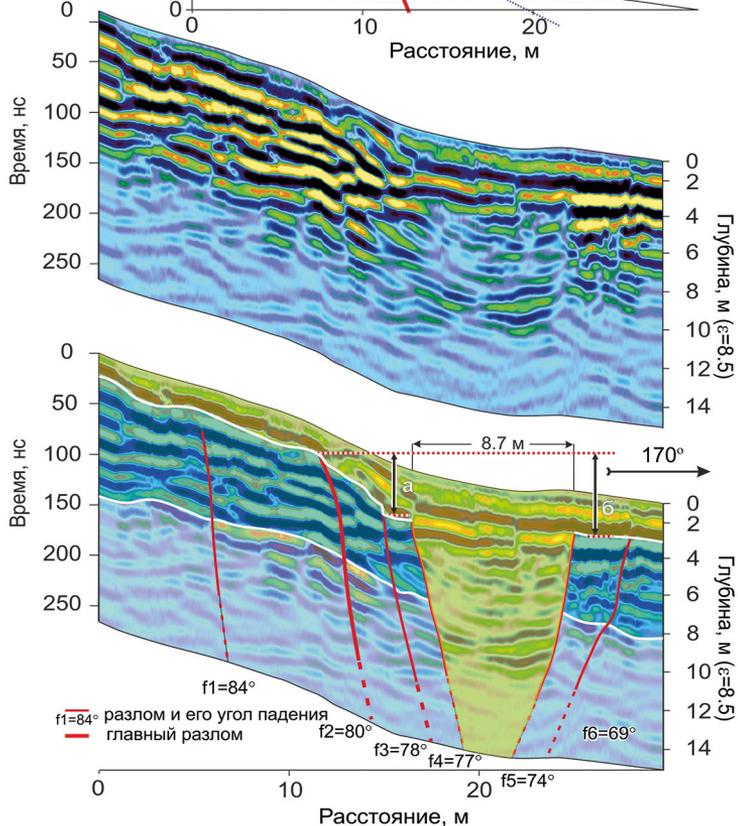
Более детально будет рассмотрена радарограмма, полученная с помощью антенны «АБ-90», так как она имеет большую разрешающую способность и лучшую детализацию. Интерпретация показала схожую картину с радарограммой «АБДЛ-Тритон». В интервале 30–70 м выделяется разломная зона, представленная с отметки 30–50 м разрывами с падением на ЮВ, с отметки 50–70 м — с встречным северо-западным падением. В нижней части уступа выделяется участок низкоамплитудного сигнала, ограниченный двумя навстречу падающими разрывами f4 и f5 (рис. 6, д). Появление низкоамплитудного сигнала, вероятнее всего, связано с мощной толщей



a



б



в

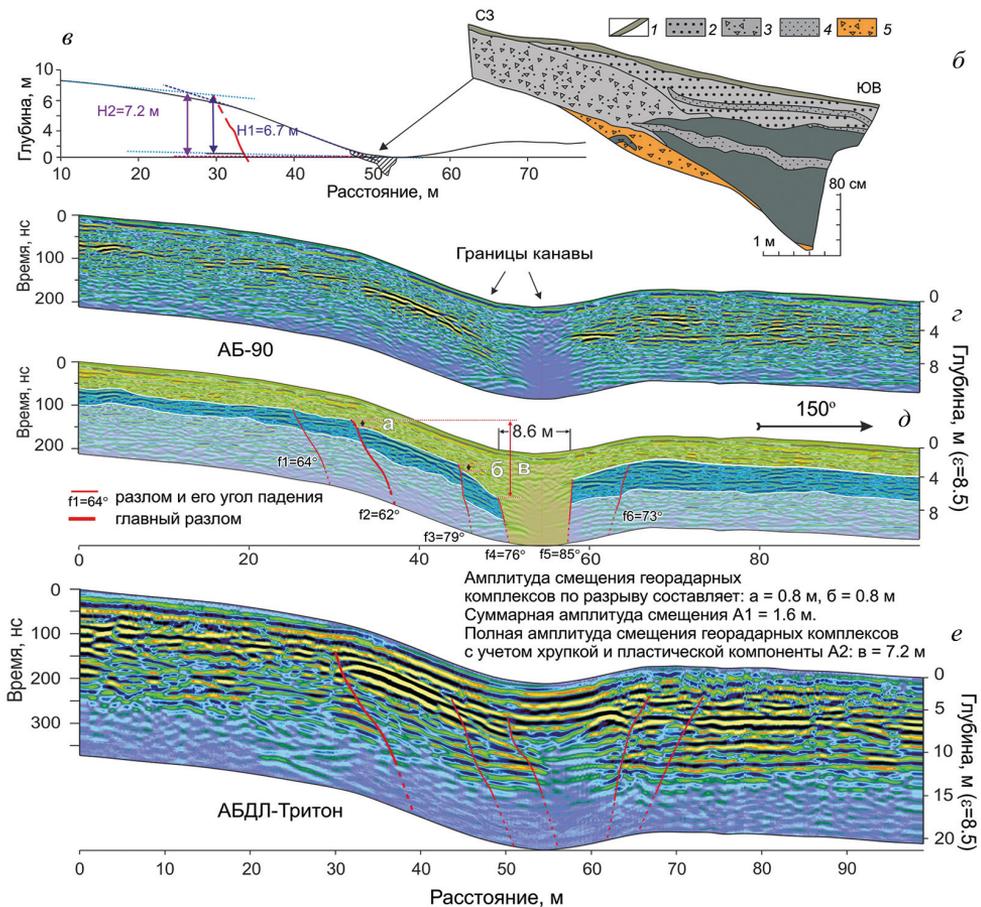
г

Рис. 5. Положение профиля Z-5 на участке исследования (а), гипсометрический профиль (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемый геолого-геофизический разрез (г). Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров



a

Литологический разрез северо-восточной стенки канавы (Чипизубов и др., 2015)



б

z

д

е

Рис. 6. Положение профиля Z-6 на участке исследования (a), разрез рыхлых отложений вблизи георадарного профиля S-1 по (Чипизубов и др., 2015) (б): 1 — современный почвенно-растительный покров; 2, 3 — делювиальные отложения землистого цвета, щебенистые (2) и щебенисто-глыбовые (3); 4 — дресвяно-суглинистые прослои; 5 — наиболее древние делювиальные отложения рыжего цвета; 6 — погребенная почва, гипсометрический профиль (в), первичная радарограмма антенны «АБ-90» (z); интерпретируемый геолого-геофизический разрез «АБ-90» (д), интерпретируемый геофизический разрез «АБДЛ-Тритон» (е). Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров

гумусированных отложений, которыми заполнен ров (Чипизубов и др., 2015). Ширина приразломного рва, определенная по данным георадиолокации, равна 8.6 м. В месте бровки уступа картируется главный разрыв f2 сбросового типа с амплитудой смещения, определенной по смещению георадарных комплексов, равной 0.8 м. По субпараллельному разрыву f2 амплитуда смещения также составляет 0.8 м. Таким образом, суммарная амплитуда вертикального смещения равна 1.6 м. Ширина разломной зоны составляет 40 м.

Обе радарограммы показывают общую структуру погружения слоев северо-западного крыла склона, что также отмечается в геологическом разрезе горной выработки. Вероятнее всего, на момент землетрясения большую роль в образовании приразломного уступа сыграла пластическая компонента смещения. Поэтому полную амплитуду вертикального смещения следует считать с учетом пластической компоненты, которая будет равна 7.2 м.

3.6. Профиль Z-11

Георадарный профиль находится на левобережье временного водотока мыса Ото-Хушун (рис. 1). Координаты начала профиля — 53.34069° с. ш. и 107.27167° в. д., конца — 53.3399° с. ш. и 107.27189° в. д. Длина георадарного профиля составляет 90 м, азимут простирания — 180° . В месте исследования профиль пересекает разрыв, выраженный в рельефе рвом шириной 1 м и глубиной 0.5 м. Простирание разрыва 270° . По данным спутникового снимка (SAS Planet, Яндекс.Карты, n. d.) (рис. 7, а) видно, что разрыв имеет левосдвиговую кинематику смещения с горизонтальной амплитудой около 12 м. Амплитуда была определена по смещению русла временного водотока, которое хорошо трассируется в современном рельефе.

Интерпретация георадиолокационных данных показала наличие разнонаправленных разрывных нарушений на всем протяжении профиля с углами падения, изменяющимися от 58° до 82° . Сейсмогенный ров, проявленный на поверхности Земли, на радарограмме выделяется в виде разрывного нарушения f1 с падением на ЮВ и углом 82° . Ширина разломной зоны равна 67 м. Следует отметить, что на анализируемой радарограмме частота встречаемости второстепенных преимущественно сдвиговых разрывов на единицу изучаемой площади больше, чем в зонах нарушений с преобладающей сбросовой компонентой смещения.

3.7. Профиль Z-12

Профиль Z-12 пересекает сейсмогенный уступ в правой части конуса выноса мыса Ото-Хушун (рис. 1). Координаты начала профиля — 53.33386° с. ш. и 107.25668° в. д., конца — 53.33451° с. ш. и 107.25571° в. д. Высота уступа согласно данным гипсометрических измерений равна 7.7 м, максимальный уклон склона — 24° (рис. 8, б). Длина профиля составляет 95 м, азимут простирания — 145° . Уступ в месте исследования достаточно четко выражен в рельефе, в долинах же при приближении к современному руслу он сnivelирован вплоть до исчезновения (рис. 8, а).

В работе рассмотрена радарограмма, полученная с помощью антенны «АБ-90». По результатам интерпретации георадиолокационных данных в интервале 20–50 м было выделено два субпараллельных разрывных нарушения сбросового типа с паде-

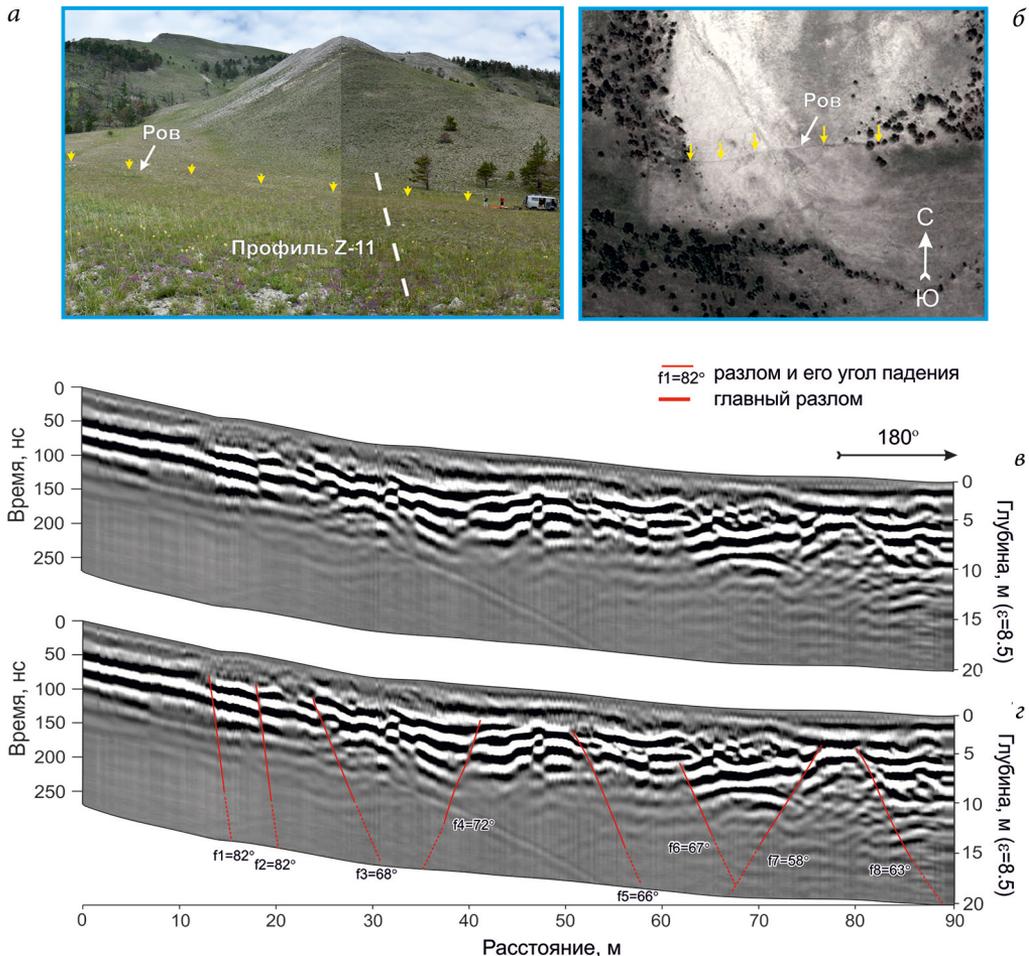
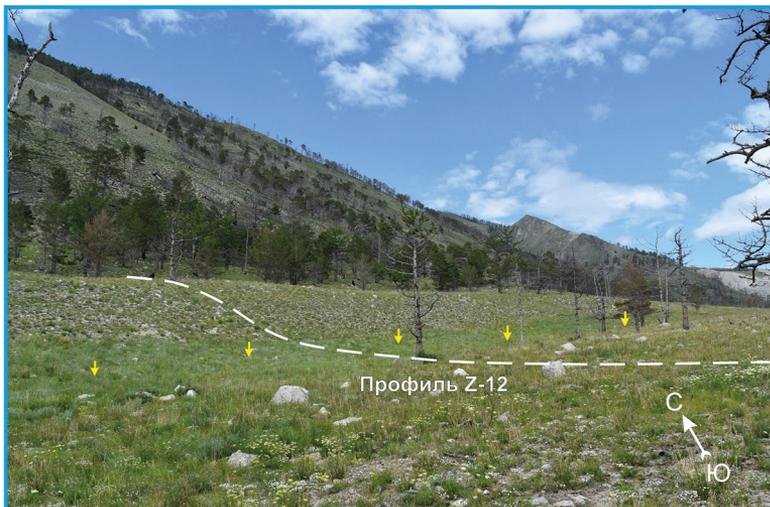


Рис. 7. Положение профиля Z-11 на участке исследования (а), фрагмент космоснимка с сейсморазрывом (SAS. Планета, Яндекс.Карты, n. d.) (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемая радарограмма, интерпретируемый геофизический разрез (з). Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров

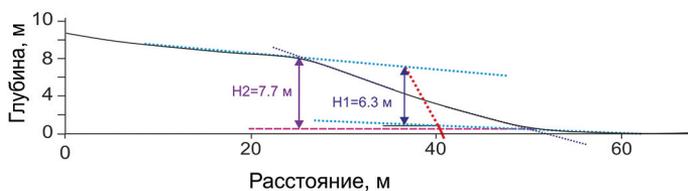
нием на ЮВ и углами падения 67° и 56° соответственно. Амплитуда смещения, определенная по смещению георадарных комплексов, для разрыва f1 равна 2.2, для разрыва f2 — 4.7 м. Суммарная амплитуда смещения составляет 6.9 м. В висячем крыле сброса разрыва f2 был выделен коллювиальный клин, образованный в результате переноса и отложения продуктов выветривания лежащего крыла, который, в свою очередь, был перекрыт современными делювиально-пролювиальными отложениями мощностью около 3 м (рис. 8, з). Вертикальная амплитуда, определенная по данным гипсометрическим измерений, равна 6.3 м, ширина разломной зоны — 17 м.

3.8. Профили Z-3, Z-7, Z-8, Z-9, Z-10

При интерпретации данных проведенных георадиолокационных исследований на профилях Z-3, Z-7, Z-8, Z-9, Z-10 не обнаружено разрывных нарушений. Мы можем предположить, что это связано как с отсутствием в месте исследова-



а



б

Амплитуда смещения георадарных комплексов по разрыву составляет: а = 2.2 м, б = 4.7 м.
Суммарная амплитуда смещения $A_1 = 6.9\text{ м}$.
Полная амплитуда смещения георадарных комплексов с учетом хрупкой и пластической компоненты $A_2: в = 8.4\text{ м}$.

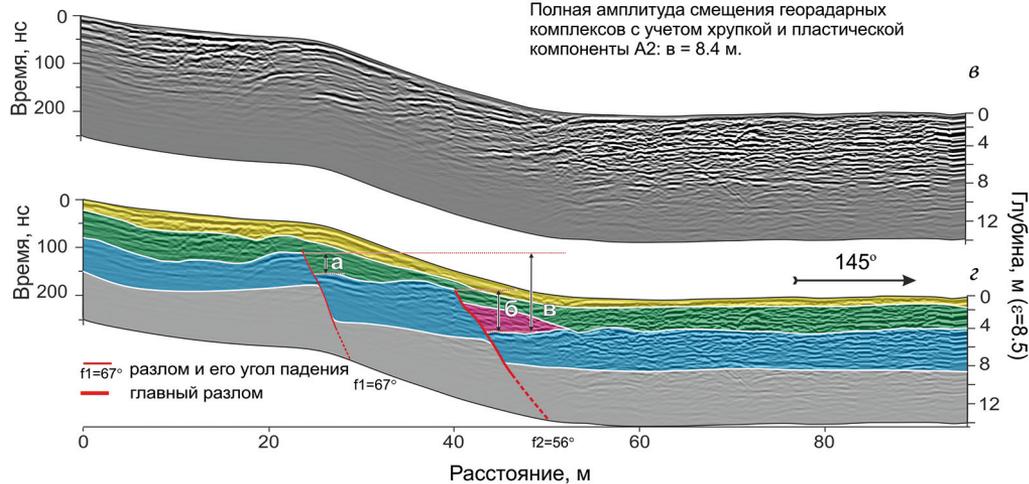


Рис. 8. Положение профиля Z-12 на участке исследования (а), гипсометрический профиль (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемый геолого-геофизический разрез (г). Цветом показаны георадарные комплексы. Желтыми стрелками показан сейсмогенный ров

ния разрывов, так и с сильной денудацией склона, которая разрушила и перекрыла мощным слоем осадков все видимые признаки разрывов в приповерхностной части земной коры.

4. Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволили детально изучить приповерхностную структуру Зундукского разлома в северо-западной части Байкальской рифтовой зоны на участке протяженностью 14300 м. Было установлено, что на всем протяжении разлома преобладает сбросовый тип смещения с вертикальной одноактной разрывной амплитудой от 1.6 до 6.9 м. Исследования показали, что не на всех изученных профилях фиксируются разрывы. Так, анализ геофизических данных профилей Z-3, Z-7, Z-8, Z-9, Z-10 не выявил каких-либо разрывных нарушений (рис. 1). По-видимому, это можно объяснить следующими причинами: 1) сильная денудация склона разрушила все видимые признаки разрывов в приповерхностной части, после чего разломные уступы были перекрыты мощным слоем современных пролювиально-делювиальных отложений, мощность которых является предельной для работы георадарного оборудования; 2) смещение по разрывам было крайне неравномерным, поэтому мы видим в одних местах ярко выраженные следы проявления разрывов, а в других слабо выраженные следы или же их совсем нет.

По результатам исследований были построены графики распределения параметров зоны главного сейсмогенного разрыва вдоль его простирания (рис. 9). На рис. 9, а показаны графики полной амплитуды смещения георадарных комплексов по разрыву и величины хрупкой и пластической компонент смещения. В точке Z-6 отмечается максимальная величина пластической деформации, равная 5.6 м, что составляет 78% от общего смещения, в то же время здесь наблюдается минимальное значение хрупкой, разрывной компоненты смещения, равное 1.6 м. Объяснение такого эффекта заключается в том, что при сейсмособытии в результате растяжения земной поверхности образовался ров шириной 8.6 м, в связи с чем произошло медленное опускание, сползание под действием гравитационных сил, всяческого крыла вниз в направлении сейсмогенного рва. Этот эффект подтверждается наклонным положением георадарных комплексов в всячем крыле сброса (рис. 6). Также благоприятным условием для пластической, гравитационной деформации является нахождение профиля вблизи русла временного водотока с высоким уровнем грунтовых вод. В целом же для остальных участков исследования наблюдаются близкие значения вклада пластической компоненты смещения, изменяющиеся от 18 до 24% (рис. 9, б).

График изменения ширины разломной зоны вдоль простирания сейсмогенного разрыва не показал явной корреляционной зависимости с другими параметрами. Но очевидно, что при крутом угле наклона главного разрыва ширина зоны сбросовых деформаций меньше.

Анализ графика угла главного разрыва и максимального угла склона уступа (рис. 9, в) показывает совпадение пиков значений в точке Z-5, из чего следует, что чем больше угол разлома, тем круче уступ выражен на поверхности Земли при условии, что профили Z-6 и Z-5 находятся близко друг к другу и имеют близкие условия денудации и аккумуляции приразломного уступа по 0.5 и 0.3 м соответственно (рис. 9, д).

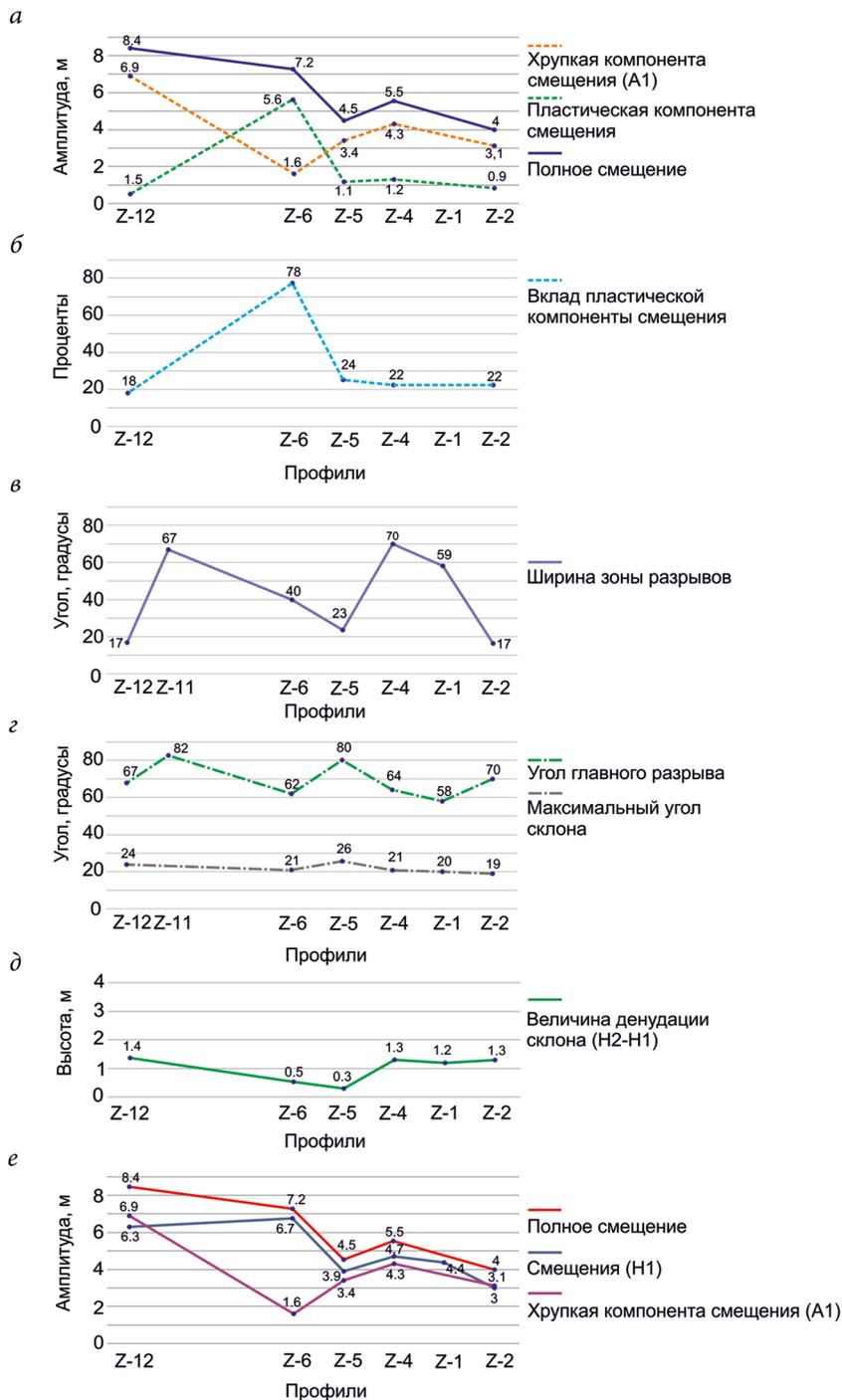


Рис. 9. Графики изменения параметров разлома вдоль его простирания:

H1 — амплитуда смещения, определенная по морфоструктурному методу; A1 — разрывная компонента смещения, определенная по георадиолокации; H2 — высота приразломного уступа

На рис. 9, е отмечается максимальная амплитуда в крайней точке Z-12. Далее происходит постепенное уменьшение амплитуды вертикального смещения с юго-запада на северо-восток. Исходя из этого, зная общепринятые закономерности, свидетельствующие о том, что вертикальные смещения по историческим поверхностным сбросам максимальны в центральных частях и минимальны в концах (Wheeler, 1989; Caskey et al., 1996; McCalpin, 2009), можно сделать вывод, что с северо-восточной стороны эта ветвь разрывной системы уходит в озеро Байкал и там постепенно затихает, а в юго-западной точке мы, возможно, только приблизились к центральной части разлома. Из графика также видно, что вертикальные амплитуды смещения A1 и H1, определенные разными методами, в целом показывают меньшие значения, чем полная амплитуда смещения георадарных комплексов (A2). Со временем под действием внешних сил происходит разрушение приразломного уступа. Как правило, уступ выколаживается, происходит обильное накопление осадков в его нижней части, в связи с чем поверхность основания уступа, от которой производится расчет, становится гипсометрически выше, поэтому амплитуда, определенная морфоструктурным методом, будет иметь меньшее значение при условии, что интенсивных вертикальных смещений не происходило в течение длительного периода.

Таблица. Магнитуда землетрясения, рассчитанная из уравнений регрессий для сейсмогенных сбросов

Уравнение по (Wells and Coppersmith, 1994)	Mw	Уравнение по (Lunina, 2001; 2002; Lunina et al., 2014)	Ms
	A2		A2
$Mw = 6.61 + 0.71 \times \log MD$	7.3	$Ms = 6.73 + 0.79 \times \log MD$	7.5

Примечание. MD — максимальное смещение, м; Mw — моментная магнитуда; Ms — магнитуда по поверхностным волнам; A2 — полная амплитуда смещения георадарных комплексов с учетом хрупкой и пластической компоненты.

Результаты настоящей работы уверенно доказывают, что формирование данной структуры происходило в условиях растяжения, и поэтому для расчетов магнитуды палеособытия следует использовать уравнения зависимости между параметрами землетрясений и сейсмогенных разрывов для сбросов. Для расчетов Mw были выбраны наиболее известные соотношения, опубликованные в работе (Wells and Coppersmith, 1994), для Ms — уравнения, полученные позднее с использованием более расширенной выборки данных (Lunina, 2001). В данной работе для расчетов в качестве параметра использована полная максимальная амплитуда смещения по сейсмогенному разрыву, которая включает в себя значение хрупкой и пластической компоненты смещения (A2). В результате магнитуды по поверхностным волнам, определенные по максимальному вертикальному смещению, имеют значения Ms = 7.5, моментальная магнитуда Mw равна 7.3 (см. таблицу).

5. Заключение

Георадиолокационные исследования в комплексе с морфоструктурным анализом приразломного уступа позволили получить новые данные о позднечетвертичных вертикальных смещениях вдоль Зундукского активного разлома, связанных

с последним в его зоне палеоземлетрясением. По результатам проведенных работ были сделаны следующие выводы.

Зундукский разлом в позднечетвертичное время был активизирован в условиях тектонического растяжения с преобладающей ему сбросовой кинематикой смещения.

Разлом на поверхности Земли выражен в виде уступа и имеет хорошее морфологическое проявление, как правило, в местах, отдаленных от русел временных водотоков. В устьях больших долин и вблизи современных русел приразломный уступ полностью сnivelирован.

При образовании позднечетвертичного уступа Зундукского разлома определенное значение имела пластическая компонента смещения амплитудой от 1.1 до 5.6 м, что составляет от 18 до 78 % от вклада в полное смещение.

Полученные на основе георадиолокационных данных одноактные разрывные вертикальные смещения по сейсморазрыву изменяются с ЮЗ на СВ с 6.9 до 1.6 м. Оценка моментной магнитуды палеоземлетрясения M_w , рассчитанная по полному вертикальному смещению, равна 7.3, оценка поверхностных волн M_s — 7.5, что предполагает возможность возникновения подобного сейсмического события в зоне Зундукского разлома в будущем.

Литература

- Владов, М. Л., Старовойтов, А. В. (2004). *Введение в георадиолокацию*. Москва: МГУ.
- Владов, М. Л., Судакова, М. С. (2017). *Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие*. Москва: ГЕОС.
- Геологическая карта масштаба 1:200 000, лист № 48-XXIV. (1959). Москва: Картографическая фабрика Гесгеолтехиздата Министерства геологии и охраны недр СССР.
- Лунина, О. В., Гладков, А. С., Афонькин, А. М., Серебряков, Е. В. (2016). Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири). *Геология и геофизика*, (9), 1616–1633. <https://doi.org/10.15372/GiG20160902>
- Лунина, О. В., Гладков, А. С., Гладков, А. А., Денисенко, И. А. (2018). Среднекедровая палеосейсмодислокация в Байкальском хребте: структура и оценка смещений по данным георадиолокации. *Геодинамика и тектонофизика*, 9 (2), 531–555. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0360>
- Лунина, О. В., Гладков, А. С., Черемных, А. В. (2002). Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система). *Геология и геофизика*, 43 (5), 446–455.
- Лунина, О. В. (2016). Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии. *Геодинамика и тектонофизика*, 7 (3), 407–434.
- Мац, В. Д. (2015). Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений. *Геодинамика и тектонофизика*, 4 (6), 467–489.
- Обухов, С. П., Ружич, В. В. (1971). Структура и положение Приморского сбросо-сдвига в системе главного разлома Западного Прибайкалья. *Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири*. Иркутск: ИЗК СО РАН, 65–68.
- Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2». Техническое описание. Инструкция по эксплуатации* (2009). Московская область: ООО «Логические системы».
- Федоровский, В. С., Владимиров, А. Г., Хаин, Е. В., Каргополов, С. А., Гибшер, А. С., Изох, А. Э. (1995). Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии. *Геотектоника*, (3), 3–22.
- Федоровский, В. С., Складов, Е. В. (2010). Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения. *Геодинамика и тектонофизика*, 1 (4), 331–418.

- Хлыстов, О. М., Мац, В. Д., Воробьева, С. С., Климанский, А. В., де Батист, М., Черамихола, М. (2000). Строение и развитие подводного Академического хребта. *Геология и геофизика*, 41 (6), 819–824.
- Чипизубов, А. В., Смекалин, О. П., Имаев, В. С. (2015). Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения зоны Приморского разлома (оз. Байкал). *Вопросы инженерной сейсмологии*, 42 (3), 5–19.
- Шерман, С. И., Днепровский, Ю. И. (1989). *Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения*. Новосибирск: Наука.
- Яндекс.Карты. (n. d.). *Поисково-информационная картографическая служба Яндекс*. [online] Доступно на: <https://yandex.ru/maps/?l=sat&ll=106.009977%2C52.161568&z=8> [Дата доступа 19.04.2021].
- activetectonics.ru. (n. d.). Картографический сервис ActiveTectonics. [online] Доступно на: <http://activetectonics.ru/> [Дата доступа 24.04.2021].
- Bucknam, R. C. and Anderson, R. E. (1979). Estimation of fault scarp ages from a scarp-height-slope-angle relationship. *Geology*, 7, 11–14.
- Caskey, S. J., Wesnousky, S. G., Zgang, P. and Slemmons, D. B. (1996). Surface faulting of the 1954 Fairview Peak (Ms 7.2) and Dixie Valley (Ms 6.8) earthquakes, central Nevada. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86 (3), 761–787.
- Daniels, D. J. (1996). *Surface-penetrating radar*. London, UK: The Institution of Electrical Engineers.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989). Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and stratigraphy. *Geophys.*, 37, 531–551.
- Fedorovsky, V. S., Donskaya, T. V., Gladkochub, D. P., Khromykh, S. V., Mazukabzov, A. M., Mekhonoshin, A. S., Sklyarov, E. V., Sukhorukov, V. P., Vladimirov, A. G., Volkova, N. I. and Yudin, D. S. (2005). *Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: north-eastern segment*. E. V. Sklyarov, ed., Irkutsk: IEC SB RAS, 5–76.
- Homberg, C., Schnyder, J., Roche, V., Leonardi, V. and Benzaggagh, M. (2018). The brittle and ductile components of displacement along fault zones. *Geological Society, London, Special Publications*, 439, 395–412.
- Lunina, O. V. (2001). Lithospheric stress field as a control over seismogenic fault parameters and earthquake magnitudes. *Russian Geology and Geophysics*, 42 (9), 1389–1398.
- McCalpin, J. P. (ed.). (2009). *Paleoseismology*. 2nd ed. Burlington, Mass.: Academic Press.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, and rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974–1002.
- Wheeler, R. L. (1989). Persistent segment boundaries on basin-range normal faults. In: D. P. Schwartz, R. H. Sibson, ed., *Fault Segmentation and Controls of Rupture Initiation and Termination*. U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 89–315, 432–444.

Статья поступила в редакцию 19 мая 2020 г.

Статья рекомендована в печать 26 февраля 2021 г.

Контактная информация:

Денисенко Иван Александрович — denisenkoivan.1994@mail.ru

Лунина Оксана Викторовна — lunina@crust.irk.ru

Late Quaternary displacements along the Zunduk fault according to ground-penetrating radar and morphostructural analysis (northwestern coast of Lake Baikal)*

I. A. Denisenko, O. V. Lunina

Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
128, ul. Lermontova, Irkutsk, 664033, Russian Federation

For citation: Denisenko, I. A., Lunina, O. V. (2021). Late Quaternary displacements along the Zunduk fault according to ground-penetrating radar and morphostructural analysis (northwestern coast of Lake Baikal). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (2), 374–395. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.210> (In Russian)

The article considers the results of GPR studies of the Zunduk fault section activated between the Cape Oto-Khushun and the Zunduk River, activated in the late Quaternary. The aim of this work is to clarify the kinematic type, determine the vertical displacement amplitudes, and dip angles of the Zunduk active fault activated in the late Quaternary, as well as to determine the maximum magnitude of the earthquake that could occur as a result of the activation of the fault. The work was carried out by OKO-2 GPR with a shielded antenna AB-90 and ABDL-Triton. In addition to the main method, morphostructural analysis of the ledge was used. As a result of the work performed, it was found that the Zunduk fault in the Late Quaternary was activated under tectonic extension with predominant fault displacement kinematics. The one-act vertical displacements along the seismic fracture change from SW to NE from 6.9 to 1.6 m. When the Late Quaternary ledge of the Zunduk fault formed, the plastic component of the displacement had a certain value, the contribution of which is from 18 to 78 % of the total displacement. Paleo-earthquake magnitudes calculated from the maximum vertical displacement are $M_w=7.3$ and $M_s=7.5$.

Keywords: Zunduk fault, georadar, vertical displacement, Baikal rift zone.

References

- activetectonics.ru. (n. d.). *Map service ActiveTectonics*. [online] Available at: <http://activetectonics.ru/> [Accessed 24 Apr. 2021].
- Bucknam, R. C. and Anderson, R. E. (1979). Estimation of fault scarp ages from a scarp-height-slope-angle relationship. *Geology*, 7, 11–14.
- Caskey, S. J., Wesnousky, S. G., Zgang, P. and Slemmons, D. B. (1996). Surface faulting of the 1954 Fairview Peak ($M_s 7.2$) and Dixie Valley ($M_s 6.8$) earthquakes, central Nevada. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86 (3), 761–787.
- Daniels, D. J. (1996). *Surface-penetrating radar*. London, UK: The Institution of Electrical Engineers.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989). Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and stratigraphy. *Geophys. Prospect*, 37, 531–551.
- Fedorovsky, V. S., Donskaya, T. V., Gladkochub, D. P., Khromykh, S. V., Mazukabzov, A. M., Mekhonoshin, A. S., Sklyarov, E. V., Sukhorukov, V. P., Vladimirov, A. G., Volkova, N. I. and Yudin, D. S. (2005). *Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: north-eastern segment*. E. V. Sklyarov, ed., Irkutsk, IEC SB RAS Publ., 5–76.
- Fedorovsky, V. S., Vladimirov, A. G., Khain, E. V., Kargopolov, S. A., Gibsher, A. S. and Izokh, A. E. (1995). Tectonics, metamorphism and magmatism of the collision zones of the Caledonides of Central Asia. *Geotectonics*, (3), 3–22. (In Russian)
- Fedorovsky, V. S. and Sklyarov, E. V. (2010). Olkhon geodynamic testing ground (Baikal): high-resolution aerospace data and new generation geological maps. *Geodynamics and tectonophysics*, 1 (4), 331–418. (In Russian)
- Chipizubov, A. V., Smekalin, O. P. and Imaev, V. S. (2015). Paleoseismic dislocations and paleoearthquakes in the Primorsky fault zone (Lake Baikal). *Problems of Engineering Seismology*, 42 (3), 5–19. (In Russian)
- Geological map of scale 1:200,000, sheet no. 48-XXIV*. (1959). Moscow: Gesgeoltekhizdat cartographic factory of the USSR Ministry of Geology and Subsoil Protection.
- Hombert, C., Schnyder, J., Roche, V., Leonardi, V. and Benzaggagh, M. (2018). The brittle and ductile components of displacement along fault zones. *Geological Society. London, Special Publications*, 439, 395–412.
- Khlystov, O. M., Mats, V. D., Vorob'eva, S. S., Klimansky, A. V., de Batiste, M. and Cheramikhola, M. (2000). The structure and development of the underwater Academic ridge. *Geology and geophysics*, 41 (6), 819–824. (In Russian)
- Lunina, O. V., Gladkov, A. S., Afonkin, A. M. and Serebryakov, E. V. (2016). The style of deformations in the zone of dynamic influence of the Mondinsky fault according to ground-penetrating radar data

* Field studies were carried out with partial financial support from IZK SB RAS within the framework of the basic project No. FWEF-2021-0009. Georadar profiling, data processing and interpretation with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 19-35-90003.

- (Tunkinskaya depression, south of Eastern Siberia). *Geology and Geophysics*, 9, 1616–1633. <https://doi.org/10.15372/GiG20160902> (In Russian)
- Lunina, O. V., Gladkov, A. S., Gladkov, A. A. and Denisenko, I. A. (2018). Middle Cedar paleoseismic dislocation in the Baikal ridge: structure and estimation of displacements based on GPR data. *Geodynamics and Tectonophysics*, 9 (2), 531–555. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0360> (In Russian)
- Lunina, O. V., Gladkov, A. S. and Cheremnykh, A. V. (2002). Fracture structure and fracturing of the Primorsky fault zone (Baikal rift system). *Geology and geophysics*, 43 (5), 446–455. (In Russian)
- Lunina, O. V. (2016). Digital map of faults for the Pliocene-Quaternary stage of the development of the earth's crust in the south of Eastern Siberia and the adjacent territory of Northern Mongolia. *Geodynamics and Tectonophysics*, 7 (3), 407–434. (In Russian)
- Lunina, O. V. (2001). Lithospheric stress field as a control over seismogenic fault parameters and earthquake magnitudes. *Russian Geology and Geophysics*, 42 (9), 1389–1398.
- Mats, V. D. (2015). Baikal Rift: Pliocene (Miocene) Quaternary episode or a product of long development from the Late Cretaceous under the influence of various tectonic factors. Overview of views. *Geodynamics and Tectonophysics*, 4 (6), 467–489. (In Russian)
- McCalpin, J. P. (ed.) (2009). *Paleoseismology*. 2nd ed. Burlington, Mass.: Academic Press.
- Obukhov, S. P. and Ruzhich, V. V. (1971). The structure and position of the Primorsky fault-shift in the main fault system of the Western Baikal region. *Geology and useful minerals of Eastern Siberia*. Irkutsk: IZK SO RAN Publ., 65–68. (In Russian)
- Sherman, S. I. and Dneprovsky, Yu. I. (1989). *Stress fields crust and geological and structural methods of their study*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Subsurface sounding radio (georadar) "OKO-2". Technical description. User manual.* (2009). Moscow Region: OOO "Logicheskie sistemy". (In Russian)
- Vladov, M. L. and Starovoitov, A. V. (2004). *Introduction to GPR*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Vladov, M. L. and Sudakova, M. S. (2017). *Georadar. From physical foundations to promising directions*. Study guide. Moscow: Geos Publ. (In Russian)
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, and rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974–1002.
- Wheeler, R. L. (1989). Persistent segment boundaries on basin-range normal faults. In: D. P. Schwartz, R. H. Sibson, ed., *Fault Segmentation and Controls of Rupture Initiation and Termination*. U. S. Geol. Surv. Open File Rep., 89–315, 432–444.
- Yandex.Maps. (n. d.). *Search and information mapping service Yandex*. [online] Available at: <https://yandex.ru/maps/?l=sat&ll=106.009977%2C52.161568&z=8> [Accessed 19 Apr. 2021]. (In Russian)

Received: May 19, 2020
Accepted: February 26, 2021

Contact information:

Ivan A. Denisenko — denisenkoivan.1994@mail.ru
Oksana V. Lunina — lunina@crust.irk.ru