

На правах рукописи



Денисенко Иван Александрович

**СТРОЕНИЕ ЗОН СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА И ИХ
ПАРАМЕТРЫ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

25.00.03 – геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Научный руководитель:

Лунина Оксана Викторовна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН.

Официальные оппоненты:

Новиков Игорь Станиславович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск;

Старовойтов Анатолий Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры сейсмологии и геоакустики геологического факультета МГУ, г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточное отделение Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский).

Защита состоится «11 ноября» 2021 года в 09:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull192/2648.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «10» сентября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.022.03 кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

2. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А., Денисенко И.А. Среднекедровая палеосейсмодислокация в Байкальском хребте: структура и оценка смещений по данным георадиолокации // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9 (2). С. 531-555. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35369250>

3. Lunina O., Gladkov A., Denisenko I., Gladkov A. Sub-bottom surveying in seismogenic Proval Bay (Lake Baikal) with ground – penetrating radar: application to study of Delta fault. In: Proceedings of the 9 th International INQUA Workshop on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology, 25-27 June 2018. Possidi, Greece. Eds. O. Koukousipura and A. Chatzipetros. 2018. 150–162

4. Лунина О.В., Гладков А.С., Денисенко И.А., Гладков А.А., Серебряков Е.В., Проявления опасных природных процессов в зонах активных разломов Байкальского региона по данным георадиолокации. В кн.: Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика (к 100-летию ИГУ): Тез. докл. XII Рос.-монг. междунар. конф., РАН, Сиб. отд-ние, Иркут. науч. центр, Ин-т земной коры, Ин-т солн.-зем. физики. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. – С. 66.

5. Денисенко И.А., Серебряков Е.В., Гладков А.А. Оценка смещений при Цаганском землетрясении 1862 г. на св окраине с. Дубинино (по структурно-геологическим и георадиолокационным данным) // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 8 – 14 апреля 2019 г.). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2019. – С. 63-65. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39203477>

6. Денисенко И.А., Лунина О.В. Применение метода георадиолокации при изучении активных разломов Байкальского региона // Сборник тезисов научно-практической конференции «Георадар-2019» (г. Москва, 13-15 марта 2019г.) Евроазиатская научно-промышленная палата, 2019. – С. 59 – 64.

7. Лунина О.В., Гладков А.А., Денисенко И.А. Сейсмогенные разрывы западного побережья озера Байкал: проблемы и перспективы изучения // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Том 2. Материалы ЛП Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2020. – С. 51–56.

8. Лунина О.В., Гладков А.А., Денисенко И.А. Сейсмоструктура прибрежных территорий Северобайкальской впадины: проблемы и новые пути их решения // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 3. / отв. ред. И.В. Бычков, А.Л. Казаков. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2020. – С. 137–142.

9. Lunina O., Denisenko I. Single-event throw distribution along the Delta fault (Baikal rift) from geomorphological and ground-penetrating radar investigations // EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-92, 2020.

10. Денисенко И.А., Лунина О.В., Серебряков Е.А. Особенности проявления сейсмогенных разрывов в четвертичных отложениях Байкальского региона по данным георадиолокации // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту. Материалы совещания. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2020. – Вып. 18. С. 98 – 100.

11. Денисенко И.А., Лунина О.В. Сейсмогенные смещения в зоне Зундукского разлома по данным георадиолокации (Байкальский регион). Материалы XXII всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции. Воронеж: Издательство дом ВГУ, 2020. – С. 120-124.

12. Денисенко И.А., Лунина О.В. Изучение параметров структуры палеосейсмодислокации Сарма методом георадиолокации (северо-западное побережье озера Байкал). «Инженерная сейсмостроительная и сейсмология - 2020» и «Георадар - 2020». Теперь вместе»; под ред. М.С. Судаковой, М.Р. Садуртдинова. – М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2020. – 191 с.

Подписано к печати 06.09.2021 г. Формат 60×84 1/16.
Печать Riso. Усл. печ. л. 1.5. Усл.изд. 1.25. Заказ № 185. Тираж 115.
Отпечатано в Институте земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

3. Углы падения главных разрывов на изучаемой территории изменяются от 56° до 88°, причем вариации углов наклона сместителей могут быть характерны для одной структуры вдоль ее простираения, что свидетельствует о сильно неоднородном строении осевой части разломов.

4. Для сейсмогенных разрывов Байкальского рифта на примере изученных объектов установлено, что в образование приразломного уступа существенный вклад вносит пластическая составляющая. В работе статистически показана связь пластической компоненты смещения с основными параметрами разрыва: шириной разломной зоны, полным вертикальным смещением и углом падения главного сейсмогенного разрыва.

5. По полученным параметрам величины максимальных и полных вертикальных смещений по главному сейсмогенному разрыву для исследуемых объектов был вычислен их сейсмический потенциал, определяемый максимально возможной магнитудой землетрясения от 6.8 до 7.6.

6. На основе полученных данных, на примере одной из главных сейсмогенерирующих структур Байкальского рифта – зоны Дельтового разлома – построены обобщенные объемные модели главного сейсмогенного разрыва и фрагмента его зоны длиной 12 км и 120 м соответственно, визуализирующие ступенчатое и грабенообразное строение.

Важными практическими следствиями проведенного исследования можно считать использование полученных данных для уточнения оценки сейсмической опасности территорий Иркутской области и Республики Бурятия. Используемый в работе метод георадиолокационного профилирования позволит получать новые данные о сейсмогенных разрывах при исследовании сейсмической безопасности регионов. Описанные в работе признаки выявленных разрывных нарушений по георадиолокационным данным будут полезны исследователям при изучении разломов в других регионах. В будущем автор предусматривает продолжение исследований в изучении сейсмогенных разрывов Байкальского региона, а также внедрение в палеосейсмогеологические работы новейших методов исследования.

Публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России

1. Денисенко И.А., Лунина О.В. Прогнозные модели локализации разжижения грунта при землетрясениях на Главном Саянском разломе (юг Восточной Сибири) // Геология и Геофизика. 2017. Т. 58, № 11. С.1777-1783.

2. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А., Денисенко И.А. Среднекедровая палеосейсмодислокация в Байкальском хребте: структура и оценка смещений по данным георадиолокации // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, №2. С. 531-555.

3. Денисенко И.А., Лунина О.В., Гладков А.С., Казаков А.В., Серебряков Е.В., Гладков А.А. Структура Дельтового разлома и сейсмогенные смещения на участке «Шерашево–Инкино» по данным георадиолокации (Байкальский регион) // Геология и геофизика. 2020, Т. 61, №7. С. 879-888.

4. Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Сарминского участка Приморского разлома по данным георадиолокации (Байкальский рифт) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т 11, №3. С. 548-565.

5. Lunina O., Li D., Lyu Y., Wand M., Li M., Gao Y., Gladkov A., Denisenko I., Gladkov A., Wang K., Zhang S., Perevoznikov D. Using in situ-produced ¹⁰Be to constrain the age of the latest surface-rupturing earthquake along the Middle Kedrovaya fault (Baikal rift) // Quaternary Geochronology 2020. V. 55, 101036

6. Lunina O., Denisenko I. Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data // Journal of Structural Geology. 2020. V. 141, 104209

7. Bricheva S.S., Dubrovin I.O., Lunina O.V., Denisenko I.A., Matasov V.V., Turova I.V., Entin A.L., Panin A.V., Deev E.V. Numerical simulation of ground-penetrating radar data for studying the geometry of fault zone // Near Surface Geophysics. 2021. 19, p. 261-277.

8. Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Зундукского разлома по данным георадиолокации и морфоструктурного анализа (северо-западное побережье оз. Байкал) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66. Вып. 2.

Тезисы докладов научных конференций

1. Денисенко И.А., Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А., Серебряков Е.В., Афонькин А.М. Георадиолокационное изучение разрывных структур эпицентральной зоны Цаганского землетрясения // Тезисы докладов XII Российско-монгольской международной конференции. Иркутск: ИГУ 2018. – С. 65-66.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Сейсмогенный разрыв является одним из наиболее изучаемых проявлений землетрясений на земной поверхности [Рогожин, 2012; Овсяченко и др., 2014; Никонов, 1995; McCalpin, 2009; Zielke et al., 2020; Duo and Yajing, 2020; Lin, 2012; Bello et al., 2021]. Как правило, он приурочен к длительно развивающемуся сейсмоактивному разлому и рассматривается как поверхностное проявление разрывообразования в сейсмическом очаге [Стром, Никонов, 1997], представляя собой, по сути, выход очагового дизъюнктива на дневную поверхность [Живая тектоника..., 1966]. Изучение сейсмогенных разрывов лежит в основе работ по обеспечению безопасности территорий, находящихся в сейсмически активных районах.

Байкальский рифт – одно из мест, в котором за год происходит более 3000 землетрясений различной силы. Только за последний полувековой период (по данным Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН») здесь произошло несколько мощных (интенсивность в очаге $I_0=9-10$ баллов, магнитуда $M_s=7.0-7.8$) и целый ряд сильных землетрясений (I_0 до 8 баллов, $M_s=5.5-6.8$). События последних лет также подтверждают высокий уровень сейсмической активности территории. Их периодичность и силу в течение последних сотен и тысяч лет можно узнать, изучив сейсмогенные деформации, фиксируемые в области того или иного активного разлома.

Ранее на территории Байкальского рифта и сопредельных территориях было выявлено около 70 сейсмодислокаций [Солоненко, 1962, 1963; Флоренсов и др, 1960, 1961; Хромовских, 1963, 1965]. После проведения ревизии в современном каталоге осталось лишь 52 [Смекалин и др., 2010]. Многие структуры остались малоизученными, так как находятся в труднодоступных для изучения районах. Палеосейсмогеологические исследования, используемые при изучении сейсмогенных структур, в основном включали в себя аэровизуальные, морфологические наблюдения и реге тренинг для вскрытия разрывов и отбора проб на датирование деформаций. Проследить зону разрывов на глубину и вкост простираения удавалось крайне редко из-за небольших размеров горных выработок. Это явилось причиной разногласий и неточностей в параметрах многих сейсмодислокаций Байкальского рифта. Благодаря развитию современных технологий в настоящее время появилась возможность применять альтернативные методы получения информации о внутреннем строении разрывов в приповерхностной части земной коры. Одним из них является метод георадиолокации, позволяющий в благоприятных условиях получать данные о внутреннем строении разрывных структур до глубин 16 м в зависимости от технических характеристик антенных блоков [Радиотехнический прибор..., 2009]. Он является одним из лучших геофизических методов неразрушающего контроля, благодаря которому стало возможно проводить палеосейсмологические исследования в труднодоступных для изучения районах. Его комбинирование с морфоструктурными и структурно-геологическими методами может позволить получить новые и более полные данные о сейсмическом потенциале активных разломов.

Цель работы – на основе данных георадиолокации с привлечением геоморфологических и структурно-геологических данных изучить закономерности проявления сейсмогенных разрывов в различных геологических условиях Байкальского рифта с определением их главных геометрических и кинематических параметров.

Задачи исследования:

1. Методом георадиолокации на эталонных полигонах изучить сегменты разломов, связанные с сильными землетрясениями юго-восточного и северо-западного побережий озера Байкал, и установить признаки разрывов на радарограммах.

2. Определить основные параметры (мощность зон отдельных разломных сместителей, их азимуты и углы падения, амплитуды и типы вертикальных смещений) и особенности их распределения вдоль активизированных разломных сегментов.

3. Провести сравнительный анализ георадиолокационных и других сопутствующих данных для установления общих и частных закономерностей строения зон сейсмогенных разрывов в рыхлых и слабосцементированных отложениях различного типа на глубинах до 16 м.

Фактический материал и методы исследования. В основу представляемой диссертационной работы положены морфоструктурные, георадиолокационные и геолого-структурные данные,

собранные в составе структурно-геологического отряда ИЗК СО РАН с 2014 по 2020 гг. на территории Байкальского рифта в пределах Приморского, Зундукского, Северобайкальского, Дельтового разломов. В анализе участвовали данные георадиолокационных исследований (более 150 профилей), буровых, тренчинговых работ, а также данные массовых замеров элементов залегания трещин горных пород. В работе использовались материалы предыдущих исследователей по горным выработкам [Макаров, 1997; Чипизубов и др., 2015], а также фотоматериалы Луниной О.В. и Денисенко И.А.

Защищаемые положения:

1. Для зон сейсмогенных разрывов в Байкальском рифте вблизи поверхности характерно ступенчатое или грабенообразное строение, образованное нарушениями, которые на радарограммах проявляются одним или несколькими признаками: наклонной осью синфазности (для разрывов с углами падения от 35 до 70°); разрывом осей синфазности линиями с амплитудами сигналов, близкими к нулю; хаотичными отражениями в области разрыва, обусловленными дроблением пород; границей, разделяющей блоки с резко различной волновой картиной.

2. По данным георадиолокации на глубинах до 16 м изученные сейсмогенные разрывы Байкальского рифта имеют амплитуды вертикального смещения в ближней зоне от 1.5 до 8.3 м, в дальней зоне – 3.8–9.3 м, углы падения сместителей – от 56 до 88°. Их формирование ассоциируется с землетрясениями магнитудой 6.8–7.6, произошедшими в зонах Приморского, Зундукского, Дельтового и Северобайкальского разломов.

3. В условиях рифтогенного растяжения в образование сбросового уступа в рыхлых и слабосцементированных отложениях Байкальского рифта значительный вклад (от 13 до 78 %) вносит пластическая составляющая: чем она больше, тем больше ширина зоны разрыва и полная амплитуда вертикального смещения.

Научная новизна. В настоящей диссертационной работе впервые на основе метода георадиолокации с привлечением морфоструктурного анализа уступов и геологических данных параметризованы сейсмогенные разрывы Байкальского рифта. Получены закономерности проявления сейсмогенных разрывов в приповерхностной части земной коры до глубин 16 м. Определены и обобщены признаки проявления разрывных нарушений на радарограммах в различных по составу четвертичных отложениях. Изучен вклад пластической составляющей в полную величину вертикальной подвижки по разлому, произошедшей за одно событие.

Теоретическая и практическая значимость заключается в возможности использования полученных данных для уточнения оценки сейсмической опасности Байкальского региона. В работе показано, что метод георадиолокации в комплексе с геологическими и морфоструктурными данными позволяет получать детальный и достоверный материал о сейсмогенных разрывах, и, следовательно, может быть рекомендован для включения в перечень работ по детальному сейсмическому районированию, что будет положительно сказываться на экономических и экологических показателях проведения работ. Описанные в работе признаки выявления разрывных нарушений по георадиолокационным данным будут полезны исследователям при изучении разломов в других регионах России и мира.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследований: при постановке задач, проведении полевых работ, лично выполнял интерпретацию и анализ полевых георадиолокационных, морфоструктурных и структурно-геологических данных.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на VI Сахалинской молодежной научной школе «Природные катастрофы, изучение, мониторинг, прогноз» (г. Южно-Сахалинск, 2016 г.), Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» г. Иркутск, (XXVII, 2017 г., XXVIII, 2019 г.), XII Российско-монгольской международной конференции (г. Иркутск, 2018 г.), международном семинаре INQUA по палеосейсмологии, активной тектонике и археологии (Греция, 2018 г.), научно-практической конференции «Георадар-2019, Георадар-2020», (г. Москва, 2019, 2020 г.), Всероссийском научном совещании «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)» (г. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2020 г.), Генеральной ассамблее

как: главный разломный сместитель, второстепенные опережающие разрывы, георадарные комплексы, выделенные в результате буровых и тренчинговых работ. В результате чего были построены две модели исследуемого участка, отражающие геолого-структурное развитие уступа Дельтового разлома в разные временные интервалы.

Первая модель отражает ситуацию непосредственно сразу после Цаганского землетрясения. Тогда по сейсмогенному Дельтовому разлому произошло опускание земной поверхности с амплитудами 2.6 – 4.5 м, изменяющимися с юго-запада на северо-восток [Денисенко, Лунина, 2020]. В результате чего образовались главный и два сопряженных сейсмогенных разрыва, хорошо видимые на радарограммах (рис. 7а).

Вторая модель показывает геолого-структурную обстановку в настоящее время. Уступ Дельтового разлома с момента Цаганского землетрясения сильно нивелировался. Кроме того, возникли два второстепенных разрыва, которые, возможно, образовались при Среднебайкальском землетрясении 1959 г. с $M = 6.8$. Ранее при изучении Среднебайкальского землетрясения на участке от с. Оймур до с. Дулан на протяжении 10 км было обнаружено множество зияющих трещин, сопровождающихся грязевыми извержениями [Солоненко, Тресков, 1960]. Это предполагает, что во время Среднебайкальского землетрясения в верхней части осадочного чехла могли образоваться новые трещины в зоне Дельтового разлома, что и отражается на второй модели (см. рис. 7б). В целом, трёхмерная модель строения зоны Дельтового разлома в приповерхностной части земной коры вполне соответствует общепринятой закономерности распределения разрывов в зонах магистральных сместителей [Семинский и др., 2005].

Полученные в настоящем исследовании объёмные модели, на примере одной из главных сейсмогенерирующих структур Байкальского рифта, зоны Дельтового разлома демонстрируют геолого-структурное строение сегмента разлома протяженностью около 15 км. Подобно данной модели также возможно проводить моделирование для ранее изученных структур в пределах западного борта Байкальского рифта, что позволит визуализировать пространственное положение плоскости разлома в пределах изучаемой территории. В результате этого появится возможность прогнозирования распространения и проявления различных опасных процессов (просадок, эффектов разжижения, оползней и обвалов) в исследуемой среде.

Заключение

В ходе выполнения настоящего исследования впервые по единой методике для территории Байкальского рифта были детально изучены сейсмогенные разрывы, образованные в результате позднечетвертичной активизации Приморского, Зундукского, Северобайкальского и Дельтового разломов – крупнейших сейсмогенерирующих структур региона. Используемый в работе метод георадиолокации в комплексе с геологоструктурным и морфоструктурным анализом позволили получить новые данные о внутреннем строении сейсмогенных разрывов в приповерхностной части земной коры до глубины 16 м. В результате детально рассмотрены и проанализированы структуры в двух бортах Байкальского рифта, имеющие отличающееся геологическое строение, которое позволяет определить различия и подобию в проявлении сейсмогенных разрывов как структурном плане, так и в отображении их на радарограммах. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. На территории западного и восточного побережья озера Байкал в результате сейсмических событий в позднечетвертичное время в зоне Приморского, Зундукского, Северобайкальского, Дельтового активных разломов образовались сейсмогенные сбросы, вертикальные амплитуды которых изменяются от 1,5 до 8,3 м на разрыве и от 3,8 до 9,3 м в дальней зоне, включающие в себя значения разрывного и пластического смещения.

2. Разрывные нарушения на георадиолокационных изображениях в пределах изученных зон проявляются следующими признаками: наклонной осью синфазности, секущей залегание пород (для разрывов с углами падения от 35° до 70°); разрывом осей синфазности линиями с амплитудами сигналов, близкими к нулю; хаотичными отражениями в области разрыва, обусловленными дроблением пород; границей, разделяющей блоки с резко различной волновой картиной.

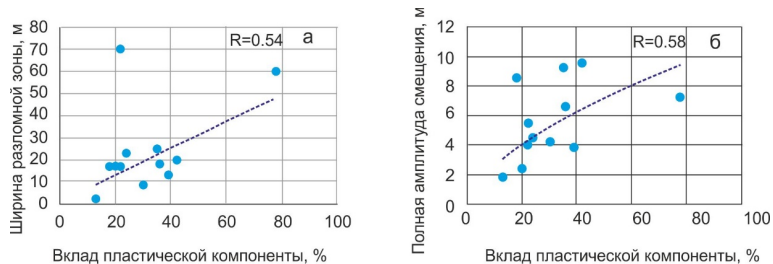


Рис. 5. Графики зависимости между шириной разломной зоны и вкладом пластической компоненты (а); между полной амплитудой смещения и вкладом пластической компоненты (б)

По единичным случаям на участках исследований было установлено, что при пологих углах главного сейсмогенного разрыва наблюдалось большее значение вклада пластической составляющей. Анализ данных по нескольким участкам также показал общую намеющуюся тенденцию к уменьшению угла падения разрыва в условиях пластической деформации.

Анализ графика зависимости полной амплитуды вертикального смещения от вклада пластической компоненты показывает среднюю корреляционную зависимость между сравниваемыми параметрами с $R=0.58$. Как видим, на графике отмечается тенденция увеличения полной амплитуды вертикального смещения относительно увеличения пластической деформации (рис. 5, б).

Таким образом, выявленные в результате статистического анализа закономерности показывают, что для Байкальского рифта при разрывообразовании немалый вклад вносит пластическая компонента смещения, от которой зависит количество и частота второстепенных, опережающих разрывов, образующих зону. Всё это необходимо учитывать при работах, направленных на оценку сейсмической опасности территории.

5.3. Объёмное моделирование зоны сейсмогенного разрыва

В последнее время при изучении многих геологических процессов и явлений неотъемлемой частью исследований стало объёмное моделирование. Необходимость его использования обусловлена получением новых данных о структуре природного объекта, которые не всегда удаётся выявить при 2D построениях.

Автором в настоящей диссертационной работе на основе полученных данных о структуре сейсмогенных разрывов в приповерхностной части земной коры были созданы объёмные модели зоны разрыва. Построение осуществлялось с использованием возможностей трехмерного моделирования, реализованного в программе AutoCAD и Micromine методом интерполяции. В качестве примера был выбран участок Дельтового разлома в эпицентральной зоне Цаганского землетрясения 1862 с $M \sim 7.5$, расположенный на восточном борту Байкальского рифта. Полигон в какой-то мере является эталонным для данного вида работ, что обусловлено геологическим строением, наиболее благоприятным для георадиолокационных исследований, а также большим количеством фактического материала, полученного в результате тренчинговых и буровых работ. В результате проведённого моделирования были построены два типа объёмных геолого-структурных моделей. Для создания первой общей (мелкомасштабной) модели использовались данные по всем георадиолокационным профилям от с. Кудара до с. Оймур с общей протяженностью около 15 км (рис. 1, б). Данная модель позволила визуализировать пространственное положение главного сейсмогенного разрыва в приповерхностной части земной коры, что дало возможность получить информацию о структуре зоны разрыва на каждом его сегменте.

Визуализировать в пространстве плоскость разрыва не всегда является достаточным при проведении современных палеосейсмогеологических исследований, поэтому автором также была создана крупномасштабная объёмная модель локального 120 метрового участка исследования, демонстрирующая разные временные промежутки развития сейсмогенного разрыва (рис. 7). В данном случае для построения модели использовалось большее количество исходных параметров, таких

Европейского союза геонаук (EGU General Assembly, 2020 г.), Всероссийской конференции с международным участием «Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов» (г. Воронеж, 2020 г.)

Автором самостоятельно и в соавторстве опубликовано 14 научных работ по теме диссертации, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 217 страниц, содержит 65 рисунков. Список литературы включает 185 наименований.

Соответствие паспорту специальности. Согласно паспорту научной специальности 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика» работа соответствует пунктам № 1, № 4, № 5 и № 9.

Пункт № 1: Структурный анализ (включая микроструктурный и петроструктурный) – изучение форм залегания горных пород, обусловленных их пластичными или разрывными деформациями.

Пункт № 4: Сеймотектоника – изучение тектонических закономерностей проявления землетрясений в пространстве и во времени, составление карт сейсмического районирования.

Пункт № 5: Неотектоника, изучающая тектонические явления новейшего этапа развития литосферы и использующая для этого свои специфические методы исследования.

Пункт № 9: Региональная геотектоника, основанная на выделении и изучении тектонических объектов того или иного региона, страны, континента, океанического или морского бассейна.

Благодарности. Автор выражает особую признательность своему научному руководителю, д.г.-м.н., ведущему научному сотруднику ИЗК СО РАН Оксане Викторовне Луниной за постановку темы, за решающую помощь в проведении полевых исследований, за непрерывное внимание к процессу написания работы и обсуждению полученных результатов. Также автор искренне благодарен к.г.-м.н. А.С. Гладкову, к.г.н. [Д.Д. Перевозникову] за совместное участие в полевых работах, интересные дискуссии и важные рекомендации при подготовке данной диссертационной работы. За помощь при проведении полевых работ благодарен кандидатам геолого-минералогических наук Е.В. Серебрякову, А.А. Гладкову, А.М. Афонькину. За ценные консультации и обсуждение научных результатов - д.г.-м.н. В.В. Ружичу, д.г.-м.н. К.Ж. Семинскому, к.г.-м.н. В.А. Санькову.

Связь работы с научными проектами. Настоящее исследование стало возможным при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90013 и по программе «мегагрантов» по постановлению р220 Правительства РФ № 075-15-2019-1883.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Сейсмогенный разрыв как объект исследований

В данной главе приведены общие сведения о сейсмогенных разрывах, об истории их изученности в пределах Байкальского рифта, который является крупнейшим звеном одноимённой рифтовой зоны. За многие годы геологических исследований получены обширные достоверные материалы о его строении, подробно описанные в работах [Логачев, 1974; Logachev, 2003; Мац, 1987, 2010; Воробьева и др., 1990; Khlystov et al., 2001; Moor et al., 1997; Зоненшайн и др., 1995; Бухаров, Фиалков, 1996; Леви и др., 1999; Семинский, Когут, 2009; Семинский, 2009; Саньков и др., 2014, 2020; Лунина, 2009]. К главным структурообразующим разломам Байкальского рифта относятся Обручевский, Приморский, Морской, Кочериковский, Северобайкальский, Кичерский – вдоль западного борта (рис. 1). Вдоль восточного борта – Черский, Истокский, Дельтовый, Сахалин-Энхалуцкий и ряд других более мелких дизъюнктивов (рис. 1). В настоящее время наиболее сейсмически активной является Южнобайкальская котловина, что наглядно подтверждается положением эпицентров землетрясений, зарегистрированных по инструментальным данным (рис. 1).

Активное исследование сейсмогенных разрывных нарушений Байкальского рифта началось с разработки Иркутскими учёными нового палеосейсмогеологического метода определения наивысших уровней сейсмической активности сейсмогенных структур по остаточным деформационным признакам, видимым на поверхности земли [Гоби-Алтайское землетрясение, 1963; Солоненко, 1962, 1963; Флоренсов и др., 1960, 1961; Хромовских, 1963, 1965]. В результате чего более чем за полувековую историю палеосейсмогеологических исследований на территории Байкальского региона было выявлено около 70 сейсмодислокаций, часть из которых после ревизии не была включена

в современный каталог палеоземлетрясений [Смекалин и др., 2010]. Отсутствие их связано с недостаточной изученностью. Об этом также свидетельствуют разногласия в основных параметрах и кинематических типах некоторых сейсмогенных разрывов, в число которых входят структуры Сарма и Зундук. В связи с этим можно полагать, что сейсмогенные нарушения Байкальского рифта имеют хорошую раннюю изученность, но требуют дальнейшего изучения на современном уровне для уточнения кинематики, параметров и сейсмического потенциала разломов. Так как большинство объектов исследований находятся на территории национальных парков, то для изучения выдвигаются более жёсткие требования для проведения работ. Согласно статье 15. «Режим особой охраны территорий национальных парков» федерального закона от 3 августа 2013 г. № 321-ФЗ «на территориях национальных парков запрещается любая деятельность, которая может нанести ущерб природным комплексам и объектам растительного и животного мира, культурно-историческим объектам и которая противоречит целям и задачам национального парка». Поэтому для решения поставленных задач необходимо применять альтернативные методы исследования, которые будут удовлетворять требованиям федерального закона. В качестве такого метода в работе использовался метод георадиолокации в комплексе с морфоструктурным анализом.

Глава 2. Развитие метода георадиолокации и его использование для изучения разрывных нарушений

В главе представлена история становления и ретроспективное развитие метода георадиолокации. В хронологическом порядке проведён литературный обзор мирового опыта по применению георадиолокации для изучения разрывных нарушений. Намечены основные преимущества и недостатки метода при изучении сейсмогенных разрывов в различных геологических условиях. Обзор имеющейся на сегодняшний день литературы по теме исследования позволил сделать следующие выводы: 1) Метод показывает хорошие результаты в грубообломочных грунтах, песчаных отложениях конусов выноса. В глинистых и суглинистых грунтах метод практически не работает; 2) В настоящее время имеется достаточно работ, демонстрирующих успешное применение метода георадиолокации для обнаружения разрывных нарушений [Табанько, 2007; Shamus et al., 2010; Khorsandi et al., 2011; Калашник, Дьяков, 2012; Лунина, 2015, 2020; Zarroca et al., 2016; Gundougu et al., 2017; Brandes et al., 2018; Gafarov et al., 2018; Lunina, Denisenko, 2020; и др.], но нет четко сформулированных признаков проявления разрывных нарушений на радарограммах; 3) Геологические условия изучаемой территории являются благоприятными для использования метода. Юго-восточное побережье оз. Байкал в основном представлено песками, супесями, северо-западное – скальными породами и делювиально-пролювиальными отложениями конусов выноса, в морфологии которых хорошо выражены следы позднечетвертичной активизации.

Глава 3. Методические особенности проведения работ

В качестве основного метода исследования в работе использовался метод подповерхностной георадиолокации в комплексе с морфоструктурным и геолого-структурным методами. Для проведения георадиолокационных исследований применялся георадар российской производства серии ОКО-2 в комплексе с антенными блоками АБ – 250, АБ – 90 и АБДЛ – Тритон. Принцип действия георадарного оборудования основан на излучении электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [Владов, Старовойтов, 2004]. Успешное проведение георадиолокационных исследований обеспечивается соблюдением определённых методических рекомендаций. Учитывая то, что величины подвижек могут меняться вдоль сейсмогенного разрыва даже в пределах нескольких метров, как это было показано в работе [Денисенко, Лунина, 2020], необходимо относительно равномерно располагать профили исследования вдоль всей зоны разрыва. Также профиль должен быть расположен перпендикулярно исследуемой структуре, а его протяжённость должна иметь достаточную длину по обе стороны от приразломного уступа для получения наиболее полной информации о второстепенных разрывах, образующихся в висячем и лежачем крыльях разлома. Для учёта рельефа местности необходимо проведение гипсометрических измерений рельефа с шагом 1-1,5 м, это обязательное условие при интерпретации георадиолокационных данных, а также для дальнейшего мор-

Анализ гистограмм вертикальных амплитуд смещений, в целом, показал, что наблюдается изменчивость в распределении значений выявленных хрупких (разрывных) смещений по простиранию разрыва как для всех участков исследования, так и отдельно для западного и восточного бортов Байкальского рифта. В общем, значения вертикальных амплитуд смещений изменяются от 1,5 м до 8,3 м. Максимальное значение вертикального разрывного смещения 8,3 м выявлено в зоне Среднекедровой палеосейсмодислокации в курумах.

Анализ гистограммы углов главного сейсмогенного разрыва показал, что на изучаемой территории в представленных отложениях углы изменяются от 56° до 88°, причем вариации углов наклона сместителей могут быть характерны для одной структуры вдоль ее простирания, что свидетельствует о сильно неоднородном строении осевой части разломов. Минимальные углы наблюдаются в зоне Дельтового разлома, где отложения имеют наименьшее сопротивление механическим (разрывным) воздействиям. Также при сравнении сейсмогенных разрывов, образованных при Цаганском землетрясении 1862 г на восточном берегу, с палеоземлетрясением в зоне Зундукского разлома на западном берегу, с магнитудами, равными $M_s = 7.5$ и 7.46 соответственно, можно отметить, что для восточного берега, при примерно равных амплитудах вертикального смещения, отмечаются меньшие значения углов падения главного сместителя.

В настоящей работе был продемонстрирован вклад пластической составляющей в образование сбросового уступа. Из расчётов следует, что для восточной части БРЗ вклад составляет 13–42% в общее смещение, для западной – 18-78%, где 78% является аномальное значение, профиль которого находился в русле временного водотока с высоким уровнем грунтовых вод. Если же рассматривать среднее значение вклада пластической составляющей в общее смещение, то для восточного побережья явно отмечается ее большее влияние, чем для западного. Благоприятными факторами для пластических деформаций на восточном побережье служит высокий уровень грунтовых вод, а также особенности геологического строения. Многие разнородности песков в пределах Дельтового разлома имеют пльвунные свойства, а илы и суглинки нередко находятся в пластическом и текучем состоянии. Предыдущими исследователями также отмечалось, что при Цаганском и Среднебайкальском землетрясениях встречались различные гидрогеологические аномалии, грязевые извержения, провалы, образованные в результате разжижения грунта [Фитингоф, 1865; Солоненко, Тресков, 1960]. Подобные сведения дают основание строить прогнозные модели локализации данного процесса при заданных магнитудах [Денисенко, Лунина, 2017]. Все эти факторы ещё раз подтверждают, что в зоне Дельтового активного разлома большой вклад в образование сбросового уступа внесла пластическая компонента смещения, которую необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности.

Из литературных источников о механике грунтов, механике твёрдых тел следует, что при пластическом разрушении образуется большее количество трещин в твёрдом теле до момента его полной потери предела прочности – момента разрушения тела [Маллистер, 2011; Барац, 2008; Жуковец, 1986; Солонцев и др., 1999]. Из этого можно сделать вывод, что при большем вкладе пластической компоненты в общее смещение в деформируемом разломном теле будет образовываться большее количество разрывных нарушений, что приведет к образованию более широкой разломной зоны. Очевидно, что на этот процесс будет влиять первоначальная пластичность пород. Сделанные георетические выводы подтверждаются практическими данными, полученными в настоящем исследовании. При помощи корреляционного анализа была оценена взаимосвязь пластической компоненты смещения и ширины разломной зоны, угла падения главного сейсмогенного разрыва и полной амплитуды смещения по разрыву. На (рис 5, а) показан график корреляционной зависимости между вкладом пластической компоненты смещения и шириной разломной зоны, на котором видна общая тенденция увеличения одного параметра относительно другого.

смещение магнитуда смещения, определенная только по разрывной компоненте (например, в не-протяженной канаве), будет недооценена на 0.13-0.14 условных единицы, при 42% вкладе – на 0.18–0.25 условных единицы.

4.5. Основные выводы по главе

Проведённые комплексные исследования сейсмогенных разрывов в зонах динамического влияния Приморского, Зундукского, Северобайкальского и Дельтового активных разломов, позволили впервые с единых методических позиций охарактеризовать их внутреннюю структуру до глубин 16 м. На основе полученных данных по каждому участку исследования, описанным выше, были сделаны следующие выводы:

1. Вертикальные амплитуды смещения изучаемых участков исследования изменяются в пределах от 1.5 – 8.3 м для разрывного смещения, определённого в ближней зоне, и от 3,8 до 9,3 м полного смещения, определённого в дальней зоне, включающие в себя значения разрывного и пластического смещения, где максимальная амплитуда полного смещения 9,3 м характерна для зоны Дельтового разлома.

2. Углы падения главных разрывов на изучаемой территории изменяются от 56° до 88°, причем вариации углов наклона сместителей могут быть характерны для одной структуры вдоль ее простира-ния, что свидетельствует о сильно неоднородном строении осевой части разломов.

3. На примере изученных сейсмогенных разрывов было установлено, что в образование при-разломного уступа существенный вклад вносит пластическая составляющая, значение которой необходимо учитывать. Из работы следует, что для восточной части БРЗ вклад составляет 13 – 42% в общее смещение, для западной - 18-78%, где 78% является аномальным значением, профиль ко-торого находился в русле временного водотока с высоким уровнем грунтовых вод, что подчёркивает влияние гидрогеологического фактора на величину пластических деформаций. В целом среднее значение вклада пластической составляющей в общее смещение для восточного побережья в районе залива Провал больше, чем для западного, что определяется геологическим строением и низким уровнем грунтовых вод.

4. По полученным параметрам величины максимальных и полных вертикальных смещений, по главному сейсмогенному разрыву был вычислен сейсмический потенциал изучаемых активных раз-ломов, определяемых магнитудами от 6,8 до 7,6.

Глава 5. Закономерности проявления сейсмогенных разрывов в позднечетвертичных отложениях Байкальского рифта

5.1. Признаки проявления разрывных нарушений в приповерхностной части земной коры

В ходе исследований установлено, что структура зон сейсмогенных разрывов в Байкальском рифте на глубинах до 16 м независимо от типа горных пород, которые они нарушают, представлена серией нарушений, образующих субпараллельные ступенчатые системы и грабены, а в редких случаях отдельными трещинами (рис. 2, 3).

На радарограммах разрывы проявляются: по разобщению осей синфазности, маркированному прозрачными линиями с амплитудами сигналов, близкими к нулю; по хаотичным отражениям в обла-сти разрыва, обусловленным дроблением пород; по границе, разделяющей блоки с резко различ-ной волновой картиной (рис. 2, 3). Разрывы с углами падения от 35° до 70° дополнительно выявля-ются по наклонной оси синфазности, секущей горизонтальное залегание осадочных пород (рис.4а).

5.2. Анализ параметров сейсмогенных разрывов

При проведении сравнительной характеристики изученных сейсмогенных разрывов для каж-дого участка исследования были построены гистограммы распределения параметров сейсмогенных разрывов: вертикальных амплитуд смещений, максимального угла склона уступа, угла падения главного разрыва.

фоструктурного анализа приразломного уступа. При интерпретации полученных данных для пре-образования скоростного геофизического разреза в глубинный определялась диэлектрическая про-ницаемость среды: 1) по дифрагированным волнам (гиперболам), возникающим при отражении от локального объекта; 2) методом подбора, который осуществляется путём сопоставления геологиче-ского разреза, полученного в результате бурения и тренчинга, с радарограммой, и последующего ручного подбора значения диэлектрической проницаемости. Интерпретация георадиолокационных данных проводилась по этапам, описанным в работах [Денисенко, Лунина, 2020; Lunina, Denisenko, 2020]. Помимо всего вышеописанного в данной главе для понимания принципа действия георадио-локации и оценке возможностей метода при работах в различных геологических условиях рассмот-рены основные физические понятия метода.

По разрывным нарушениям, в зоне которых происходила подвижка, была определена ампли-туда вертикального смещения, которая складывается из хрупкой и пластической составляющей [Homberg et al., 2017, Lunina, Denisenko, 2020]. Форма пластической деформации представлена смеще-нием без разрыва пластов и может быть вызвана как постсейсмическим или гравитационным сползанием материала, так и собственно накоплением пластической деформации перед разрывооб-разованием. В связи с этим при определении смещений была использована концептуальная модель, предусматривающая измерение вертикальной амплитуды «в ближней зоне», непосредственно на плоскости разрывов (A1) (near-field displacement), соответствующая хрупкой компоненте смещений, и в дальней зоне (A2) (far-field displacement) на удалении от сместителя, что подразумевает общую величину деформации, включающую как разрывную, так и пластическую составляющие [Homberg et al., 2017] (рис. 2, г). Для измерения полной амплитуды смещения, учитывающей хрупкую и пла-стическую компоненты, необходимы примерно параллельные исходные поверхности. В связи с этим полная амплитуда была определена только в зоне Зундукского и Дельтового разломов. В зонах Приморского и Северобайкальского была вычислена только амплитуда вертикального смещения «в ближней зоне», непосредственно на плоскости разрывов (A1).

Получение дополнительной информации о геологическом строении, протяжённости и про-стирании сейсморазрывов, геоморфологических особенностях структур обеспечивалось примене-нием вспомогательных методов исследования: дешифрированием спутниковых снимков, полевыми геолого-структурными методами, морфоструктурным анализом профилей. Последний занимает в работе особое место. Теоретические основы морфологических методов изложены в большом числе публикаций [Andrews, Hanks, 1985; Hanks, Andrews, 1989; Nash, 1980; Buckman, Anderson, 1979; и др.], но в настоящей работе использована методика Buckman and Anderson (1979). Ее отличительной особенностью является использование в расчётах положения и угла падения главного сместителя разлома. С помощью применения данного метода были определены высота приразломного уступа и вертикальное смещение по разрыву (рис. 3, а). Для вычисления вертикального смещения по раз-рыву (H1) в расчётах использовался угол падения разрыва, определённый по данным георадиолока-ции.

Глава 4. Результаты георадиолокационных и сопутствующих исследований сейсмоген-ных разрывов

Георадиолокационные исследования сейсмогенных разрывов выполнялись на эталонных по-лигонах в эпицентральных зонах сильных землетрясений северо-западного и юго-восточного побе-режий озера Байкал (рис. 1): на сегменте Приморского разлома в месте локализации палеосейсмо-дислокации Сарма; на сегменте Зундукского разлома в районе устья реки Зундук; на сегменте Се-веробайкальского разлома в зоне Среднекедровой палеосейсмодислокации; на сегменте Дельтового разлома в зоне исторического Цаганского землетрясения 12.01.1862 г (M~7.4-7.5). Первые три участка исследования находятся в северо-западом борту Байкальского рифта, последний – юго-во-сточном.

4.1. Зона Приморского разлома

Для выявления и прослеживания разрывных нарушений в зоне Приморского разлома на участке протяженностью 7100 м в крест простираения сейсмогенного активного разлома было прой-

дено 10 георадиолокационных профилей длиной от 55 до 240 м (рис. 1а). Обработка и анализ полученных геофизических данных позволили определить основные параметры структуры сейсмогенного разрыва до глубин 16 м.

По результатам полученного материала были сделаны следующие выводы:

1. В позднечетвертичное время Приморский разлом в районе долины р. Сарма активизировался в условиях тектонического растяжения с присущей ему преобладающей сбросовой кинематикой смещения.

2. Палеосейсмодислокация Сарма прослеживается как по левому, так и по правому берегу одноименной реки и имеет общую протяженность не менее 14 км. Закономерности распределения смещений вдоль ее простираия указывают на то, что вся откартированная по космоснимкам система поверхностных разрывов вскрывалась одновременно за одно сейсмическое событие.

3. Морфологически палеосейсмодислокация представлена уступами, понижениями в основании склона, часто подчеркиваемыми полосой выделяющейся зеленой растительности и грабенообразными структурами, заполненными рыхлыми осадками.

4. Полученные на основе георадиолокационных данных одноактные вертикальные смещения по сейсморазрыву изменяются с ЮЗ на СВ с 4.4 до 7.7 м (рис. 3, в). Оценки магнитуд палеоземлетрясения, рассчитанные по максимальному вертикальному смещению, равны $M_w=7.2$ и $M_s=7.4$, что даёт право предполагать более значительное по силе землетрясение, которое может иметь место в зоне Приморского разлома.

4.2. Зона Зундукского разлома

В результате проведенных работ на участке протяженностью 14300 м были получены данные георадиолокационных исследований по 12 профилям (рис. 1б). Было установлено, что на всём протяжении разлома преобладает сбросовой тип смещения с вертикальной одноактной разрывной амплитудой от 1.6 до 6.9 м. Проведенные георадиолокационные работы на данном участке исследования позволили определить также вклад пластической компоненты в общее смещение, которое изменяется от 1,1 до 5,6 м, что составляет от 18% до 78% в полное смещение. Следует отметить, что максимальное значение пластической компоненты фиксируется в месте профиля Z-6, который находится в русле временного водотока с высоким уровнем грунтовых вод.

Результаты исследования уверенно доказывают, что формирование данной структуры происходило в условиях растяжения, и поэтому для расчётов магнитуды палеособытия следует использовать уравнения зависимости между параметрами землетрясений и сейсмогенных разрывов для сбросов. В связи с тем, что в зоне Зундукского разлома определённый вклад в общее смещение вносит пластическая компонента, в расчетах магнитуды землетрясения следует использовать полное вертикальное смещение по разрыву, равное 8.4 м (A_2), которое уже включает в себя разрывное и пластическое смещение. В результате магнитуды по поверхностным волнам имеют значения $M_s = 7.46$, $M_w = 7.3$. Если же для расчётов использовать максимально установленное разрывное смещение 6.9 м, то M_s будет равно 7.39, M_w равно 7.2. Разница при 18 % вкладе в общее смещение составляет 0.07 и 0.1 соответственно.

4.3. Зона Северобайкальского разлома

В результате проведенных работ были выполнены георадиолокационные исследования по 4 профилям. Интерпретация геофизических данных позволила на каждом исследуемом профиле выделить основные разрывные нарушения и охарактеризовать их внутреннюю структуру.

По результатам полученного материала были сделаны следующие выводы:

1. Морфологически Среднекедровая палеосейсмодислокация представлена уступами, рвами и сложными грабенами, которые нарушают коренные породы и склоновые отложения, представленные каменными осыпями и крупноглыбовыми курумниками. Разломная структура зоны типична для обстановки ортогонального или чуть косога растяжения, но по-разному проявляется на отдельных ее сегментах. В целом для нее характерно сочетание крутопадающих и лирических сбросов, прослеженных до глубины 13 м. В плане они образуют системы субпараллельных разрывов с преобладающим простираием 30° .

2. Общая протяженность видимых на поверхности разрывов Среднекедровой палеосейсмодислокации составляет не менее 29.5 км, однако некоторые из них отстоят друг от друга на расстоянии от первых десятков метров до первых километров. Наибольшая ширина зоны разрывов составляет 1.9 км. Длина отдельных трещин изменяется от 5 м до 2.7 км. Установленная протяженность зоны сейсмогенных разрывов может быть лишь частью более крупной сейсмогенной разломной системы, в которую входят расположенные севернее и южнее Хибеленская и Солонцовая палеосейсмодислокации, известные с 1968 г. В их пределах известны сегменты одной возрастной группы [Чипизубов и др., 2003а].

3. Полученные на основе георадиолокационных данных вертикальные смещения и высоты тыловых разломных уступов линейно связаны между собой. Значения последних больше величин смещений, измеренных на радарограммах на 0.5–2 м, что отражает, по-видимому, величину расширения уступов вверх по осыпному склону. Максимальная и средняя арифметическая вертикальные амплитуды сброса по зоне главного сместителя, совпадающего с главным уступом, приняты 8.3 м и 4.93 м, соответственно. По отдельным сместителям смещения колеблются от 0.4 до 4.6 м. Оценки магнитуд палеоземлетрясения, рассчитанные по разным зависимостям с использованием длины разрыва и смещений, изменяются от 6.8 до 7.6.

4.4. Зона Дельтового разлома

Георадиолокационные исследования были выполнены на 7 участках, расположенных в 1.3–3.4 км друг от друга в пределах сегмента длиной ~15 км (рис. 1г). Местоположение участков работ было организовано таким образом, чтобы через равное расстояние охватить весь уступ Дельтового разлома, вдоль которого проходил сейсмогенный разрыв Цаганского землетрясения 1862 г. на суше.

По результатам полученного материала были сделаны следующие выводы:

1. Морфология песчаного уступа вдоль и в крест простираия Дельтового разлома неравномерна, что проявляется в разных углах наклона его откоса от 0° до 39° , разной высоте от 5.19 до 20.44 м и наличии мелкобугристого оползневого рельефа, хорошо развитого на участках расположения профилей 4, 5 и 6.

2. Уступ сложен переслаивающимися разноцветными песками различной зернистости, супесями, суглинками и глинами, интенсивно нарушенными разрывными и пластическими деформациями. Последние связаны с процессами разжижения и флюидизации, о чем свидетельствуют инжекционные дайки, лимонитизация осадков, а также характерные изгибы слоев и следы течения материала в канавах и разрезах.

3. Уровень грунтовых вод под верхней площадкой увала, где расположены села Шерашёво, Инкино, Дубинино, находится на глубинах ~10–15 м. У подножия уступа глубина залегания грунтовых вод уменьшается до 1–3 м. Близость грунтовых вод к поверхности и высокая водонасыщенность пластов обеспечила повышенную пластичность отложений при их сейсмогенном деформировании.

4. В пределах первых 6 м от поверхности смещение при Цаганском землетрясении реализовалось в условиях СЗ–ЮВ растяжения путем формирования ступенчатой системы сбросов с падением главного сместителя на СЗ под углами $56–76^\circ$. По данным георадиолокации, полные вертикальные амплитуды, включающие обе компоненты смещения, составили 3.83 м, 9.59 м, 2.4 м, 4.27 м, 9.28 м, 6.6 м и 1.81 м, что с разницей 0.03–0.47 м соответствует вертикальному смещению H_1 , определенному по геометрии разломного уступа с учетом падения главного сместителя (рис. 2). Разрывные компоненты деформации составили 2.32 м, 5.54 м, 1.93 м, 3.0 м, 6.07 м, 4.2 м и 1.58 м.

5. Имеется тенденция, что установленные максимальные вклады пластической компоненты смещения соответствуют минимальным углам падения главного сместителя и наибольшим мощностям зон нарушений. В свою очередь, ширина зон нарушений прямо пропорционально зависит от величины подвижки, которая оказывает влияние на угол откоса уступа. В местах наибольших амплитуд он круче, что при схожих условиях денудации закономерно.

6. В местах наибольшего вклада пластической компоненты фиксируются наибольшие величины полного смещения и ширины зон разрывов, что необходимо учитывать при проведении работ по оценке сейсмической опасности в районах с неоднородным строением разрезов, содержащих толщи с прослоями некомпетентных пород. При 35% вкладе пластических деформаций в общее

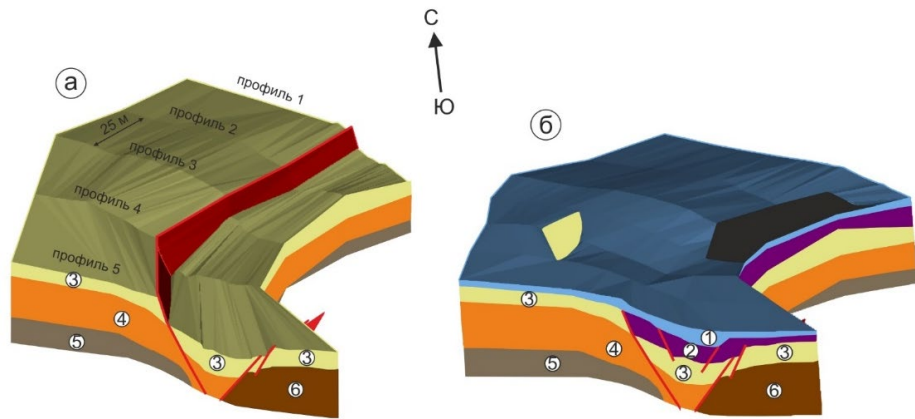


Рис. 7. Объёмные модели исследуемого участка уступа Дельтового разлома в разные временные промежутки. а – показывает структурно-геоморфологической обстановку сразу после землетрясения 1862 г.; б – модель участка для настоящего времени. Цифрами показаны номера георадарных комплексов.

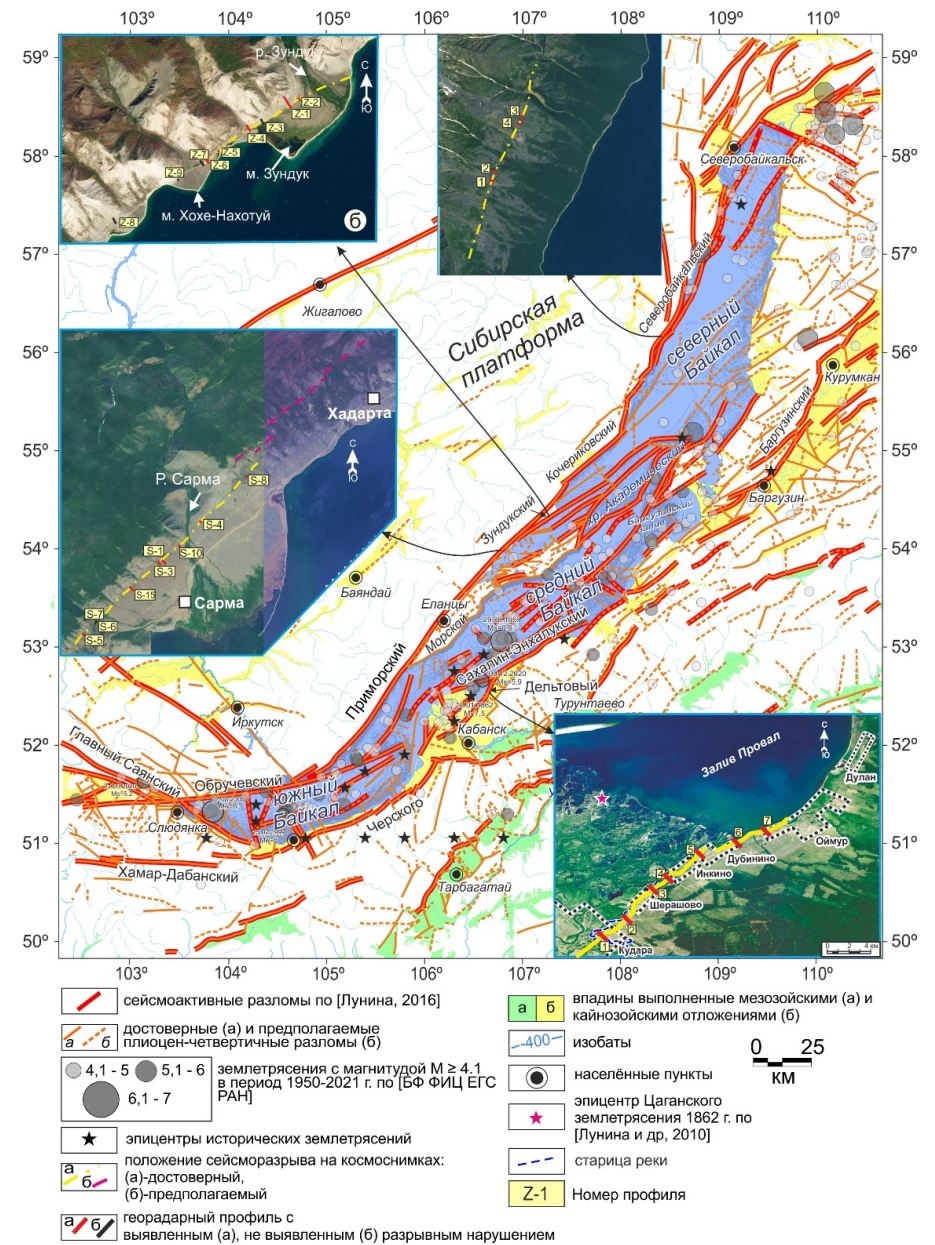


Рис. 1. Тектоника и сейсмичность Байкальской впадины и прибрежных территорий с расположением полигонов исследования.

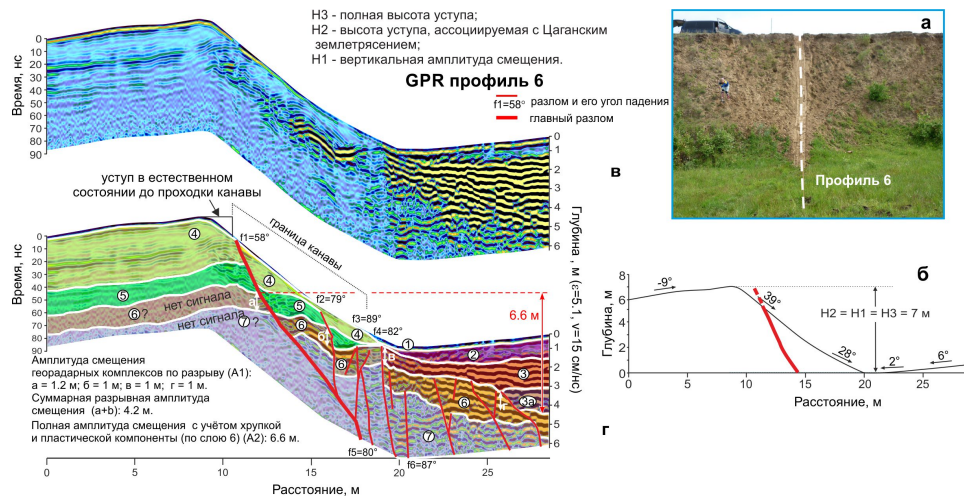


Рис. 2. Положение профиля – б на участке исследования в зоне Дельтового разлома (а), гипсометрический профиль (б), первичная радарограмма (в), интерпретируемый геолого-геофизический разрез (г). Цифрами показан номер георадарного комплекса.

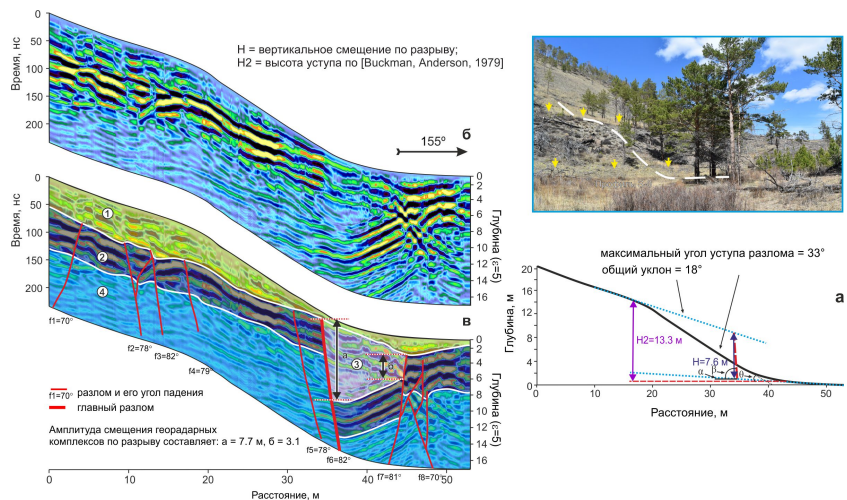


Рис. 3. Положение профиля S-8 на участке исследования в зоне Приморского разлома. Гипсометрический профиль приразломного уступа построенный по методу Букмана и Андерсона [Buckman, Anderson, 1979] (а) (залитыми треугольниками показаны концы измеряемых сегментов; точечным пунктиром обозначены проекции максимального угла уступа, поднятой и опущенной поверхности), первичная радарограмма (б), интерпретируемый геолого-геофизический разрез (в). Желтыми стрелками показан уступ. Цифрами показан номер георадарного комплекса.

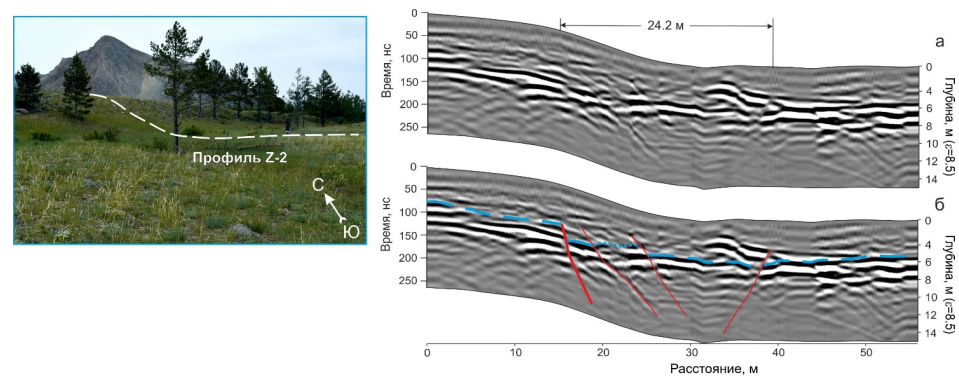


Рис. 4. Фрагмент радарограммы профиля Z-2 в зоне Зундукского разлома. С интерпретируемыми разрывными нарушениями. Первичная радарограмма (а), интерпретируемый геофизический разрез (б).

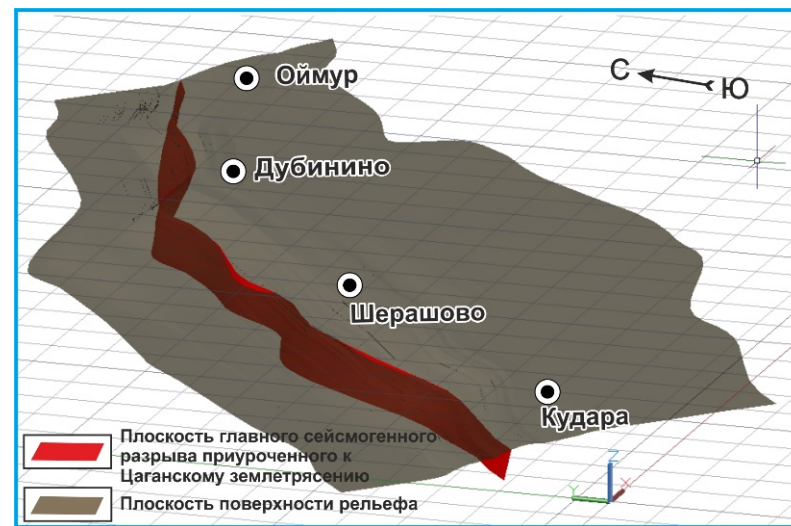


Рис. 6. Объёмная модель главного сейсмогенного разрыва, образованного при Цаганском землетрясении 1862 г.