GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

TECTONOPHYSICS

2024 VOLUME 15 ISSUE 4 ARTICLE 0776

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2024-15-4-0776

SEISMOGENIC ZONE OF CAPE SHARTLAY (LAKE BAIKAL): SPECIFIC FEATURES OF STRUCTURE, DISPLACEMENTS AND RUPTURE GROWTH

O.V. Lunina ✉, **I.A. Denisenko**, **E.B. Ignatenko**, **A.A. Gladkov**

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. Seismogenic deformations of Cape Shartlay represent a very young fault system on the northwestern coast of Lake Baikal. Their study is providing an important opportunity to measure earthquake magnitudes, to identify areas where earthquakes are more likely to occur, and to estimate the probability of earthquake occurrence as applied to seismically active Baikal region. In this connection, the present work was aimed at characterizing in detail the structure, displacements, and reconstruction of the rupture propagation model. The study is based on photogrammetric processing and interpretation of the unmanned aerial survey data, as well as on morphostructural analysis of the displacement profiles and georadiolocation (GPR) data. It has been found that seismogenic ruptures of Cape Shartlay formed under prevailing extension conditions during no less than two earthquakes with magnitudes M_w≥7.0, M_s≥7.2. Seismic rupture propagation was primarily northward. The main rupture with displacement amplitude of more than 2 m contributed 39 to 93 % to the total surface displacement depending on the amount of dislocations on the transverse profile. It is shown that the length of a certain rupture increased almost instantaneously, then displacements along some of the ruptures stopped. A significant elongation of ruptures is primarily due to their merging. The present-day seismogenic zone is highly permeable. According to the tectonophysical model of formation of inner structure of the fault zone, the development of the seismogenic rupture system of Cape Shartlay corresponds to the late disjunctive stage. This means that the rupturing process in this segment of the North Baikal fault may not have stopped yet, and the lack of large earthquakes in the instrumental record implies the accumulation of stress in its southern part. The obtained results provide an opportunity to reconstruct the development of large fault zones by studying the displacement profiles and, therefore, to localize more precisely the places where future earthquakes may occur.

KEYWORDS: rupture; displacement; zone; earthquake magnitude; model; aerial photography; georadiolocation (GPR); Cape Shartlay; Baikal

FUNDING: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for 2021–2025, project FWEF-2021-0009.

EDN: ATKRJP

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Oksana V. Lunina, lounina@crust.irk.ru

Received: April 23, 2024
Revised: June 4, 2024
Accepted: June 14, 2024

FOR CITATION: Lunina O.V., Denisenko I.A., Ignatenko E.B., Gladkov A.A., 2024. Seismogenic Zone of Cape Shartlay (Lake Baikal): Specific Features of Structure, Displacements and Rupture Growth. Geodynamics & Tectonophysics 15 (4), 0776. doi:10.5800/GT-2024-15-4-0776

Supplementary files: Lunina_et_al_Suppl_1.xlsx

СЕЙСМОГЕННАЯ ЗОНА НА МЫСЕ ШАРТЛАЙ (оз. БАЙКАЛ): ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, СМЕЩЕНИЙ И РОСТА РАЗРЫВОВ

О.В. Лунина, И.А. Денисенко, Е.Б. Игнатенко, А.А. Гладков

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. Сейсмогенные деформации мыса Шартлай представляют собой крайне молодую систему нарушений на северо-западном побережье оз. Байкал. Их изучение имеет важное значение для оценки магнитуды, мест и возможности возникновения землетрясений в сейсмически активном Байкальском регионе. В связи с этим цель настоящей работы заключалась в детальной характеристике строения, смещений и реконструкции модели распространения разрывов. Исследования основаны на фотограмметрической обработке и дешифрировании материалов беспилотной аэрофотосъемки, морфоструктурном анализе профилей смещений и данных георадиолокации. Установлено, что сейсмогенные разрывы мыса Шартлай сформировались в условиях преобладающего растяжения при не менее двух землетрясениях с магнитудой M_w≥7.0, M_s≥7.2. Распространение нарушений во время сейсмических событий происходило преимущественно в северном направлении. Вклад главного разрыва с амплитудой подвижки более 2 м в общее смещение земной поверхности составлял от 39 до 93 % в зависимости от количества дислокаций на поперечном профиле. Показано, что увеличение длины отдельного нарушения происходило практически мгновенно, затем по некоторым разрывам смещение прекращалось. Значительное удлинение разрывов связано преимущественно с их объединением. В настоящее время сейсмогенная зона имеет высокую проницаемость. Согласно тектонофизической модели формирования внутренней структуры разломной зоны развитие системы сейсмогенных разрывов на мысе Шартлай соответствует поздней дизъюнктивной стадии. Это означает, что процесс разрывообразования на данном сегменте Северобайкальского разлома еще не завершен, а отсутствие в инструментальное время сильных землетрясений означает накопление напряжений в его южной части. Полученные результаты показывают возможность реконструировать развитие зон крупных разломов путем изучения профилей смещений и таким образом точнее локализовать потенциальные места возникновения будущих сейсмических событий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разрыв; смещение; зона; магнитуда землетрясения; модель; аэрофотосъемка; георадиолокация; мыс Шартлай; Байкал

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук на 2021–2025 гг., проект № FWEF-2021-0009.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмогенная зона мыса Шартлай представляет собой систему поверхностных разрывов, которые с перерывом прослеживаются от р. Сарма до р. Куркула вдоль активных разломов северо-западного побережья оз. Байкал (рис. 1) [ActiveTectonics, 2024]. Впервые нарушения были изучены В.П. Солоненко и В.М. Жилкиным и показаны на схеме в виде сейсмогенного сброса, рассекающего мыс в тыловой части [Solonenko, 1968]. Более детальный план структур в контексте общего описания палеосейсмодислокаций в зоне Северобайкальского разлома был дан А.В. Чипизубовым с соавторами [Chipizubov et al., 2003]. Исследователи отметили уступы, приразломные рвы и трещины растяжения в молодой генерации речного конуса выноса, формирующего мыс, а также провели зачистку малоамплитудного сместителя дислокации. Неожиданно вместо сброса они вскрыли взброс с падением на запад. Данная находка породила новую проблему кинематики смещений по сейсмогенным разрывам Байкальского рифта, и в последующих публикациях активно продвигалась идея о деформациях сжатия в его центральной части [Chipizubov et al., 2015, 2019; Smekalin, Eskin, 2021].

В то же время основательного анализа данных о разрывах мыса Шартлай и тем более их прослеживания на глубину сделано не было. Отчасти это связано с местоположением мыса в пределах особо охраняемой природной территории – Байкало-Ленского заповедника. Деформации представляют собой крайне молодую систему нарушений из известных на северо-западном побережье оз. Байкал. Последнее взаимосвязанное с ней землетрясение могло быть 2145–2463 лет назад, когда одновременно вскрывалась Среднекедровая палеосейсмодислокация [Chipizubov et al., 2010; Lunina et al., 2020]. Проявление смещений в практически горизонтальной поверхности конуса выноса р. Шартлай делает этот объект благоприятным для детального изучения смещений по разрывам, что способствует корректной оценке магнитуды землетрясений.

Исследования последних лет на северо-западном побережье оз. Байкал показали высокую эффективность комплексирования методов беспилотной аэрофотосъемки, дешифрирования, морфоструктурного анализа уступов и георадиолокации для изучения деформаций земной поверхности [Lunina et al., 2023; Denisenko, Lunina, 2023]. Настоящая работа является их продолжением с целью изучения строения зоны

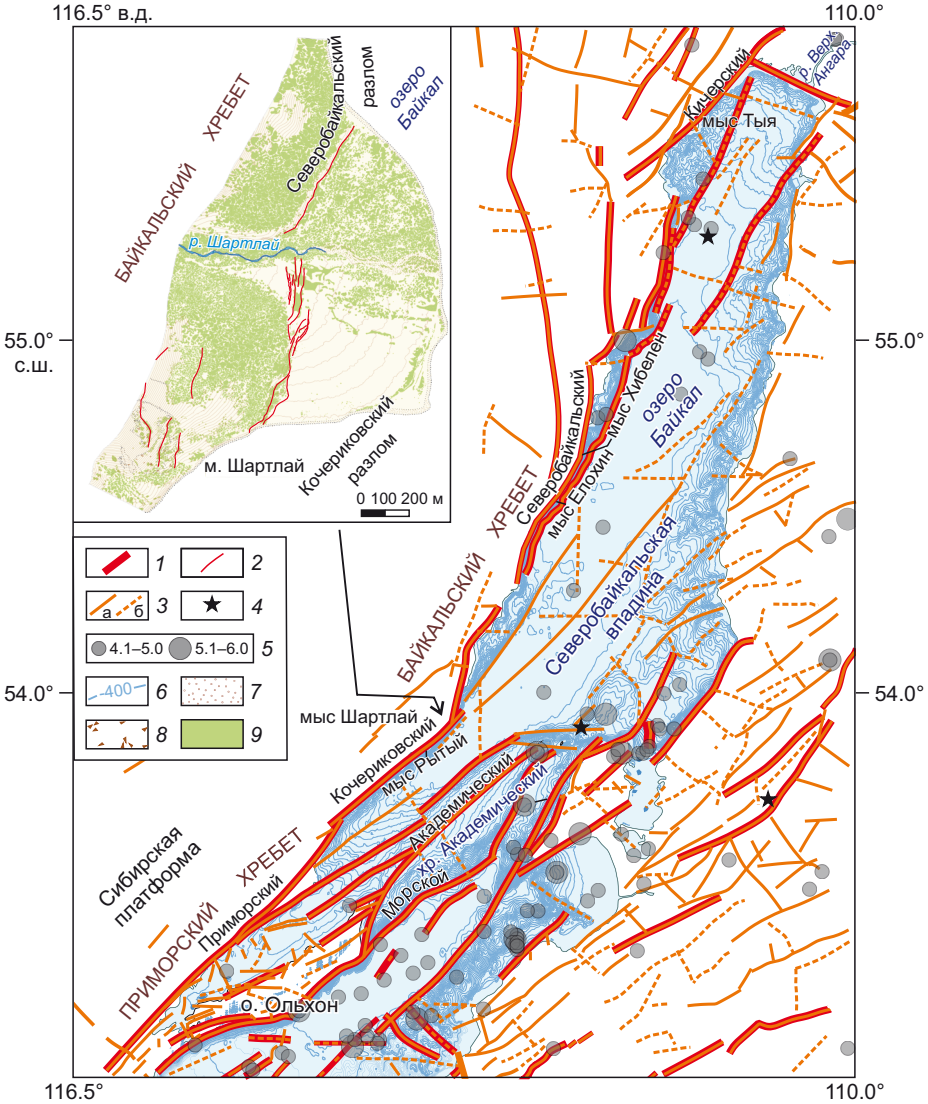


Рис. 1. Структурное положение мыса Шартлай.
1 – сейсмоактивные разломы, *2* – сейсмогенные разрывы; *3* – достоверные (*а*) и предполагаемые (*б*) плиоцен-четвертичные разломы; *4* – эпицентры исторических землетрясений по [Kondorskaya, Shebalin, 1982]; *5* – эпицентры землетрясений с магнитудой *M*≥4.1 за 1950–2023 гг. по данным Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (http://seis-bykl.ru/index.php); *6* – изобаты, м; *7* – галечные поверхности, *8* – осыпи; *9* – растительность.

Fig. 1. Structural position of Cape Shartlay.
1 – seismically active faults; *2* – *3* – ruptures; reliable (*a*) and inferred Pliocene-Quaternary faults (*б*); *4* – epicenters of historical earthquakes after [Kondorskaya, Shebalin, 1982]; *5* – earthquake epicenters with a magnitude of *M*≥4.1 for 1950–2023 according to the data of the Baikal Department of the FRS GS RAS (http://seis-bykl.ru/index.php): *6* – isobaths, m; *7* – pebble surfaces; *8* – talus deposits; *9* – vegetation.

сейсмогенных разрывов на мысе Шартлай, оценки смещений земной поверхности во время землетрясений и их возможной магнитуды. Детальное изучение профиля смещений, в свою очередь, позволяет реконструировать модель распространения разрывов во время землетрясений, что впервые предлагается для фрагмента сейсмогенной зоны в Байкальском рифте.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Мыс Шартлай образован аллювиально-пролювиальными отложениями одноименной реки и представляет собой низменную площадку, покрытую наполовину степной растительностью (рис. 2). Для его исследования авторы применили беспилотную аэрофотосъемку и впоследствии дешифрирование с целью картирования сейсмогенных разрывов и основных форм рельефа, которые можно наблюдать в прилагаемом видео (Lunina_et_al_2024_video.mp4).

Для полетов в 2020 г. использовался беспилотный летальный аппарат (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro V2.0, в 2021 – БПЛА DJI Phantom 4 RTK. Высота полета составляла 100–130 м относительно земной поверхности при скорости полета не более 30 км/ч.

Рис. 2. Аэрофотоснимок мыса Шартлай от 02.07.2023 г.
Fig. 2. Aerial image of Cape Shartlay taken on July 2, 2023.

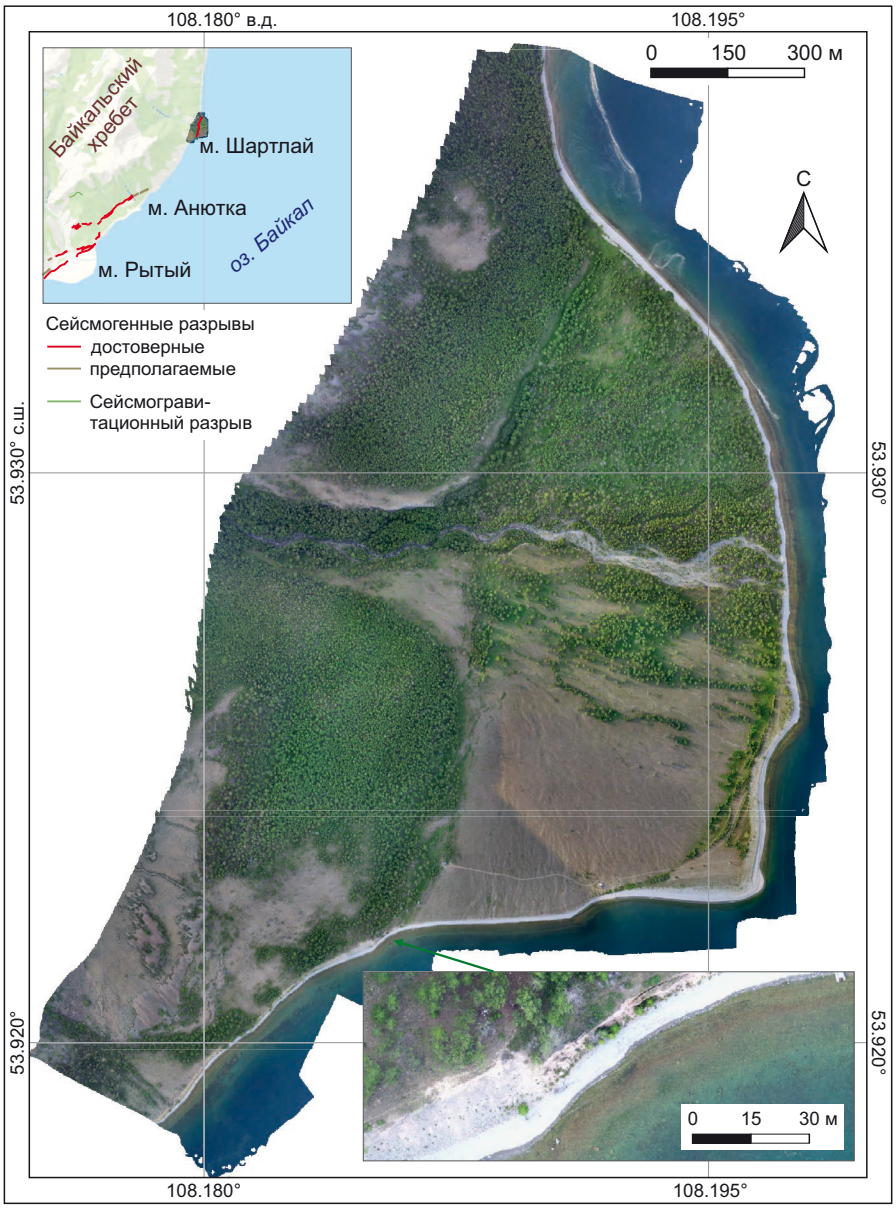


Рис. 3. Ортофотоплан мыса Шартлай и окрестностей по данным аэрофотосъемки 04.07.2020 г. [Lunina, Gladkov, 2023].
Fig. 3. Orthophotomap of Cape Shartlay and surroundings according to the July 4, 2020 aerial survey data [Lunina, Gladkov, 2023].

Фотограмметрическая обработка проводилась в программе «Agisoft Metashape» [Agisoft Metashape, 2021]. В результате получены материалы со следующими параметрами: съемка 04.07.2020 г.: площадь – 1.489 км^2, количество фотографий – 1664, пространственное разрешение – 3.73 см/пкс для ортофотоплана и 3.3 см/пкс для цифровой модели местности (ЦММ); съемка 24.06.2021 г.: площадь – 0.96 км^2, количество фотографий – 685, пространственное разрешение – 4.36 см/пкс для ортофотоплана и 2.18 см/пкс для ЦММ (см. в пониженном качестве на сайте: http://demdata.activetectonics.ru/shartlai2020.html). В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены ортофотоплан и его фрагмент, на рис. 5 – часть ЦММ. Кроме того, для изучаемого участка авторами созданы сферические 360-градусные панорамы, размещенные на: http://activetectonics.ru/Panoramas/Shartlay/index.html [Lunina, Gladkov, 2023].

После дешифрирования форм рельефа и сейсмогенных разрывов для каждого из них по ЦММ 2021 г. рассчитывалась высота уступов и вертикальные смещения исходных геоморфологических поверхностей (SO). На профилях, секущих несколько разрывов, параметры суммировались.

Для прослеживания разрывов на глубину выполнены георадарные профили (рис. 6, врезка). Использовались георадары ОКО-2 и ОКО-3 российского производства с антенными блоками АБДЛ «Тритон», АБ-90 и АБ-150/400 М3. АБДЛ «Тритон» – неэкранированная антенна с дипольным излучателем 50 МГц, характеризующаяся максимальной глубиной 18 м и разрешающей способностью 1 м. Экранированные антенны АБ-90 и АБ-150/400 М3 с центральной частотой 90 и 150/400 МГц при благоприятных условиях геологической среды позволяют достигать глубины

Рис. 4. Сейсмогенные разрывы на правобережье р. Шартлай и отсутствие воды в русле ручья справа от зоны разрывов.

Fig. 4. Earthquake ruptures on the right bank of the Shartlay River and the lack of water in the creek bed to the right of the rupture zone.

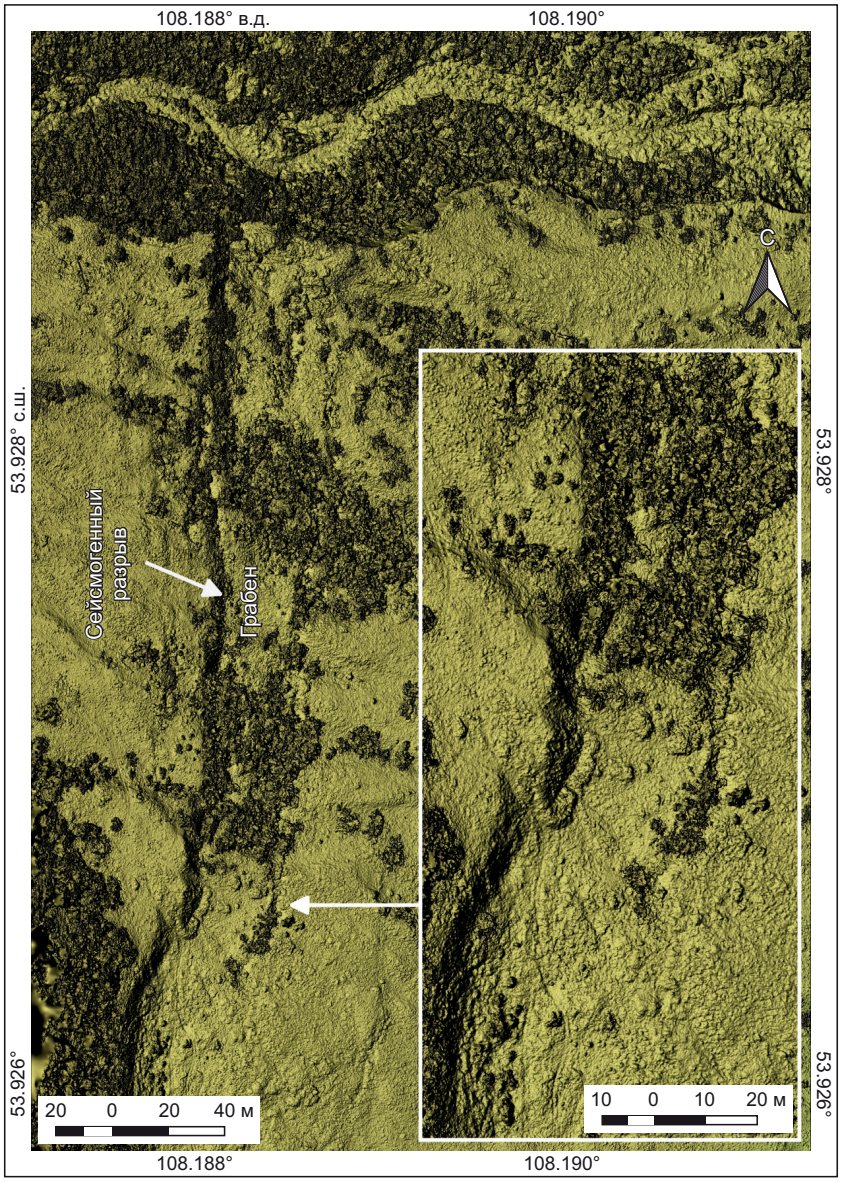


Рис. 5. Фрагмент ЦММ с сейсмогенными разрывами и грабеном на правобережье р. Шартлай по данным аэрофотосъемки 24.06.2021 г.

Fig. 5. A fragment of DSM with ruptures and a graben on the right bank of the Shartlay River according to the June 24, 2021 aerial survey data.

16 м и 12/5 м при разрешающей способности 0.5 и 0.35/0.15 м соответственно. Измерение рельефа местности для его учета на радарограммах проведено электронным тахеометром Leica с шагом по каждому профилю 1.0–1.5 м.

Для иллюстрации результатов в работе приведены наиболее информативные радарограммы, полученные с частотой 50, 90 и 150 МГц. Диэлектрическая проницаемость среды (ε), равная 5, определена по отражению дифрагированных волн (гиперболы) в программе GeoScan32. Для обработки радарограмм использованы стандартные операции, описанные в работе [Vladov, Sudakova, 2017] и примененные авторами в других районах Байкальской рифтовой зоны [Lunina, Denisenko, 2020; Denisenko, Lunina, 2023; и др.].

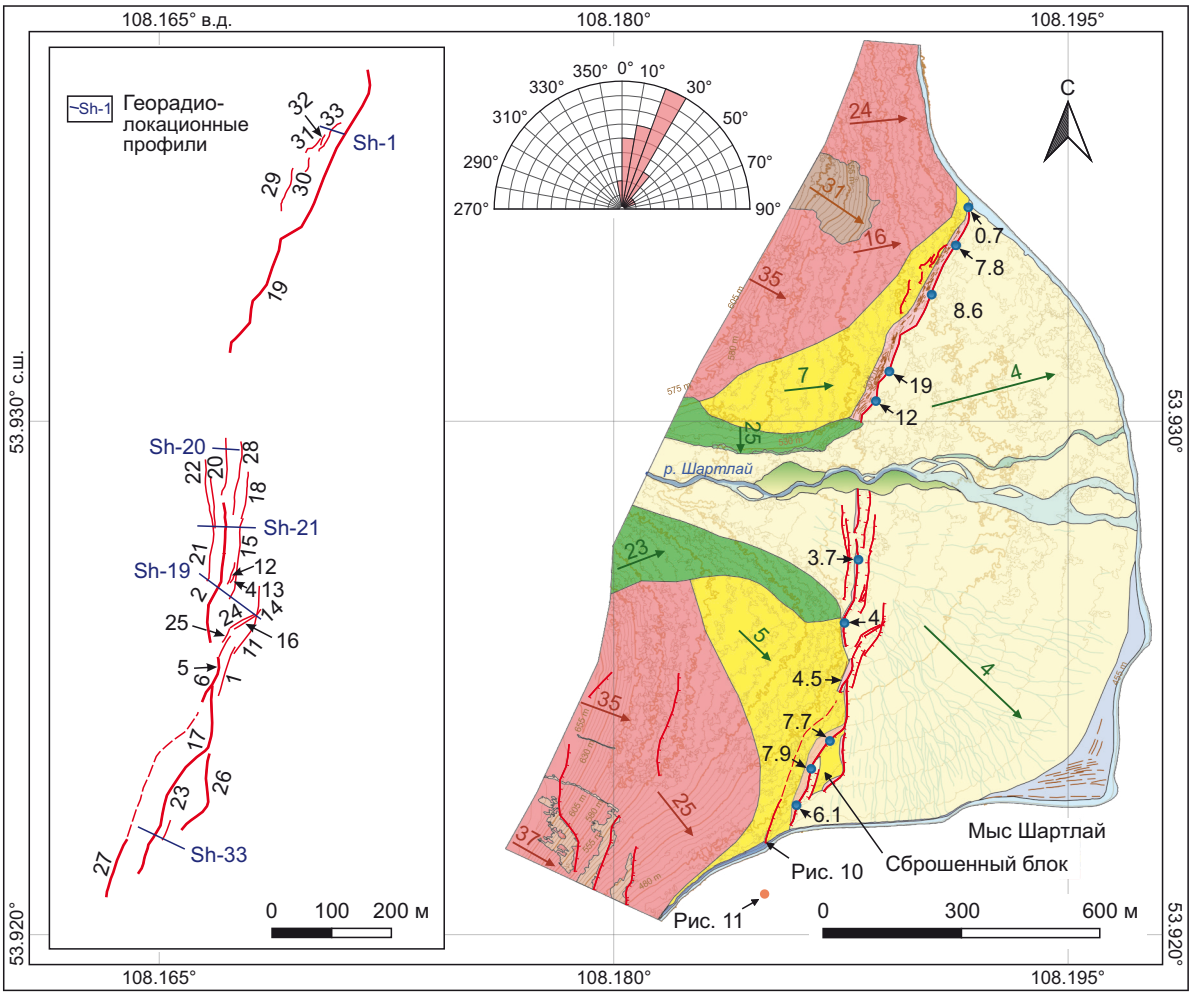
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Характеристика зоны разрывов на поверхности

По результатам дешифрирования построена структурно-геоморфологическая карта мыса Шартлай и окрестностей (рис. 6). Ее основную площадь занимает современный речной конус выноса, сложенный аллювиально-пролювиальными и селевыми отложениями. По обе стороны долины отмечается эрозионный склон и предыдущий конус выноса, граничащий с современным по сейсмогенному уступу высотой от 2.5 до 24.0 м.

Поверхности обоих конусов выноса слева от русла ручья залесены (см. рис. 2, 3). На плоской поверхности более древнего наблюдались вывалы плохо окатанных глыб и валунов, хотя в целом он состоит из валунов и

гальки средней степени окатанности; в заполнителе – мелкозем, дресва с небольшим количеством песка. Состав такого аллювия напоминает отложения селевых потоков. По внешнему виду древний конус подобен первому конусу выноса р. Рита [Lunina et al., 2023, Fig. 6]. Его тыловой шов не выражен, так как перекрыт делювиальным шлейфом с коренного склона. Основной структурной достопримечательностью поверхности предыдущего конуса выноса является наличие пяти сейсмогенных рвов глубиной 0.5–1.5 м, прослеженных



Формы рельефа, созданные флювиальными процессами
- Современный конус выноса
- Предыдущий конус выноса
- Терраса
- Эрозионный склон
- Современное сухое русло
- Отмершее русло

Формы рельефа, созданные склоновыми процессами
- Осыпи
- Фрагмент обвала

Формы рельефа озерного происхождения
- Аккумулятивный берег
- Абразионный берег
- Древние пересыпи, косы, лагуны

Формы рельефа, созданные эндогенными процессами
- Палеосейсмогенный уступ
- Тектонический склон

Гидрография
- Тальвеги отмерших русел
- р. Шартлай

Палеосейсмогенные сбросы
Достоверные
- с высотой уступа более 2 м
- с высотой уступа менее 2 м
- Предполагаемые

Прочие разрывы
- Гравитационные

Прочие элементы
- Изолинии через 5 м
- Направление валов, кос, пересыпей
- Направление и крутизна склона
- Вертикальное смещение в избранных точках, м

Рис. 6. Структурно-геоморфологическая карта мыса Шартлай и окрестностей. На врезке пронумерованы разрывы и показаны георадиолокационные профили.

Fig. 6. Structural and geomorphological map of Cape Shartlay and the surrounding area. The inset numbers the ruptures and shows ground penetrating radar (GPR) profiles.

в полевом маршруте с помощью ручного GPS-навигатора (рис. 6). Эти нарушения отчетливо отразились и на георадарном разрезе (рис. 7).

Справа от русла р. Шартлай современный конус рассечен сейсмогенными разрывами, которые в центральной части образуют грабен (см. рис. 5; рис. 8, а, рис. 9, а). Их уступы заметно ниже тех, которые прилегают к более древней поверхности.

В целом зона в пределах мыса состоит из системы субпараллельных разрывов максимальной шириной 111 м, группирующихся в три основных сегмента. Пять сейсмогенных разрывов дешифрируются на склонах

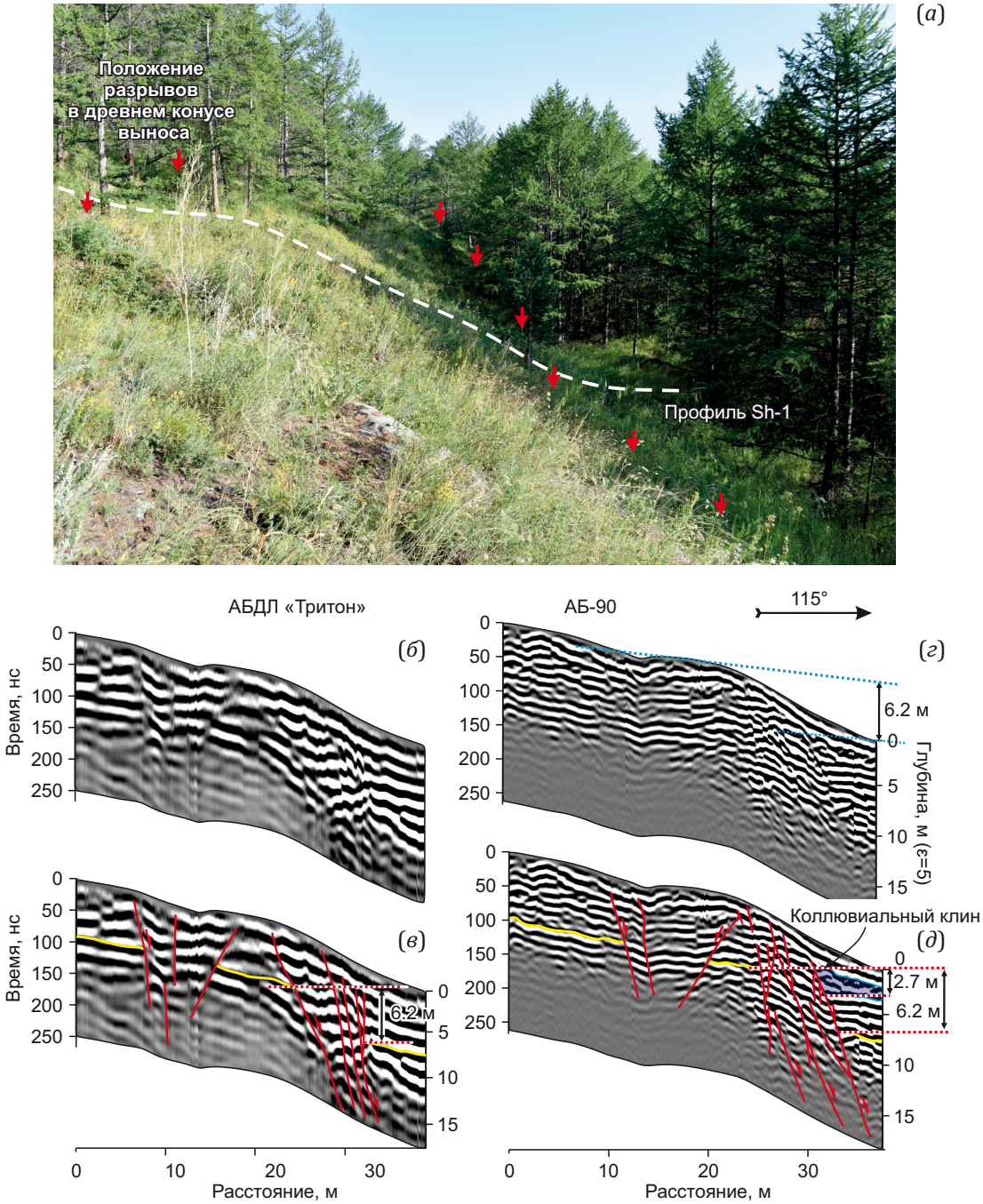


Рис. 7. Георадиолокационный профиль Sh-1 вкрест простирания сейсмогенного уступа (*а*) и радарограммы, полученные с помощью георадара ОКО-2 с антеннами АБДЛ «Тритон» (*б, в*) и АБ–90 (*г, д*), в том числе с наложенной интерпретацией. Красными линиями и стрелками на фото показаны разрывы, желтыми на радарограммах – кровля коррелируемого георадарного комплекса. Числа указывают амплитуду смещения по разрывам.

Fig. 7. GPR profile Sh-1 across the strike of the seismogenic scarp (*a*) and radargrams obtained using OKO-2 GPR with ABDL "Triton" (*б, в*) and AB–90 (*г, д*) antennas, including superimposed interpretation.
The red lines and arrows show the ruptures, the yellow lines in the radargrams show the top of the correlated GPR complex. The numbers indicate the displacement amplitude along the ruptures.

Байкальского хребта. Вместе с ними зона дизъюнктивных деформаций увеличивается до 560 м. Общая длина системы разрывов составляет 1.9 км, в пределах тыловой части мыса Шартлай – 1.45 км. Из-за значительной крутизны (до 37°) на склонах Байкальского хребта вдоль нарушений образуются осыпи. Простирание откартированных разрывов преимущественно 0–30°; некоторые непротяженные дислокации имеют ориентировку 30–50° (см. рис. 6).

С южной стороны мыса в абразионном уступе вскрывается слой серой, плоской и хорошо окатанной гальки с редкими валунами, перекрытый делювиальными осадками и сброшенный по сейсмогенному разрыву (рис. 10). Основная часть сместителя скрыта под осыпью. Отложения окатанной гальки в висячем крыле опущены ниже земной поверхности. Величина вертикального смещения, измеренная при помощи тахеометра по кровле 2-го серого делювиального слоя, 8.36 м. Строение и анализ мощностей разреза показывают, что разрыв сформировался после его образования и был перекрыт рыжими делювиальными отложениями. Об этом свидетельствуют равные мощности 2-го серого слоя и увеличение мощности 1-го слоя сверху в висячем крыле.

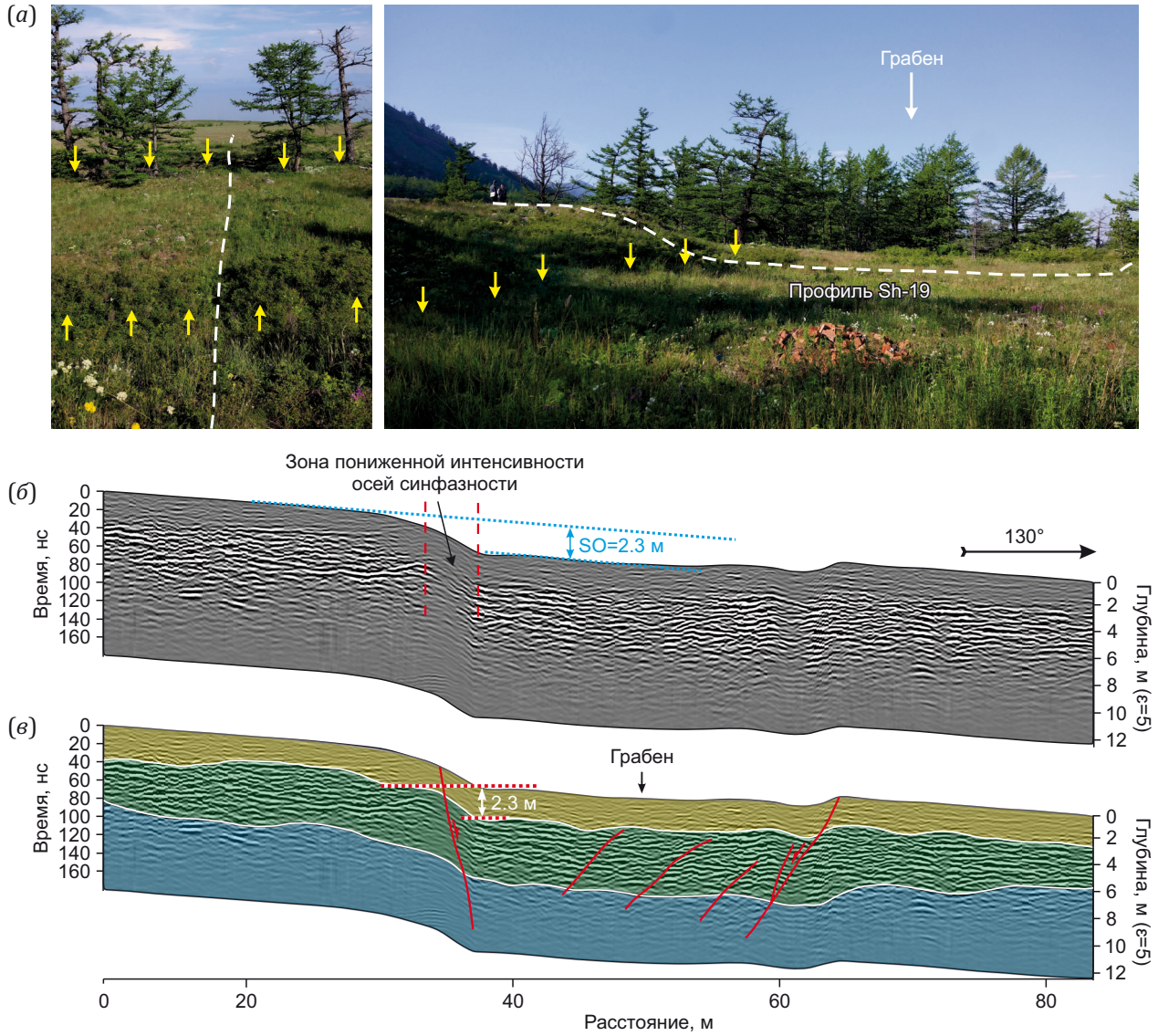


Рис. 8. Георадиолокационный профиль Sh-19 вкрест простирания сейсмогенного уступа (*а*) и радарограмма, полученная с помощью георадара ОКО-3 с антенной АБ-150/400 с используемой центральной частотой 150 МГц (*б*), в том числе с наложенной интерпретацией (*в*).
Красными линиями и желтыми стрелками на фото показаны разрывы, белыми линиями – границы георадарных комплексов. Числа указывают амплитуду смещения по разрывам.

Fig. 8. GPR profile Sh-19 across the strike of the seismogenic scarp (*a*) and a radargram obtained using ОКО-3 GPR with АБ-150/400 antenna which works at a center frequency of 150 MHz (*б*), including superimposed interpretation (*в*).
The red lines and yellow arrows show the ruptures, the white lines show the boundaries of the GPR complexes. The numbers indicate the displacement amplitude along the ruptures.

В 2023 году в 150 м южнее обнажения слабосцементированных отложений авторами обследовано дно оз. Байкал подводным роботом CHASING M2. На глубине 1.7 м на линии разрыва, проецируемой с берега, у подножия предполагаемого под водой частного уступа среди галек и валунов был обнаружен песчаный вулкан (рис. 11). Примечательно то, что в районе выхода деформаций вблизи действующего русла вода р. Шартлай уходит под землю (см. рис. 4). Эти наблюдения свидетельствуют о высокой проницаемости зоны разлома. Аналогичная инфильтрация происходит на мысе Рытом, расположенном в ~13 км юго-западнее описываемой площади.

3.2. Основные параметры сейсмогенных разрывов

Основные параметры сейсмогенных разрывов, полученные на основе морфоструктурного анализа, представлены в Прил. 1, табл. 1.1, где наряду с длиной (L) поверхностного нарушения дана максимальная высота (H_{max}) и наклон уступа (α), а также вертикальное смещение исходных геоморфологических поверхностей (SO_{max}), зафиксированные вдоль разрыва. Графики зависимости $SO_{max}=f(L)$ и $SO_{max}=f(H_{max})$ демонстрируют стандартные закономерности, когда при увеличении одного параметра возрастает другой (рис. 12, а, б). Имеется тенденция, что чем больше смещение, тем больше крутизна уступа (рис. 12, в). Тем не менее при одной и той же величине одновозрастного смещения в молодом конусе выноса параметр α варьируется от 10 до 35°. Аналогично при минимальном 0.3 м и максимальном 12 м смещениях крутизна является практически одинаковой – 34–35°. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что наклон эскарпа в пределах конусов выноса не является истинным показателем его

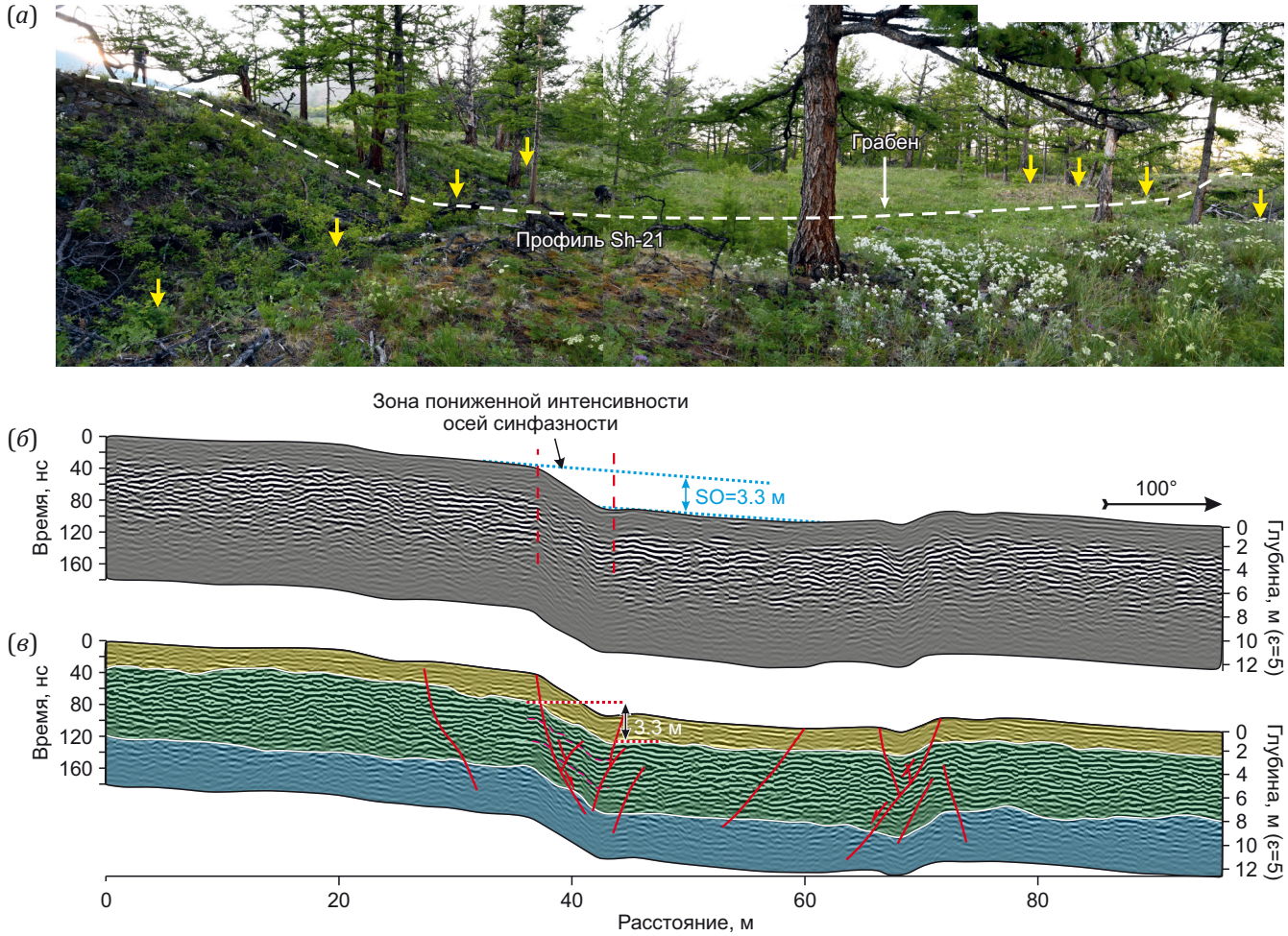


Рис. 9. Георадиолокационный профиль Sh-21 вкрест простирания сейсмогенного уступа (*а*) и радарограмма, полученная с помощью георадара ОКО-3 с антенной АБ-150/400 с используемой центральной частотой 150 МГц (*б*), в том числе с наложенной интерпретацией (*в*).
Красными линиями и желтыми стрелками на фото показаны разрывы, белыми линиями – границы георадарных комплексов. Числа указывают амплитуду смещения по разрывам.

Fig. 9. GPR profile Sh-21 across the strike of the seismogenic scarp (*a*) and a radargram obtained using ОКО-3 GPR with АБ-150/400 antenna which works at a center frequency of 150 MHz (*б*), including superimposed interpretation (*в*).
The red lines and yellow arrows show the ruptures, the white lines show the boundaries of the GPR complexes. The numbers indicate the displacement amplitude along the ruptures.

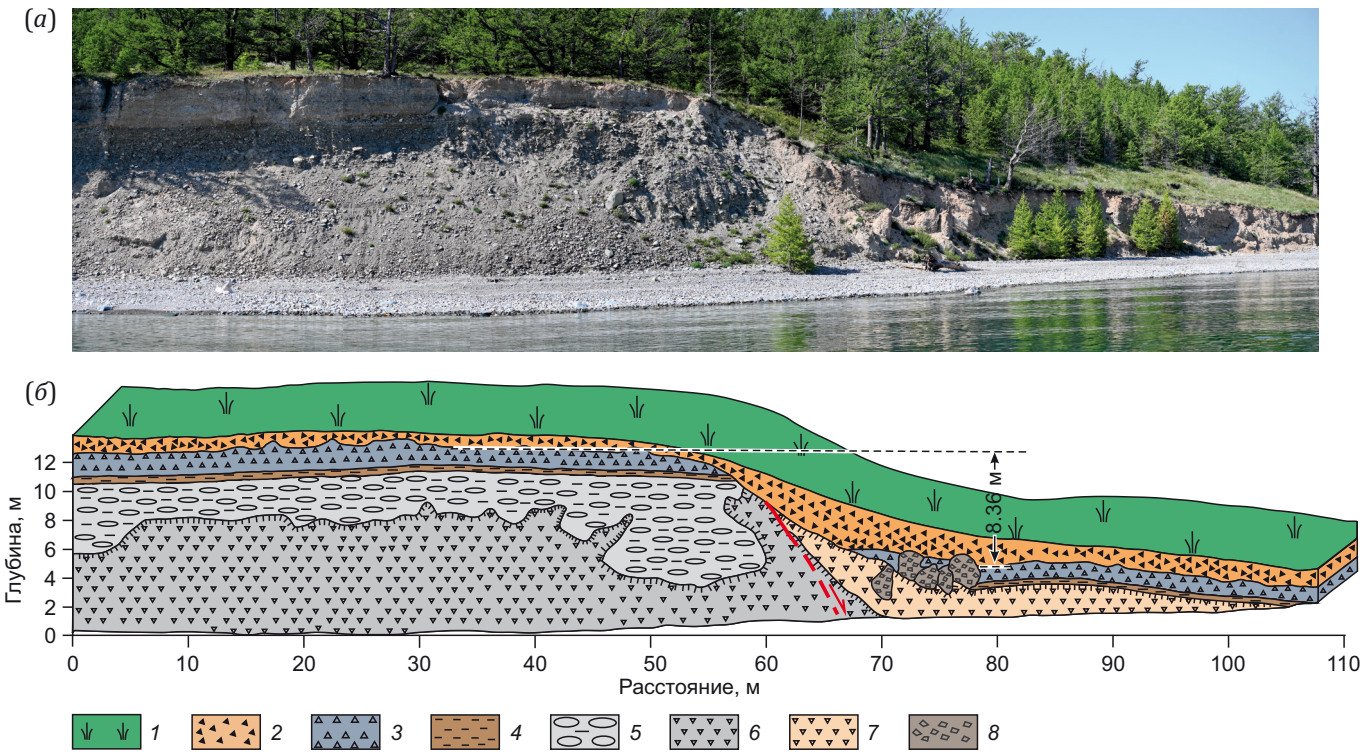


Рис. 10. Панорама (*а*) и геологический разрез (*б*) абразионного уступа вкрест простирания сейсмогенного разрыва.
1 – земная поверхность; *2* – рыжие слабосцементированные делювиальные отложения с глинистым цементом (50 % глины); *3* – серые делювиальные отложения с глинистым цементом (80 % обломков); *4* – рыжий слой, схожий с верхним, но с более крупными обломками (50 % глины); *5* – серая плоская хорошо окатанная галька с редкими валунами; *6* – осыпь серого цвета; *7* – осыпь рыжего цвета; *8* – обвалившиеся блоки.

Fig. 10. Photomosaic (*a*) and geological section (*б*) of an abrasion scarp across the strike of a seismogenic rupture.
1 – earth's surface; *2* – red, weakly consolidated deluvial deposits with clayed matrix (50 % clay); *3* – gray deluvial deposits with clayed matrix (80 % of clasts); *4* – red layer similar to that on top, but with slightly larger fragments (50 % clay); *5* – gray flat well-rounded pebbles with rare boulders; *6* – gray talus; *7* – red-colored talus; *8* – collapsed blocks.

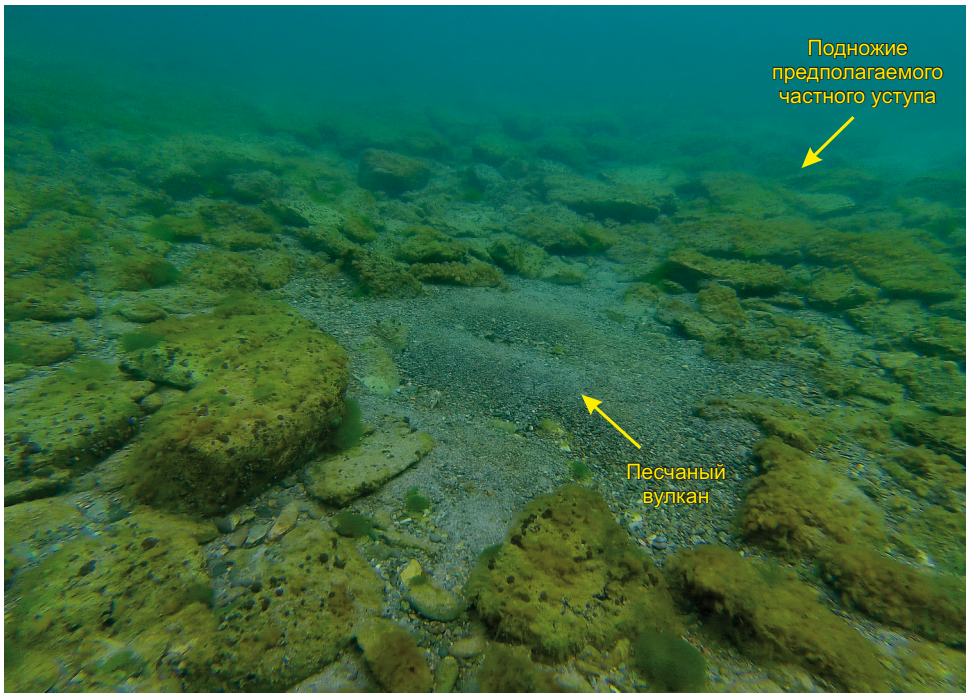


Рис. 11. Предполагаемый уступ на глубине 1.7 м и песчаный вулкан в 150 м южнее разреза на рис. 10.

Fig. 11. An inferred scarp at a depth of 1.7 m and a sandy volcano 150 m south of the section in Fig. 10.

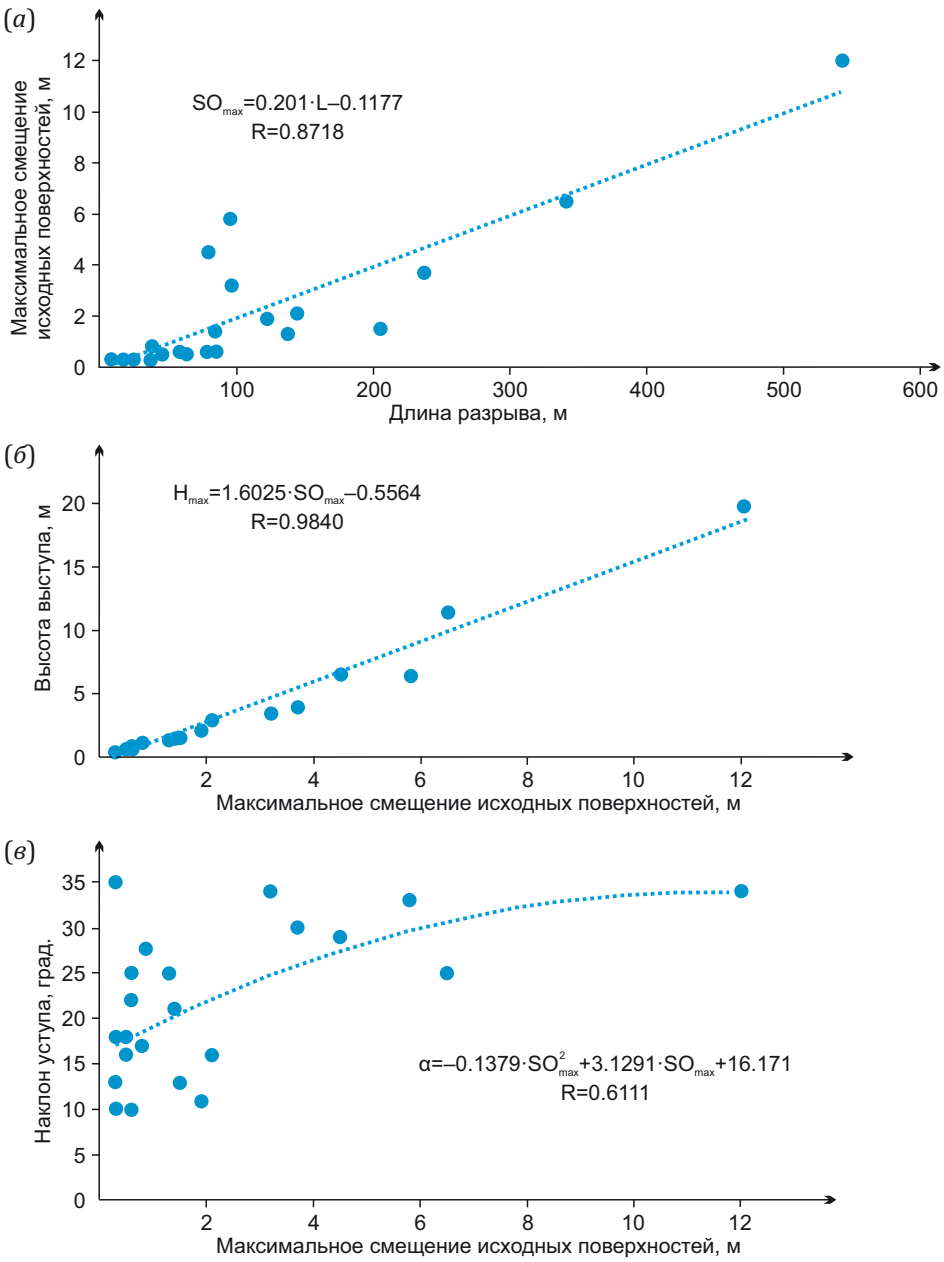


Рис. 12. Графики зависимостей между параметрами сейсмогенных разрывов: (*а*) – между длиной (*L*) и максимальным вертикальным смещением исходных поверхностей (SO_{max}); (*б*) – между SO_{max} и максимальной высотой уступа (H_{max}); (*в*) – между SO_{max} и наклоном уступа (α).

Fig. 12. Graphs of dependences between the rupture parameters: (*a*) – length (*L*) versus the maximum vertical surface offset (SO_{max}); (*б*) – (SO_{max}) versus maximum scarp height (H_{max}); (*в*) – SO_{max} versus scarp slope (α).

возраста – чем круче, тем моложе, как принято считать в мировой практике [McCalpin, 2009; Chipizubov et al., 2003]. Большое влияние на сохранность уступа оказывает тип отложений и экзогенные процессы.

3.3. Распределение смещений в зоне разрывов

Для изучения распределения смещений в наиболее подходящих местах вкрест простирания зоны разрывов создано 62 профиля. По ЦММ рассчитана высота уступов, вертикальные смещения исходных геоморфологических поверхностей по каждому разрыву (*SO*) и суммарные подвижки по профилям через всю зону (Suppl. 1 на странице статьи онлайн). Всего вдоль зоны разрывов длиной 1.45 км было организовано 174 точки. Минимальное измеренное *SO* по единичному разрыву – 0.1 м, максимальное – 19 м. На разрыве № 19 на профилях № 51, 52, 54, 55 отмечены перегибы уступа, свидетельствующие о том, что уступ образовался как минимум при двух сейсмических событиях. В ряде случаев при отчетливой выраженности разрыва видимое смещение отсутствовало. В таком случае пункту измерений присваивалось значение 0.

Графики распределения смещений вдоль сейсмогенной структуры показывают, что величина подвижек

в краевых частях зоны, где молодой конус реки прилегает к древнему, заметно больше, чем у разрывов в центральной части (рис. 13, а). Это наблюдение позволяет предполагать, что высота уступов (рис. 13, б) на границе двух конусов сформировалась не за одно сейсмическое событие. Внутри современного конуса выноса, в местах, не соприкасающихся с древним, высота единичного уступа не превышает 4 м. Максимальное одноактное *SO* по главному разрыву, падающему на восток, – 3.7 м, высота уступа в точке данного измерения равна 3.9 м, угол откоса 40° (рис. 13, в).

В местах, где нарушения образуют грабен, суммарное смещение *SO* учитывает амплитуды вдоль разрывов с азимутом падения на восток, т.е. вертикальные компоненты смещения по основному разрыву T_m по [McCalpin, 2009, Fig. 3.18]. T_m, в свою очередь, включает

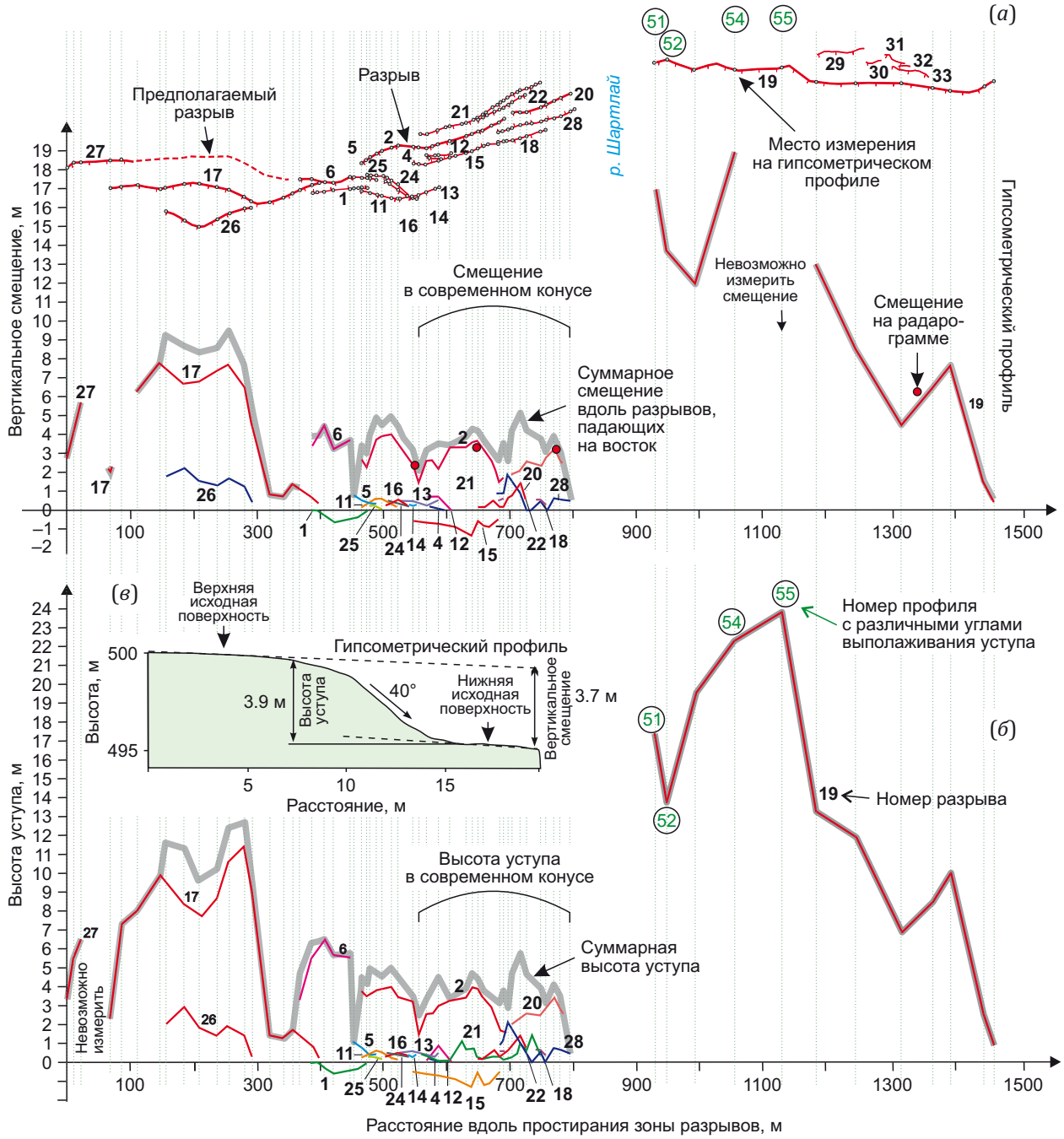


Рис. 13. Распределение параметров вдоль простирания зоны сейсмогенных разрывов на мысе Шартлай: (*а*) – вертикального индивидуального и суммарного смещений; (*б*) – высоты уступа, в т.ч. суммарной по профилю; (*в*) – пример измерения вертикального смещения исходных геоморфологических поверхностей и высоты уступа (по [Lunina et al., 2024], с изменениями).

Fig. 13. Distribution of parameters along the strike of the seismogenic rupture zone at Cape Shartlay: (*a*) – vertical individual and total offsets; (*б*) – scarp height, including total height along the profile; (*в*) – example of measurement of the vertical surface offset and height scarp (modified after [Lunina et al., 2024]).

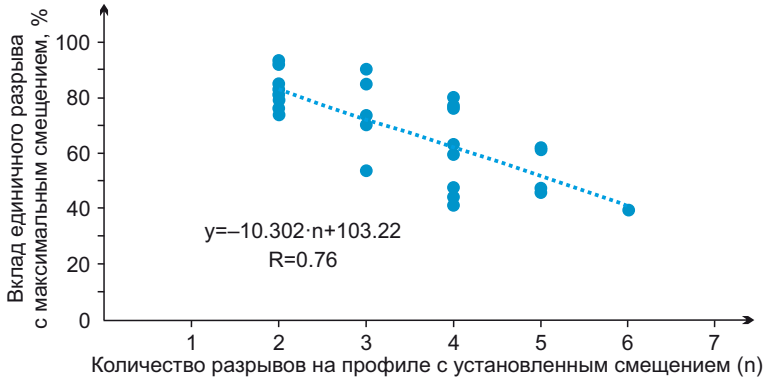


Рис. 14. График зависимости вклада единичного разрыва с максимальным смещением от количества разрывов на профиле с установленной амплитудой подвижки.

Fig. 14. Graphs of dependence of the contribution of a single maximum-displacement rupture versus the number of amplitude-known ruptures on the profile.

величину подвижки вдоль антитетических разрывов T_a, падающих на запад. На графике (рис. 13, а) последние показаны с отрицательными значениями. Из распределений суммарного и индивидуального смещений видно, что в большинстве случаев на каждом профиле основной вклад в величину смещения вносит только один разрыв (рис. 13, а). При более детальном анализе устанавливается ряд особенностей.

В местах развития грабена авторы из T_m отняли T_a и далее для всех поперечных профилей через всю ширину зоны деформаций, где смещение реализовалось по более чем одному разрыву, рассчитали вклад единичного разрыва с максимальным смещением. Этот вклад составляет от 39 до 93 %, но в большинстве случаев более 60 %. С коэффициентом корреляции R=0.76 выявлена обратная линейная зависимость вклада разрыва с максимальной подвижкой в общее смещение от количества разрывов в сейсмогенной зоне на поперечном профиле (рис. 14). Это означает, что чем больше разрывов образуется в зоне, тем более рассеянно происходит реализация напряжений. Вклад величины подвижки по основному разрыву в суммарное смещение при этом уменьшается и перераспределяется по другим, уже существующим или вновь образованным разрывам. Их новые выборки формируются, когда в ходе деформации происходит вращение осей напряжений на 25–45° [Nur et al., 1989]. На особенности проявления деформаций также влияет реология среды, т.е. ее вещественный состав и реакция на механическую нагрузку, а также стадия развития нарушения [Seminsky, 2014].

Несмотря на перераспределение смещений по нескольким разрывам, основная порция напряжений реализуется все же по одному из них, что выражается во вкладе смещения в общую картину деформаций. Для окончаний таких нарушений, как и для большинства, характерны минимальные подвижки (см. рис. 13, разрывы 27, 17, 6, 2, 20). Это определяет особенности распределения суммарного смещения вдоль всей сейсмогенной зоны, даже если по вторичным субпараллельным разрывам в этих местах амплитуды максимальны.

3.4. Строение зоны разрывов на глубине

Георадиолокационные исследования на мысе Шартлай позволили проследить строение разрезов на глубину до 12–15 м.

Профиль Sh-1 пересекает разрывы 19 и 33 в северной части участка (см. рис. 7, а). Первый из них разделяет древний и молодой конусы выноса реки. Второй представляет ров, прослеженный в лесу с помощью ручного GPS-навигатора. Полученные радарограммы (см. рис. 7, б–д) демонстрируют наклонные и крутопадающие нарушения, разрывающие оси синфазности. Оба разрыва на глубине выражены системами трещин, образующими зоны шириной несколько метров. Выделяется кровля маркирующего слоя, которая позволяет определить амплитуду смещения по зоне сброса с аз. пад. 115°∠70–75°, равную 6.2 м. Авторы предполагают, что уступ, связанный с разрывом 19, образовался за два сейсмических события. В ходе первого породы деформировались более пластично, что видно по плавному изгибу осей синфазности на радарограмме, полученной с помощью антенны АБ-90 (см. рис. 7, г, д). Отложения могли быть менее литифицированы на момент события. При втором землетрясении они нарушились четкими ровными разрывами, после чего сформировался ясно различимый коллювиальный клин, по мощности которого определяется амплитуда смещения 2.7 м. По 33-му разрыву деформации имели преимущественно раздвиговый характер.

Профили Sh-19, Sh-20 и Sh-21 пройдены в месте развития сейсмогенных деформаций в молодом конусе (см. рис. 6 (врезка), 8, 9; рис. 15). На профилях 19 и 21 по смещению слоев, которые выделяются по разной волновой картине, отчетливо проявлен грабен. Профилем 20 пересечен только его западный борт (рис. 15). На всех трех радарограммах главный разрыв, падающий на восток и восток-юго-восток, выражен зоной пониженной интенсивности наклонных осей синфазности, отчетливо различимой в среднем георадарном комплексе. По характеру изображения предполагается, что отложения испытывали значительную пластическую

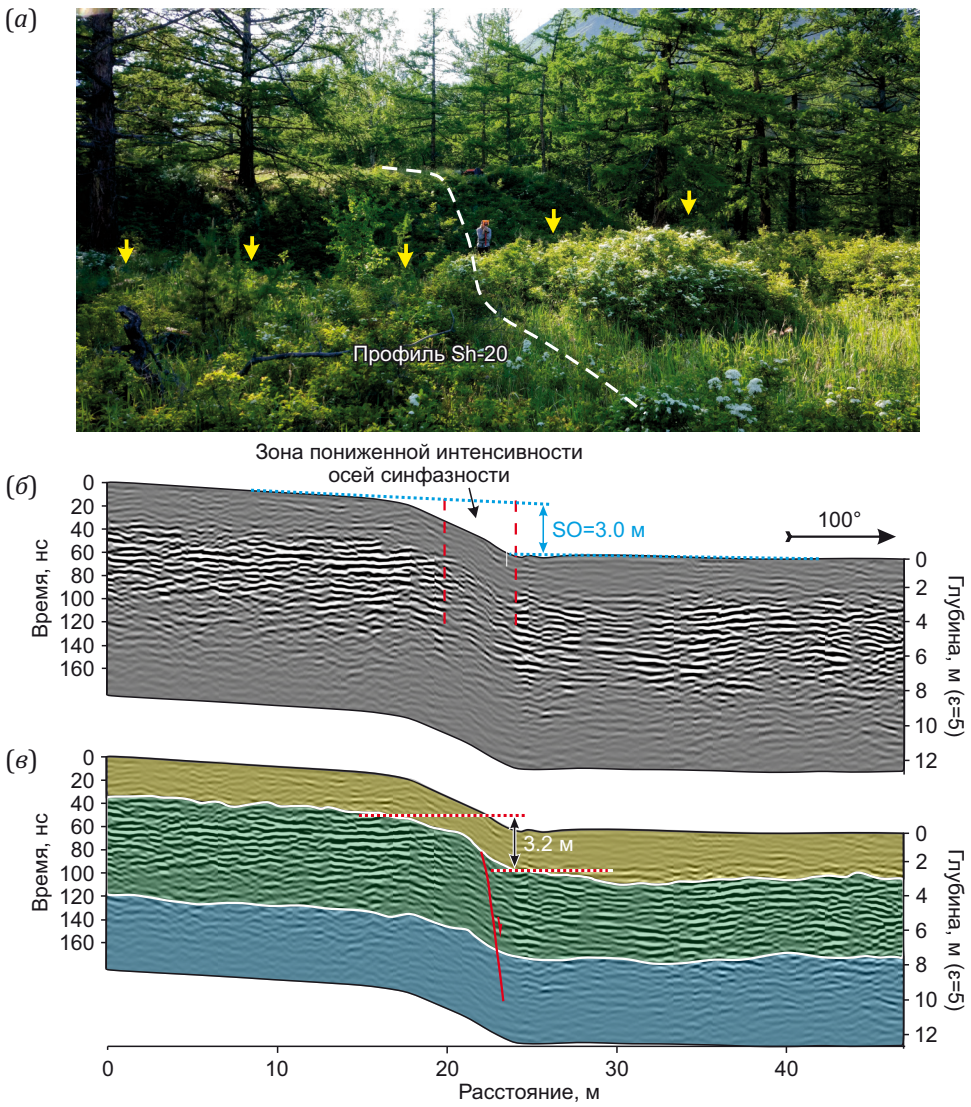


Рис. 15. Георадиолокационный профиль Sh-20 вкрест простирания сейсмогенного уступа (*а*) и радарограмма, полученная с помощью георадара ОКО-3 с антенной АБ-150/400 с используемой центральной частотой 150 МГц (*б*), в том числе с наложенной интерпретацией (*в*).
Красной линией и желтыми стрелками на фото показаны разрывы, белыми линиями – границы георадарных комплексов. Числа указывают амплитуду смещения по разрывам.

Fig. 15. GPR profile Sh-20 across the strike of the seismogenic scarp (*a*) and a radargram obtained using ОКО-3 GPR with АБ-150/400 antenna which works at a central frequency of 150 MHz (*б*) including superimposed interpretation (*в*).
The red line and yellow arrows show the ruptures, the white lines show the boundaries of the GPR complexes. The numbers indicate the displacement amplitude along the ruptures.

деформацию, что обусловлено слабой литификацией отложений современного конуса. Амплитуда смещения георадарных комплексов колеблется от 2.3 до 3.3 м и совпадает с измерениями по тахеометру и по ЦММ на рядом расположенных гипсометрических профилях (см. рис. 13). Определенно, стиль деформаций внутри отложений молодого конуса отличается от их проявления на северном окончании мыса отсутствием резких и четких границ. Тем не менее разрывы интерпретируются по тонким нитевидным нарушениям осей синфазности пониженной интенсивности.

Профиль Sh-33 пересекает разрыв № 17 на южном окончании участка и отражает наиболее сложный для интерпретации разрез (рис. 16). По данным ЦММ здесь фиксируются два уступа и две ступени (рис. 16, б). Георадарными работами прослежен нижний уступ с рвом в основании, так как верхний сильно залесен. Высота уступа в месте исследования по тахеометрическим измерениям составляет 11 м, смещение исходных поверхностей между поднятым и опущенным крылом – 4.6 м без учета глубины рва (рис. 16, в).

При интерпретации радарограммы (рис. 16, г, д) выделены некоторые границы георадарных комплексов, ассоциированные со стратиграфическими границами слоев горных пород. Синяя линия отражает палеорельеф, в строении которого в интервале 50–80 м

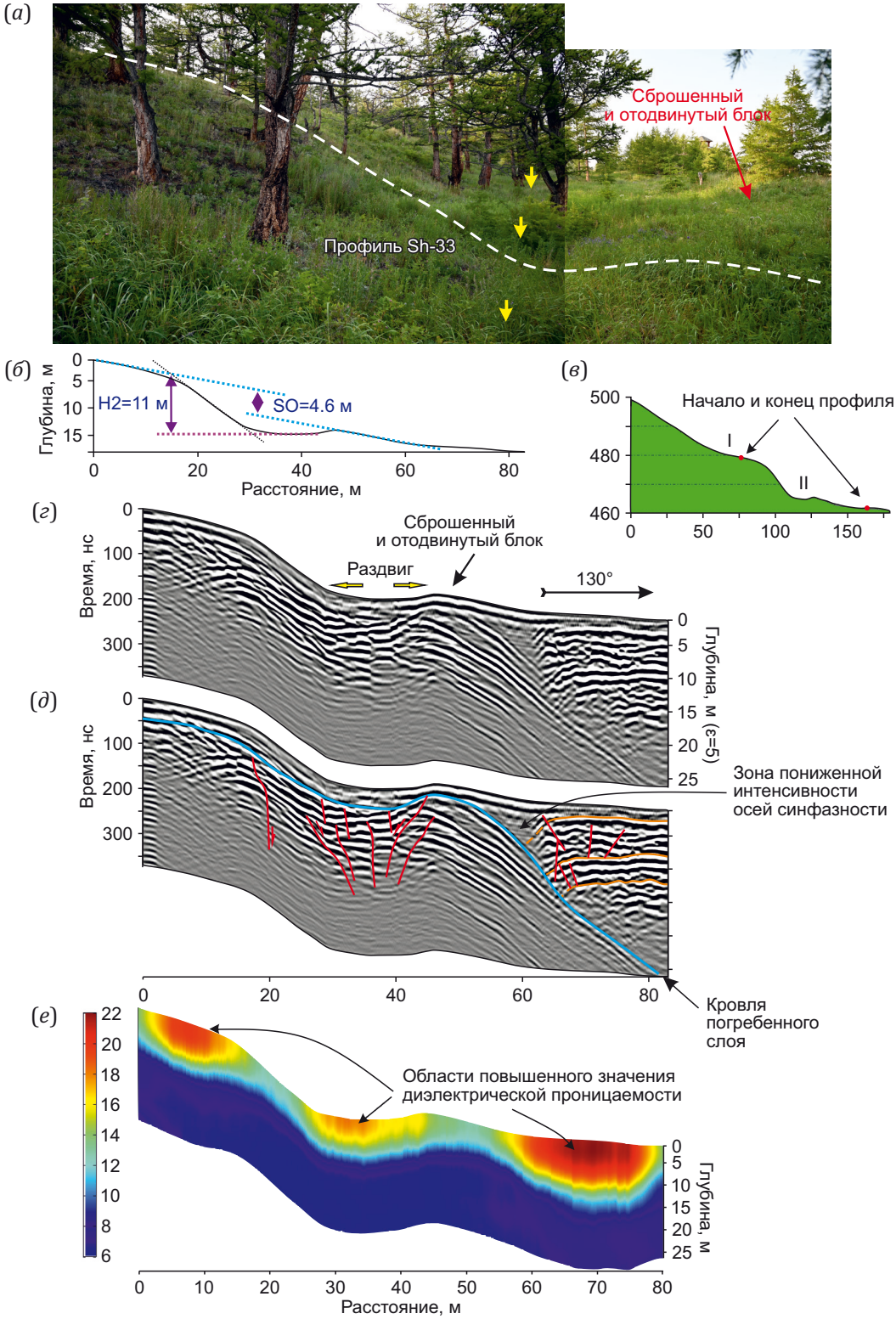


Рис. 16. Георадиолокационный профиль Sh-33 вкрест простирания сейсмогенного уступа.
(*а*) – профиль на фото; (*б–в*) – гипсометрические профили по измерениям с ЦММ (*б*) и тахеометром (*в*); (*г–д*) – радарограмма, полученная с помощью георадара ОКО-2 с антенной АБДЛ «Тритон», в том числе с наложенной интерпретацией; (*е*) – распределение диэлектрической проницаемости по глубине. Красными линиями и желтыми стрелками на фото показаны разрывы, оранжевыми линиями – границы георадарных комплексов в современном конусе выноса р. Шартлай.

Fig. 16. GPR profile Sh-33 across the strike of the seismogenic scarp.
(*а*) – GPR profile in the picture; (*б–в*) – DSM-based (*б*) and tacheometric (*в*) measurements of hypsometric profiles; (*г–д*) – a radargram obtained using OKO-2 GPR with the ABDL "Triton" including superimposed interpretation; (*е*) – distribution of dielectric capacitivity over depth. The red line and yellow arrows show the ruptures, the orange lines show the boundaries of the GPR complexes in the modern alluvial fan of the Shartlay River.

наблюдается склон, перекрытый более поздними отложениями конуса выноса и делювием. Для объяснения ситуации авторы предполагают три сейсмических события в месте исследования. Сначала произошло образование первого сейсмогенного уступа (рис. 17, б, за рамками георадарного профиля), который в настоящее время сильно нивелирован. Затем при очередном землетрясении блок длиной ~180 м и шириной от 20 до 53 м был сброшен и отодвинут на восток-юго-восток (см. рис. 6, рис. 16, а). В основании уступа образовалась грабенообразная структура (см. рис. 16, д). Последнее сейсмическое событие привело к образованию трещин в заполненном грабене, а также в прилегающих к погребенному склону отложениях. В его верхней части, судя по загибу осей синфазности, наблюдается падение слоев навстречу фасету и зона пониженной интенсивности сигналов (см. рис. 16, д). Это место относится к продолжению разрыва № 26, но на поверхности в данной точке пересечения с профилем Sh-33 он не картируется (см. рис. 6, врезка).

Анализ поля обратного рассеяния, реализуемый в программе ГЕОРАДАР-Эксперт (см. рис. 16, е), показывает аномалии значений диэлектрической проницаемости, которые свидетельствуют о повышенной влажности и трещиноватости пород в висячих блоках предполагаемых нарушений [Kalashnik, D'iakov, 2015]. Наибольшая влажность характерна для наиболее низко расположенной части профиля в молодом конусе. Аномалия в интервале 0–15 м свидетельствует о раздробленности подошвы первого уступа и скоплении там влаги, несмотря на самое высокое положение этой части разреза.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Кинематика разрывов

Проведенные исследования показывают, что формирование зоны сейсмогенных разрывов на мысе Шартлай происходило в условиях доминирующего растяжения с образованием сбросовых уступов и грабенов. Взброс, обнаруженный ранее в береговой зачистке [Chipizubov et al., 2003], является вторичным эффектом по отношению к главному сбросу и не указывает на обстановку регионального сжатия. Подобные образования связаны с волочением слабосцементированных отложений вдоль разломной плоскости и их скучиванием в нижних частях разрезов. Ситуации характерны для многих классических разрезов вкрест простирания известных сбросовых разломов в Провинции бассейнов и хребтов на западе США [McCalpin, 2009, Fig. 3.48].

4.2. Оценка магнитуды землетрясений

Изучение вертикальных сбросовых смещений позволило выявить максимальную индивидуальную величину подвижки по главному разрыву только внутри современного конуса выноса. Последнее разрывообразующее землетрясение в районе исследований сопровождалось смещением земной поверхности с амплитудой не менее 3.7 м. Одноактность события подтверждается интерпретацией георадиолокационных профилей 19, 20 и 21. При такой максимальной подвижке магнитуда землетрясения M_w по формуле для сбросов [Wells, Coppersmith, 1994]

$$M_w=6.61+0.71\cdot\log MD,$$

где MD – максимальное смещение, м, M_w – моментная магнитуда, будет равна 7.01±0.34, а M_s, рассчитанная по уравнению [Lunina, 2001, 2002]

$$M_s=6.73+0.79\cdot\log MD,$$

где M_s – магнитуда по поверхностным волнам, будет равна 7.18±0.44.

Не исключено, что подвижка могла быть больше за пределами участка исследований, как предполагалось в работе [Lunina et al., 2020] при условии, что разрывы Среднекедровой и Шартлайской сейсмодислокаций одновозрастные. Однако неясно, является ли вертикальное смещение 8.36 м, измеренное в разрезе (см. рис. 10), одноактным. Напротив, радарограммы, полученные для краевых частей мыса, предполагают следы более чем одного события (см. рис. 7, 16). Магнитуды второго землетрясения при параметре MD=3.5 м, определенном по разнице общего и последнего смещения на радарограмме профиля Sh-1, будут M_w=7.0±0.34 и M_s=7.16±0.44.

4.3. Модель роста разрывов на поверхности

Особенности распределения смещений по индивидуальным нарушениям позволяют реконструировать направление роста дислокаций во время реализации напряжений. Известно, что зарождение сбросов начинается в точке, в которой к концу деформации будет накоплено максимальное смещение (рис. 17, а). Это подтверждается профилями смещений по результатам аналогового моделирования [Rotevatn et al., 2019, Fig. 4; Nicol et al., 2020]. Для сдвиговых землетрясений главный толчок часто располагается в точке с относительно малой величиной подвижки [Kim, Sanderson, 2008]. Вероятно, такие различия связаны с разным типом смещений в очаге. В целом же, разрыв может распространяться как в обе стороны от точки начала деформации, так и преимущественно в одном направлении.

Исходя из указанных предпосылок, для каждого разрыва в пределах мыса Шартлай над максимальным смещением были установлены точки зарождения и направления распространения дислокации (рис. 17, б). Более длинная стрелка указывает на доминирующую сторону роста разрыва. Полученная картина свидетельствует о том, что главные разрывы с амплитудой смещения более 2 м, за исключением № 20, в момент землетрясений распространялись на север. Пять второстепенных разрывов удлинялись также преимущественно на север, шесть других – на юг и два – примерно равномерно в обе стороны. Характерно то, что минимумы суммарного смещения приходятся на окончания разрывов, места их взаимодействия или изгиб единого нарушения, как у разрыва № 2. В последнем

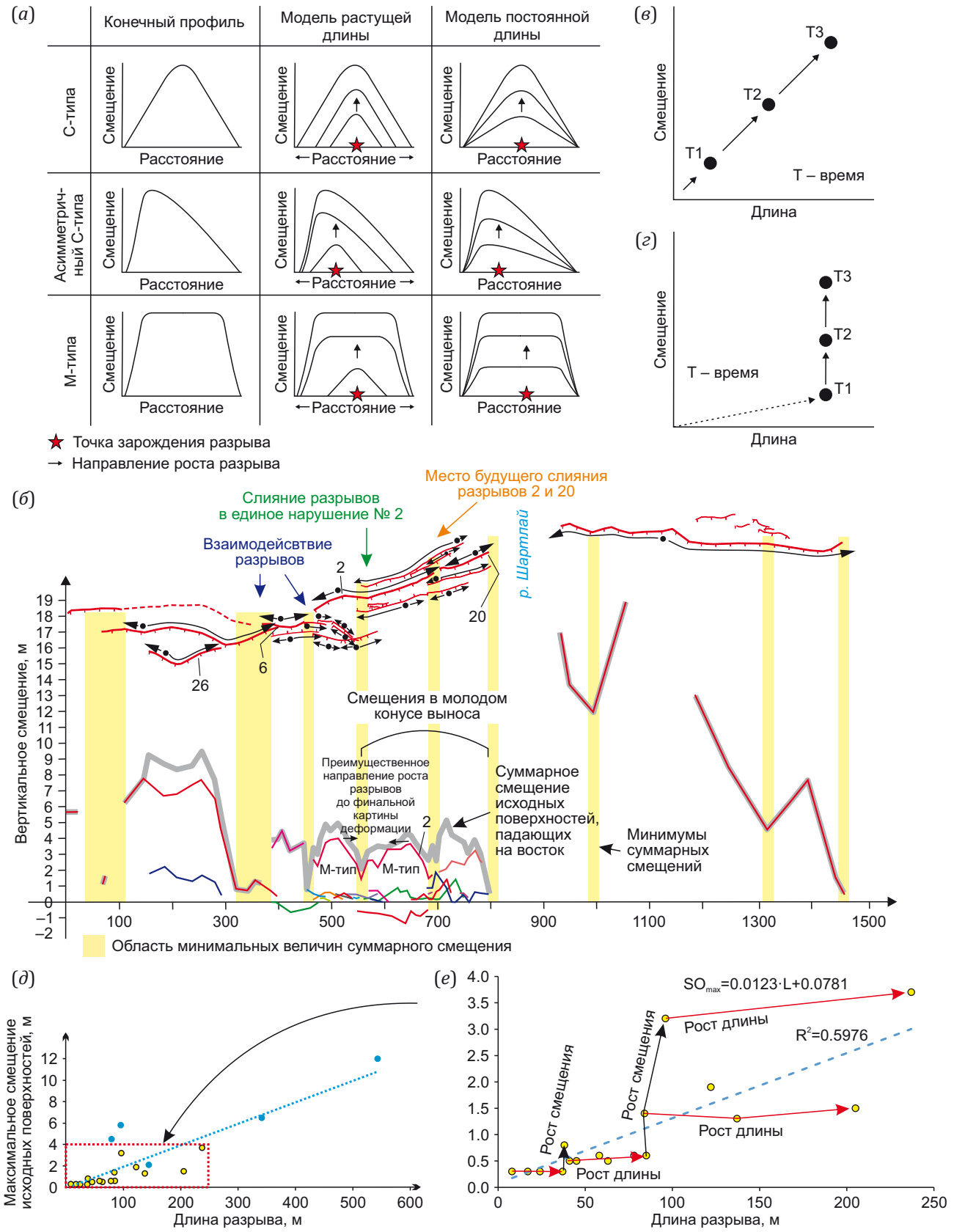


Рис. 17. Реконструкция роста разрывов в сейсмогенной зоне мыса Шартлай.
(*а*) – идеализированные профили смещений для сбросов, построенные для разных моделей развития индивидуальных разрывов по [Nicol et al., 2020]; (*б*) – модель роста разрывов в сейсмогенной зоне на мысе Шартлай, стрелки указывают на направление распространения разрыва от точки его зарождения – максимального смещения; (*в–г*) – идеализированное соотношение между длиной индивидуального разрыва и смещением в разное время T1, T2, T3 для моделей растущей (*в*) и постоянной (*г*) длины [Rotevatn et al., 2019]; (*д–е*) – соотношение между максимальным смещением и длиной разрывов на мысе

Шартлай (*д*) и увеличенный фрагмент графика, иллюстрирующий особенности возрастания длины и смещения в изученной сейсмогенной зоне (*е*).

Рис. 17. Reconstruction of rupture growth in the seismogenic zone at Cape Shartlay.
(*а*) – idealized normal faultdisplacement profiles for different single-fault models according to [Nicol et al., 2020]; (*б*) – growth model of ruptures in the seismogenic zone at Cape Shartlay, arrows indicate a direction of rupture propagation from the initiation point – maximal displacement; (*в–г*) – idealized displacement – length (*D–L*) ratios in different time T1, T2, T3 for propagating (*в*) and constant-length (*г*) fault models according to [Rotevatn et al., 2019]; (*д–е*) – maximal displacement – length (D_{max}–*L*) ratios at Cape Shartlay (*д*) and the increased plot fragment showing the length and displacement growth characteristics in the investigated seismogenic zone (*е*).

случае это может указывать на образование его финальной длины за счет слияния двух нарушений. Об этом свидетельствует график, который состоит из двух почти равноправных по амплитуде профилей М-типа (рис. 17). Подобные профили предполагают крайние формы взаимодействия разломов и отражают передачу смещения на близлежащие нарушения [Nicol et al., 2020]. Ретроспективно, исходя из формы профиля смещений разрыва № 2, можно предположить, что до слияния два нарушения удлинялись преимущественно навстречу друг другу от вершин с максимальным значением, но в целом рост более крупного нарушения шел в северном направлении. Это подтверждается также располагающимся рядом и близким по простиранию разрывом № 20, которому не хватило энергии, чтобы соединиться с нарушением № 2. Все эти наблюдения отражают волновой характер деформаций [Bornyakov et al., 2016], а минимумы смещений между равновеликими максимумами могут означать места слияния двух разрывов в один.

Существует две основные концептуальные модели развития сбросов [Rotevatn et al., 2019; Nicol et al., 2020]. Первая, «модель растущей длины», подразумевает, что длина разрыва синхронно увеличивается с увеличением смещения (рис. 17, в). Вторая, «модель постоянной длины», отражает тот факт, что на протяжении практически всей «жизни» разлома смещение накапливается без существенного роста его протяженности (рис. 17, г). Модель постоянной длины построена на основной предпосылке, что разрывы относительно быстро распространяются, после чего дальнейшее удлинение обычно замедляется из-за механического взаимодействия друг с другом. Современные исследования показывают, что большинство сбросов характеризуются двумя стадиями деформации. Сначала происходит быстрое распространение разрыва (1-я стадия, 20–30 % времени развития нарушения), за которым следует стадия накопления смещения при постоянной длине (2-я стадия, 70–80 % времени развития нарушения) [Rotevatn et al., 2019, Fig. 6]. Две стадии обычно разделены относительно резким перегибом кривой $MD=f(L)$, где L – длина. Однако соотношение $MD=f(L)$ может резко измениться по мере удлинения разлома за счет слияния соседних сегментов.

График зависимости $MD=f(L)$ для сейсмогенных разрывов (рис. 17, д, е) и представленная модель (рис. 17, б) показывают, что процесс разрывообразования на мысе Шартлай соответствует обеим описанным моделям. С одной стороны, наблюдается довольно высокая корреляция длины и смещения (см. рис. 12, а; рис. 17, д), что согласуется с «моделью растущей длины». С другой стороны, если рассматривать $MD=f(L)$ только для разрывов одного события в молодом конусе (рис. 17, е), то существуют заметные отклонения от этой корреляции, которые указывают на чередование быстрого роста протяженности разрыва (1) и увеличение смещения без его удлинения (2). Такая картина свидетельствует в пользу «модель постоянной длины». Несоответствие некоторых значений линейной зависимости $MD=f(L)$ показывает, что скачок в длине разрывов происходит преимущественно за счет слияния двух дислокаций, а не за счет постепенного увеличения подвижки.

Следует отметить, что в строении сейсмогенной зоны на мысе Шартлай короткие разрывы часто сосредоточены в местах их взаимодействия. Процесс удлинения в таком случае замедляется или даже останавливается, но это не препятствует накоплению амплитуды [Rotevatn et al., 2019], что и наблюдается у разрывов № 6, 20 и 26. Разные амплитуды у разрывов одной длины свидетельствуют о прекращении активности некоторых нарушений, что демонстрировалось в эксперименте [Bornyakov et al., 2016].

Преимущественное распространение большинства сейсмогенных разрывов на север может быть связано с тем, что с южной стороны эти деформации блокируются Кочериковским разломом северо-восточного простирания (см. рис. 1). Несмотря на значительное смещение слоев, обнажающихся в абразионном береге оз. Байкал (см. рис. 10), под водой происходит резкое уменьшение амплитуды сброса (см. рис. 11), хотя не исключено, что могло произойти значительное сглаживание уступа вследствие волноприбойной деятельности.

В целом, согласно принципиальной схеме формирования внутренней структуры разломной зоны [Seminsky, 2014, рис. 2] развитие системы сейсмогенных разрывов на мысе Шартлай соответствует поздней дизъюнктивной стадии. Это означает, что процесс разрывообразования на данном сегменте Северобайкальского разлома еще не завершен, и отсутствие в инструментальное время сильных землетрясений предполагает накопление напряжений в его южной части.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили детально охарактеризовать шартлайский сегмент Северобайкальского разлома, в котором последние сейсмогенные деформации могли возникнуть на рубеже нашей эры

(2145–2463 лет назад по [Chipizubov et al., 2010; Lunina et al., 2020]). В результате анализа полученных материалов были сделаны следующие основные выводы:

1. Сейсмогенные разрывы мыса Шартлай и окрестностей сформировались в условиях преобладающего растяжения при не менее двух землетрясениях с магнитудой M_w≥7.0, M_s≥7.2. Признаков сжатия на изученных георадарных разрезах не обнаружено. Выявленный ранее взброс является локальной структурой, возникшей вследствие дефицита пространства в висячем крыле сброса при скольжении рыхлых отложений.

2. Распространение разрывов во время сейсмических событий происходило преимущественно в северном направлении. В результате сформировалась разветвленная сеть, в которой главный сегментированный разрыв имеет вертикальную амплитуду подвижки более 2 м. Его вклад в общее смещение земной поверхности составлял от 39 до 93 % в зависимости от количества дислокаций на поперечном профиле. Разрывы имеют высокую проницаемость.

3. Минимумы на профилях вертикальных смещений вдоль длины разрывов совпадают с их окончаниями, местами взаимодействия или изгибами. Это означает, что пониженные значения между равновеликими максимумами являются местами слияния двух дислокаций.

4. В процессе развития сейсмогенной зоны удлинение разрывов происходило как за счет увеличения подвижки, так и за счет объединения дислокаций. При этом весьма вероятно, что рост длины происходил практически мгновенно, затем по одним разрывам смещение останавливалось, а по другим продолжалось с замедлением распространения разрыва по простиранию.

5. Активный тектонический процесс в сейсмогенной зоне на мысе Шартлай еще не завершен, и в будущем здесь возможны разрывообразующие события, которые приведут к формированию единого сместителя.

Полученные результаты показывают возможность путем изучения профилей смещений реконструировать развитие зон разломов и таким образом точнее локализовать потенциальные места возникновения будущих землетрясений.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективу ФГБУ «Заповедное Прибайкалье», предоставившего возможность выполнения научно-исследовательских работ на территории Байкало-Ленского заповедника в рамках договора № 43 от 30.05.2019 г.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

О.В. Лунина – постановка проблемы и организация работ, геолого-структурная и фотодокументация, видеосъемка, анализ совокупности всех полученных материалов и подготовка рукописи; И.А. Денисенко – получение и обработка георадарных данных, совместная интерпретация и построение геологического разреза, Е.Б. Игнатенко – морфоструктурный анализ и построение профилей смещений; А.А. Гладков – аэрофотосъемка и фотограмметрическая обработка данных.

O.V. Lunina – problem statement and work organization, geological-structural and photographic documentation, video, analysis of the entire dataset obtained, and manuscript preparation; I.A. Denisenko – obtaining and processing georadar data, sequential interpretation and subsurface geologic imaging; E.B. Ignatenko – morphostructural analysis and displacement profiling; A.A. Gladkov – aerial photography and photogrammetric data processing.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

ActiveTectonics, 2024. East-Siberian Geoportal (in Russian) [Восточно-Сибирский геопортал «ActiveTectonics»]. Available from: http://activetectonics.ru (Last Accessed March 1, 2024).

Agisoft Metashape, 2021. Standard Edition, Version 1.7. User Guide (in Russian) [Agisoft Metashape. Стандартное издание, версия 1.7: Руководство пользователя]. Available from: https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_7_ru.pdf (Last Accessed March 2, 2024).

Bornyakov S.A., Panteleev I.A., Tarasova A.A., 2016. Discrete Deformation Wave Dynamics in Shear Zones: Physical Modelling Results. Geodynamics & Tectonophysics 7 (2), 289–302 (in Russian) [Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 2. С. 289–302]. https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0207.

Chipizubov A.V., Melnikov A.I., Stolpovsky A.V., Baskakov V.S., 2003. Paleoseismic Dislocations and Paleoearthquakes within the Baikal-Lena Reserve (North Baikal Fault Zone). Transactions of the State Baikal-Lena Nature Reserve. Iss. 3. Irkutsk, p. 6–18 (in Russian) [Чипизубов А.В., Мельников А.И., Столповский А.В., Баскаков В.С. Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения в пределах Байкало-Ленского заповедника (зона Северобайкальского разлома) // Труды Государственного природного заповедника «Байкало-Ленский». Иркутск: 2003. Вып. 3. С. 6–18].

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Imaev V.S., 2015. Paleoseismic Dislocations and Paleo-Earthquakes of the Primorsky Fault Zone (Lake Baikal). Problems of Engineering Seismology 42 (3), 5–19 (in Russian) [Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Имаев В.С. Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения зоны Приморского разлома (оз. Байкал) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 3. С. 5–19].

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Imaev V.S., 2019. Seismotectonic Studies of the Sarma Paleoseismic Dislocation

(Western Coast of Lake Baikal). Seismic Instruments 55, 559–571. https://doi.org/10.3103/S0747923919050025.

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Semenov R.M., Imaev V.S., 2010. Paleoseismicity of the Pribaikalie. Seismic Instruments 46, 136–151. https://doi.org/10.3103/S0747923910020040.

Denisenko I.A., Lunina O.V., 2023. Seismogenic Deformations Confined to the Cheremshano-Bolsodeysky Segment of the North Baikal Fault. Questions of Engineering Seismology 50 (3), 30–43 (in Russian) [Денисенко И.А., Лунина О.В. Сейсмогенные деформации Черемшано-Болсодейского участка Северобайкальского разлома // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 3. С. 30–43]. https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-3.

Kalashnik A.I., D'iakov A.Yu., 2015. Georadar Research of Geological-Structural Configuration of Open Pit Working Bench. Minerals and Mining Engineering 6, 73–78 (in Russian) [Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78].

Kim Y.-S., Sanderson D.J., 2008. Earthquake and Fault Propagation, Displacement and Damage Zones. In: S.J. Landowe, G.M. Hammler (Eds), Structural Geology: New Research. Nova Science Publishers, Hauppauge, USA, p. 99–117.

Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. (Eds), 1982. New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times through 1977. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Report SE-31. NOAA, Boulder, USA, 608 p.

Lunina O.V., 2001. Lithosphere Stress Field as a Control over Seismogenic Fault Parameters and Earthquake Magnitudes. Russian Geology and Geophysics 42 (9), 1389–1398.

Lunina O.V., 2002. Influence of the Stressed State of the Lithosphere on the Ratio of Parameters and Inner Structure of Seismoactive Faults. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 223 p. (in Russian) [Лунина О.В. Влияние напряженного состояния литосферы на соотношение параметров и внутреннюю структуру сейсмоактивных разломов: Дис. … канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2002. 223 с.].

Lunina O.V., Denisenko I.A., 2020. Single-Event Throws along the Delta Fault (Baikal Rift) Reconstructed from Ground Penetrating Radar, Geological and Geomorphological Data. Journal of Structural Geology 141, 104209. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104209.

Lunina O.V., Denisenko I.A., Gladkov A.A., Braga C., 2023. Enigmatic Surface Ruptures at Cape Rytyi and Surroundings, Baikal Rift, Siberia: Seismic Hazard Implication. Quaternary 6 (1), 22. https://doi.org/10.3390/quat6010022.

Lunina O.V., Gladkov A.A., 2023. Unmanned Aerial Photography Futures to Explore Surface Deformations and Their Visualization on the Geoportal "Activetectonics". Geoinformatics 1, 18–30 (in Russian) [Лунина О.В., Гладков А.А. Перспективы беспилотной аэрофотосъемки для изучения деформаций земной поверхности и их визуализация на геопортале «ActiveTectonics» // Геоинформатика. 2023. № 1. С. 18–30]. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-18-30.

Lunina O.V., Gladkov A.A., Bochalgin A.V., 2024. Low-Amplitude Brittle Deformations Revealed by UAV Surveys in Alluvial Fans along the Northwest Coast of Lake Baikal: Neotectonic Significance and Geological Hazards. Remote Sensing of Environment 300, 113897. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113897.

Lunina O.V., Li D., Lyu Y., Wang Y., Li M., Gao Yu, Gladkov A.S., Denisenko I.A. et al., 2020. Using in Situ-Produced ^{10}Be to Constrain the Age of the Latest Surface-Rupturing Earthquake along the Middle Kedrovaya Fault (Baikal Rift). Quaternary Geochronology 55, 101036. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2019.101036.

McCalpin J.P. (Ed.), 2009. Paleoseismology. 2nd Edition. Academic Press, USA, 647 p.

Nicol A., Walsh J., Childs C., Manzocchi T., 2020. The Growth of Faults. In.: D. Tanner, C. Brandes (Eds), Understanding Faults. Detecting, Dating, and Modeling. Elsevier, p. 221–255. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815985-9.00006-0.

Nur A., Ron H., Scotty O., 1989. Mechanics of Distributed Fault and Block Rotation. In.: C. Kissel, C. Laj (Eds), Paleomagnetic Rotations and Continental Deformation. Springer, Dordrecht, p. 209–228. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0869-7_14.

Rotevatn A., Jackson C.A.-L., Tvedt A.B.M., Bell R.E., Blækkan I., 2019. How Do Normal Faults Grow? Journal of Structural Geology 125, 174–184. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.08.005.

Seminsky K.Zh., 2014. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 1: Basic Theoretical Concepts and Principles. Geodynamics & Tectonophysics 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136.

Smekalin O.P., Eskin A.Yu., 2021. Paleoseismic Investigations in the Selenga River Delta (Lake Baikal). Seismic Instruments 57, 535–551. https://doi.org/10.3103/S0747923921050078.

Solonenko V.P. (Ed.), 1968. Seismotectonics and Seismicity of the Rift System of Pribaikalie. Nauka, Moscow, 220 p. (in Russian) [Сейсмотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. М.: Наука, 1968. 220 с.].

Vladov V.L., Sudakova M.S., 2017. GPR. From Physical Fundamentals to Promising Areas. Textbook. GEOS, Moscow, 240 p. (in Russian) [Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.].

Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America 84 (4), 974–1002. https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Основные параметры сейсмогенных разрывов
Table 1.1. Main parameters of earthquake ruptures

№ разрыва	Длина, м	Азимут простирания, град.	Максимальная высота уступа, м	Максимальное смещение исходных поверхностей, м	Уклон уступа, град.
1	85	19	0.62	0.62	–10
2	237	6	3.90	3.70	30
3	251	5	–	–	–
4	312	10	0.30	0.30	13
5	38	29	1.10	0.81	17
6	79	21	6.50	4.50	29
7	38	29	–	–	–
8	223	15	–	–	–
9	228	11	–	–	–
10	71	43	–	–	–
11	58	35	0.78	0.64	25
12	37	19	0.40	0.25	10
13	63	7	0.60	0.45	16
14	8	35	0.30	0.30	35
15	137	10	1.30	1.30	–25
16	41	58	0.52	0.47	16
17	341	21	11.40	6.50; 7.90	25
18	79	8	0.60	0.60	22
19	543	206	19.80; 24	12	34
20	96	4	3.40	3.20	34
21	205	359	1.50	1.50	13
22	84	355	1.40	1.40	21
23	50	201	0.90	0.90	11
24	45	61	0.52	0.52	18
25	24	28	0.29	0.29	18
26	144	200	2.90	2.10	16
27	95	23	5.80	5.80	33
28	122	6	2.10	1.90	11
29	74	15	–	–	–
30	24	15	–	–	–
31	35	47	–	–	–
32	17	22	–	–	–
33	61	38	–	–	–

Примечание. Прочерк указывает на невозможность измерения параметра; в случае двух значений первое означает величину снизу до перегиба уступа, второе – суммарное.

Note. A dash indicates the impossibility of parameter measurement; in case of two values, the first is the distance from bottom to the scarp bend, the second is the total.