



ZONES OF SEISMOGENIC RUPTURES IN THE BAIKAL RIFT: SPATIAL LOCATION AND SEISMIC POTENTIAL

O.V. Lunina , I.A. Denisenko , A.A. Gladkov

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

ABSTRACT. Seismic hazard assessment remains one of the priorities of tectonically active regions. It is based on the data for seismogenic ruptures indicating the segments of active surface faults. Based on the predecessor data, continuous satellite imagery interpretation, drone aerial photography, GPR profiling and morphostructural analysis, the authors of this paper have obtained new data concerning the location and main parameters of seismogenic ruptures in the Baikal rift. GIS format has been used to map surface ruptures along the Baikal coast with compiling the relevant digital database available on the <http://activetectonics.ru> website. By a number of features the ruptures are grouped into 20 zones, 6 of which consist of the secondary ruptures in the Khamar-Daban Range. The latter could result from a simultaneous impact of structural (tectonic structure), seismic and climatic factors (glacial retreat and load relief) which presently allows them to be classified as seismogravitational structures. Length-based and maximum single acting displacement-based calculations were made of the maximum possible magnitudes for the primary rupture zones. Seismic potential of the best-studied seismogenic zones of the Baikal rift is $M_w=7.2-7.3$ and $M_s=7.3-7.5$. On one hand, the present paper summarizes once again the results of the studies of seismogenic ruptures in the Baikal rift and on the other takes this issue to the next level. The obtained results have important implications for refinement of seismic hazard assessment and development of educational tourism in the region.

KEYWORDS: zone; seismogenic rupture; parameters; earthquake magnitude; aerial photography; ground penetrating radar; database; Baikal

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the Institute of Earth's Crust SB RAS for 2021–2025 (project No. FWEF-2021-0009). The work was conducted using equipment and infrastructure of the SRF R/V "Geolog" and the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RUS, and data obtained with LSRF "Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world" (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).



EDN: GZQJKH

RESEARCH ARTICLE

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

Received: February 6, 2025

Revised: February 25, 2025

Accepted: March 14, 2025

FOR CITATION: Lunina O.V., Denisenko I.A., Gladkov A.A., 2025. Zones of Seismogenic Ruptures in the Baikal Rift: Spatial Location and Seismic Potential. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (2), 0823. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0823

Supplementary files: [Lunina_et_al_2025_Suppl-1.rar](#); [Lunina_et_al_2025_Suppl-2.pdf](#)

ЗОНЫ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА: ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

О.В. Лунина, И.А. Денисенко, А.А. Гладков

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

АННОТАЦИЯ. Оценка сейсмической опасности остается одной из приоритетных задач в тектонически активных регионах. В ее основе лежат данные о сейсмогенных разрывах, маркирующих на поверхности активные сегменты разломов. Опираясь на данные предшественников с использованием непрерывного дешифрирования космических снимков, беспилотной аэрофотосъемки, георадарного профилирования и морфоструктурного анализа, авторы статьи получили новые данные о положении и главных параметрах сейсмогенных разрывов Байкальского рифта. В формате геоинформационных систем составлена актуализированная карта поверхностных нарушений вдоль побережий оз. Байкал, сопровождаемая базой данных, доступной в цифровом виде на сайте <http://activetectonics.ru>. По ряду признаков нарушения сгруппированы в 20 зон, 6 из которых состоят из вторичных нарушений в хребте Хамар-Дабан. Последние могли быть результатом одновременного воздействия структурных (тектоническое строение), сейсмических и климатических факторов (отступление ледников и снятие нагрузки), что позволило на данном этапе отнести их к сейсмогравитационным структурам. Для зон первичных разрывов по длине и максимальному одноактному смещению рассчитаны максимально возможные магнитуды. Сейсмический потенциал наиболее изученных сейсмогенных зон в Байкальском рифте составляет $M_w=7.2-7.3$ и $M_s=7.3-7.5$. Настоящая работа, с одной стороны, подводит очередной итог в исследованиях сейсмогенных разрывов Байкальского рифта, с другой – определяет текущие проблемы их изучения на новом уровне. Полученные результаты имеют важное значение для уточнения оценки сейсмической опасности и развития образовательного туризма в регионе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зона; сейсмогенный разрыв; параметры; магнитуда землетрясения; аэрофотосъемка; георадиолокация; база данных; Байкал

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. (проект № FWEF-2021-0009). Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП НИС «Геолог», ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН и данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмогенный разрыв (сейсмодислокация) представляет собой сегмент активного разлома, отражающий геологическое проявление очага землетрясения на земной поверхности [Strom, Nikonov, 1997; Rogozhin, 2012]. В деталях он состоит из серии непрерывных нарушений протяженностью от первых метров до нескольких десятков километров, образующих зоны с характерной внутренней структурой. В строении таких зон могут принимать участие как первичные (вышедшие непосредственно из очага), так и вторичные (явно выраженные линейные сейсмогравитационные) разрывы. От степени их изученности зависит оценка сейсмической опасности, поэтому картирование сейсмогенных разрывов представляет собой ключевую задачу в сеймотектонике.

Изучению отдельных зон современных и палеосейсмогенных разрывов посвящены многочисленные работы по всему миру [McCalpin, 2009; Caputo, 2005; Radulov et al., 2023; и мн. др.]. Однако компиляция части из них с использованием современных геоинформационных технологий в единую базу данных была сделана сравнительно недавно [Nurminen et al., 2022]. В нее вошли 50 исторических землетрясений с ассоции-

рованными разрывами. Одновременно авторы настоящей статьи в рамках существующей для плиоцен-четвертичных разломов информационной системы «Active Tectonics» (<http://activetectonics.ru>) стали разрабатывать геопространственную базу данных для сейсмогенных разрывов Байкальского региона. В отличие от зарубежной, она представлена на вышеуказанном авторском сайте и наследует подобное представление данных об объекте. Цель настоящей статьи – представить результаты картирования и систематизации зон сейсмогенных разрывов Байкальского рифта с возможной оценкой их сейсмического потенциала. На примере данной работы предлагается оптимальный и эффективный комплекс современных технологий для изучения следов палео- и исторических землетрясений в пределах особо охраняемых природных территорий.

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗУЧЕННОСТИ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ В БАЙКАЛЬСКОМ РИФТЕ

Основные данные по палеосейсмодислокациям Сибири были собраны в 60–80-е гг. прошлого века [Khromovskikh, 1965; Solonenko, 1968, 1977, 1981, 1985; и др.]. В последующие годы происходило преимущественно

доизучение выявленных ранее структур [Chipizubov et al., 2003, 2015; Smekalin et al., 2007]; при этом часть из описанных ранее не вошли в последний опубликованный каталог [Smekalin et al., 2010]. В цитированной работе в табличной форме собраны сведения о 52 палеосейсмодислокациях Байкальской рифтовой зоны,

но только 6 из них (Котельниковская, Сарминская, Солонцовая, Среднекедровая, Хибеленская, Наледная) находятся в пределах Байкальского рифта – ее центрального звена (рис. 1), совпадающего с оз. Байкал и его горным окружением. Сейсмический потенциал палеосейсмодислокаций, т.е. магнитуда (M) землетрясения,

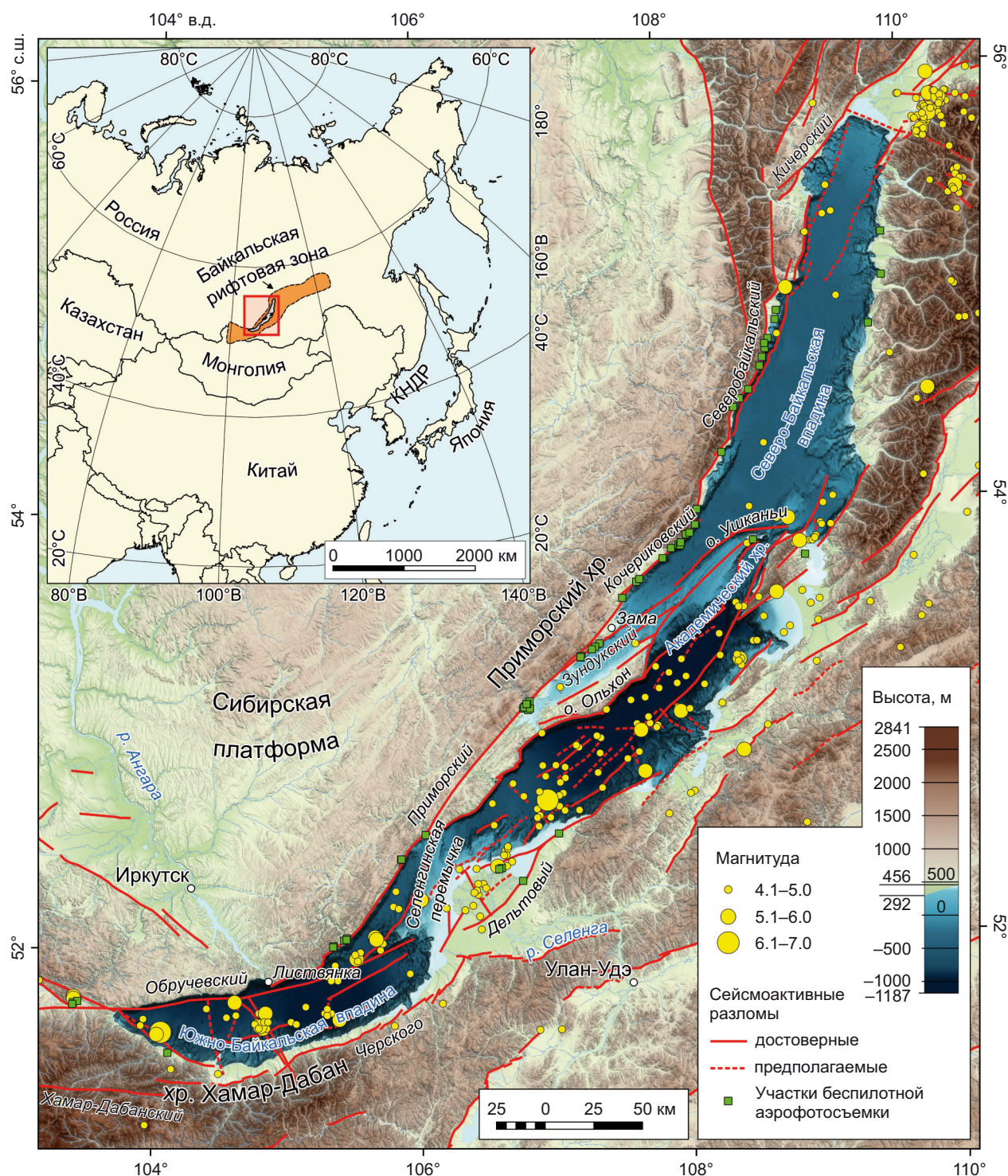


Рис. 1. Байкальский рифт с положением основных сейсмоактивных разломов и эпицентров землетрясений за период 1950–2023 гг. Красный прямоугольник на врезке – район работ.

Fig. 1. The Baikal rift with the location of the main seismically active faults and earthquake epicenters for the period from 1950 to 2023. A red rectangle in the inset is the work area.

оценивается в пределах 6.8–7.7. В каталоге указаны координаты центра структур, что помогает идентифицировать их на спутниковых снимках.

Детальное картирование палеосейсмодислокаций вдоль северо-западного борта Северо-Байкальской впадины выполнено А.В. Чипизубовым с коллегами [Chipizubov et al., 2003, 2015], однако данные сохранились лишь в «бумажной» версии. Авторы сделали выводы, что в зоне Северобайкальского разлома за последние 10 тыс. лет произошло как минимум пять разрывообразующих землетрясений с $M=7.1-7.5$ и, возможно, два землетрясения с $M=7.6-8.0$ или $M>8$ [Chipizubov et al., 2003]. В зоне Приморского разлома выявлены два землетрясения, произошедшие приблизительно 8–10 тыс. лет назад с $M=7.5$ (район р. Сарма) и 12–14 тыс. лет назад с $M=7.7$ (район р. Зундук). Большинство сейсмогенных разрывов можно проследить на разного типа дистанционных снимках, но сделанные авторами выводы о сдвиго-взбросовой и взбросовой кинематике смещений по палеосейсмодислокациям, а также слишком высокий в некоторых случаях сейсмический потенциал разломов вызывают сомнение и противоречат более ранним выводам [Solonenko, 1968].

В бортах Южно-Байкальской впадины достоверно изучено только две структуры – Талая, приуроченная к Приморскому разлому [Arzhannikova, Arzhannikov, 2019], и Дельтовая [Lunina, Denisenko, 2020], образованная при Цаганском землетрясении 1862 г. на восточном побережье оз. Байкал. Красноярская структура, расположенная в районе мыса Красный Яр, была впервые выделена В.С. Хромовских [Solonenko, 1968], но в дальнейшем нигде не упоминалась.

Особую группу линейных деформаций представляют нарушения в хребте Хамар-Дабан, обрамляющем юго-восточный борт Южно-Байкальской впадины. Рвы и уступы на горных вершинах и склонах, а также дамбы, перегораживающие русла водотоков, были определены как первичные сейсмодислокации, связанные с катастрофическими землетрясениями прошлого [Khromovskikh, 1965]. Позднее в связи с их недостаточной изученностью и значительной отдаленностью от известных крупных разломов сейсмогенный генезис этих структур подвергся сомнению.

Таким образом, современные знания о сейсмогенных нарушениях Байкальского рифта весьма разрозненны, что требует единого подхода к их картированию, обобщения известных о них сведений и уточнения, по возможности, магнитуды землетрясений, с которыми они были связаны.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с тем, что площадь картирования поверхностных нарушений рельефа в Байкальском рифте достигает более тысяч квадратных километров, первый этап работ включал в себя изучение и критический анализ опубликованных материалов по сейсмодислокациям Байкальского региона. К основным из них относятся научные труды В.П. Солоненко, его коллег и

последователей, которые внесли неоценимый вклад в развитие палеосейсмогеологических исследований в Восточной Сибири [Solonenko, 1968, 1977, 1981; Khromovskikh et al., 1993; Chipizubov et al., 2003, 2006; Chipizubov, 2007]. Схемы и описания в публикациях способствовали поиску сейсмогенных разрывов на спутниковых снимках с целью их детального картирования на основе геоинформационных систем (ГИС).

На втором этапе для составления схемы поверхностных деформаций в пределах Байкальского рифта в формате ГИС нами дешифровались спутниковые снимки высокого разрешения, доступные через программы SAS.Планета, QGIS и веб-сервисы Google Планета Земля и Яндекс.Карты. Различные веб-сервисы имеют разную представительность космических изображений по разрешению (от 1 до 30 м/пкс). Их сравнение в разных программах на одни и те же территории позволяет удовлетворительно картировать сейсмогенные разрывы на снимках, представленных онлайн.

Третий этап включал уточнение строения наиболее представительных зон разрывов на основе материалов аэрофотосъемки, проведенной в 2019–2022 гг. с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro V2.0 и DJI Phantom 4 RTK. Нам удалось отснять более 50 участков в пределах побережий оз. Байкал (рис. 1). Для 21 из них площадью от 0.02 до 16.23 км² построены ортофотопланы и цифровые модели местности (ЦММ) сверхвысокой точности. С некоторыми из них можно ознакомиться на авторских сайтах: <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html>, и <http://demdata.activetectonics.ru/rytiy2019.html>.

Самостоятельным видом работ было георадарное профилирование и полевое обследование избранных сейсмодислокаций. Радарограммы использованы для подтверждения наличия нарушений на глубине, определения кинематического типа смещений и во многих случаях величины подвижки [Lunina et al., 2019; Denisenko, Lunina, 2020; и др.]. В наших работах в разное время использовались георадары OKO-2 и OKO-3 с антенными блоками, характеризующимися центральной частотой 50, 90, 100, 150, 250, 400 МГц. Вскрытие разрывов канавами проводилось только на Дельтовом [Lunina, Denisenko, 2020] и единожды на Северобайкальском разломе между мысами Малая и Большая Коса [Denisenko, Lunina, 2023], где участки не относятся к особо охраняемым природным территориям.

На четвертом этапе для определения магнитуды землетрясений M_w и M_s использовались уравнения регрессий для сбросов по [Wells, Coppersmith, 1994; Lunina, 2002] соответственно:

$$M_w = 4.86 + 1.32 \log L \text{ при } S = 0.34; \quad (1)$$

$$M_w = 6.61 + 0.71 \log MD \text{ при } S = 0.34; \quad (2)$$

$$M_s = 5.80 + 0.73 \log L \text{ при } S = 0.54; \quad (3)$$

$$M_s = 6.73 + 0.79 \log MD \text{ при } S = 0.44, \quad (4)$$

где L – длина поверхностного разрыва (зоны разрывов), км; MD – максимальное смещение, м; M_w – моментная

магнитуда; M_s – магнитуда по поверхностным волнам; S – стандартная ошибка.

Вертикальные смещения определялись по ЦММ путем многочисленных измерений смещений исходных поверхностей на поднятом и опущенном крыльях сейсмогенного разрыва и/или по смещению георадарных комплексов. Методика подразумевает анализ параллельных или близпараллельных исходных поверхностей [Bucknam, Anderson, 1979; McCalpin, 2009]. Из всех значений выбиралось максимальное, отвечающее по ряду признаков одноактному смещению. К таковым относится отсутствие изменения в угле наклона уступа при адекватной величине смещений (не более 10 м), а также характерные признаки на интерпретируемых георадарных разрезах (при их наличии), указывающие на одну или несколько подвижек.

В некоторых случаях не представлялось возможным вычислить магнитуду ввиду отсутствия новых данных о максимальных смещениях и длине. В связи с этим были использованы оценки предшественников.

Описанный комплекс технологий представляется наиболее оптимальным для поиска и изучения следов палео- и исторических землетрясений на обширных площадях, в частности относимых к особо охраняемым природным территориям.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате дешифрирования спутниковых снимков и материалов беспилотной аэрофотосъемки откартированы сейсмогенные разрывы, расположенные преимущественно вдоль побережий оз. Байкал (рис. 2, 3; Suppl. 1 на странице статьи онлайн – shp-файлы разрывов). В электронном виде они представлены в специальном разделе геопортала «ActiveTectonics» на спутниковой подложке «Yandex» (<http://activetectonics.ru>), где имеющиеся данные о разрывах заполнены в соответствии с описанием входной информации (Suppl. 2 на странице статьи онлайн). При визуализации на сайте следов разрывов доступна их классификация по классу достоверности и разделению на первичную и вторичную природу. Кликая на разрыв, можно получить заполненную информацию для объекта.

Все сейсмогенные разрывы были сгруппированы в зоны с учетом ряда признаков: относительно близкое расположение разрывов друг к другу, резкое изменение направления нарушений или береговой линии озера, сохранность поверхностных деформаций в рельефе, имеющиеся датировки деформаций. Всего было выделено 20 зон разрывов – 10 вдоль побережий Северо-Байкальской впадины (см. рис. 2) и 10 – вдоль Южно-Байкальской (рис. 3). Аршанская, Торская и Восточно-Саянская сейсмодислокации, расположенные на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны, здесь не рассматриваются. Ниже приводится краткая характеристика выделенных зон. Некоторым из них посвящены отдельные публикации, обосновывающие параметры смещений и магнитуду событий. Для таких объектов будет дана основная информация с от-

сылкой на предыдущие наши работы, выполненные по описанной выше методике.

4.1. Сейсмогенные разрывы побережий Северо-Байкальской впадины

Сейсмогенные разрывы Северо-Байкальской котловины описаны для западного борта, так как густая залесенность и хорошо выраженные байкальские террасы затрудняют интерпретацию уступов вдоль ее противоположной стороны.

Сарминская зона – первая от южной оконечности впадины, приурочена к Приморскому разлому, простирающемуся вдоль береговой линии западного побережья оз. Байкал от пос. Листвянка до пос. Зама. Дислокации прослеживаются в обе стороны от р. Сарма (см. рис. 2, зона 1) и наиболее отчетливо выражены справа от нее рвами и уступами, дешифрируемыми на ЦММ и ортофотоплане (рис. 4). Преимущественное простираание разрывов 30–50° (рис. 5, а). По совокупности данных, в том числе полученных с помощью метода георадиолокации, нами установлено, что длина Сарминской зоны сейсмогенных разрывов достигала не менее 23 км при ширине деформаций 0.55–1.30 км. Максимальное вертикальное смещение по одному из хорошо проявленных сбросов слева от р. Сарма составило 7.7 м (рис. 8 в работе [Denisenko, Lunina, 2020]), что соответствует магнитуде землетрясения $M_s=7.4$ и $M_w=7.2$.

Ото-Хушун-Зундукская зона маркирует Зундукский разлом и имеет протяженность ~19.5 км (см. рис. 2, зона 2). Два разрыва в районе мыса Ото-Хушун длиной 182 м и 403 м, а также система нарушений общей длиной ~2.35 км, смещающая конус выноса р. Зундук (см. рис. 2, см. также <http://activetectonics.ru>), подтверждены методом георадиолокации [Denisenko, Lunina, 2021]. На изученных участках устанавливаются все признаки растяжения – сбросовые уступы и смещения георадарных комплексов, грабены и раздвиговые структуры. В правой части конуса выноса р. Ото-Хушун (рис. 8 в работе [Denisenko, Lunina, 2020]) удалось определить максимальную одноактную вертикальную подвижку по сбросу – 8.4 м, которая могла произойти при землетрясении с $M_s=7.5$ и $M_w=7.3$.

Калтыгей-Тудугуйская зона разрывов состоит из двух условно сгруппированных сегментов длиной ~5.2–5.6 км, расположенных на ближайшем расстоянии ~3.7 км друг от друга (см. рис. 2, зона 3; рис. 6, а). Сегмент вдоль Приморского разлома был детально описан В.С. Хромовских под названием Аральская сейсмогенная структура сбросового типа (рис. 8 в работе [Solonenko, 1968]). Амплитуды смещения в серицит-хлоритовых сланцах оцениваются от первых до нескольких десятков метров.

Сегмент вдоль Тудугуйского разлома, впервые выделенный нами, прослеживается вдоль локального уступа Приморского хребта, в районе залива Кыргалтей, севернее мыса Кулгана (рис. 6). По морфологической выраженности дизъюнктив аналогичен Сарминской палеосейсмодислокации. Через сейсмогенный уступ

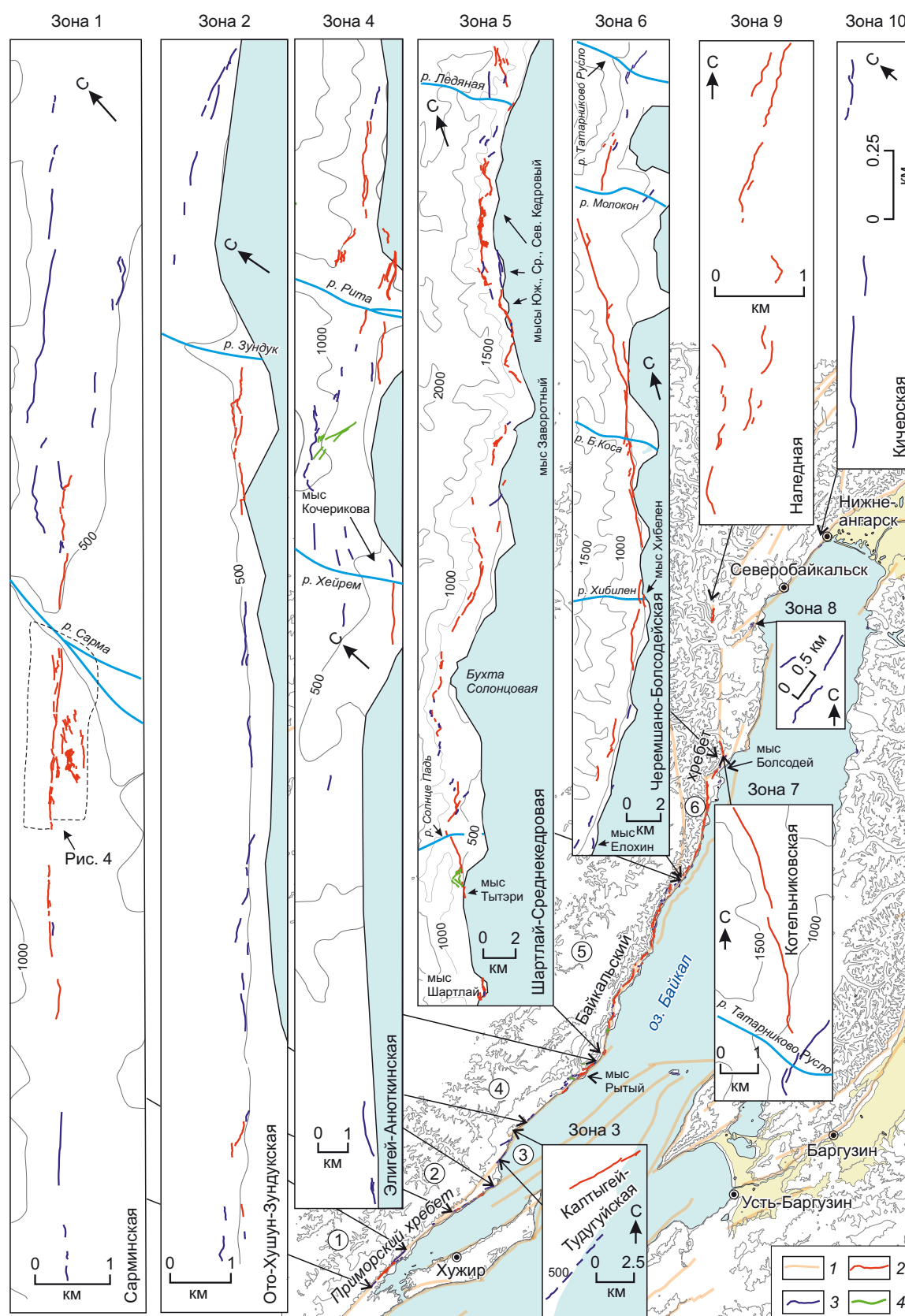


Рис. 2. Зоны сейсмогенных разрывов вдоль побережий Северо-Байкальской впадины (см. также авторский сайт: <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html>). 1 – сейсмоактивные разломы; 2–4 – сейсмогенные разрывы: 2 – первичные достоверные, 3 – первичные предполагаемые, 4 – вторичные достоверные.

Fig. 2. Zones of seismogenic ruptures along the coasts of the North Baikal basin (see also the author's website: <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html>). 1 – seismically active faults; 2–4 – seismogenic ruptures: 2 – reliable primary, 3 – inferred primary, 4 – reliable secondary.

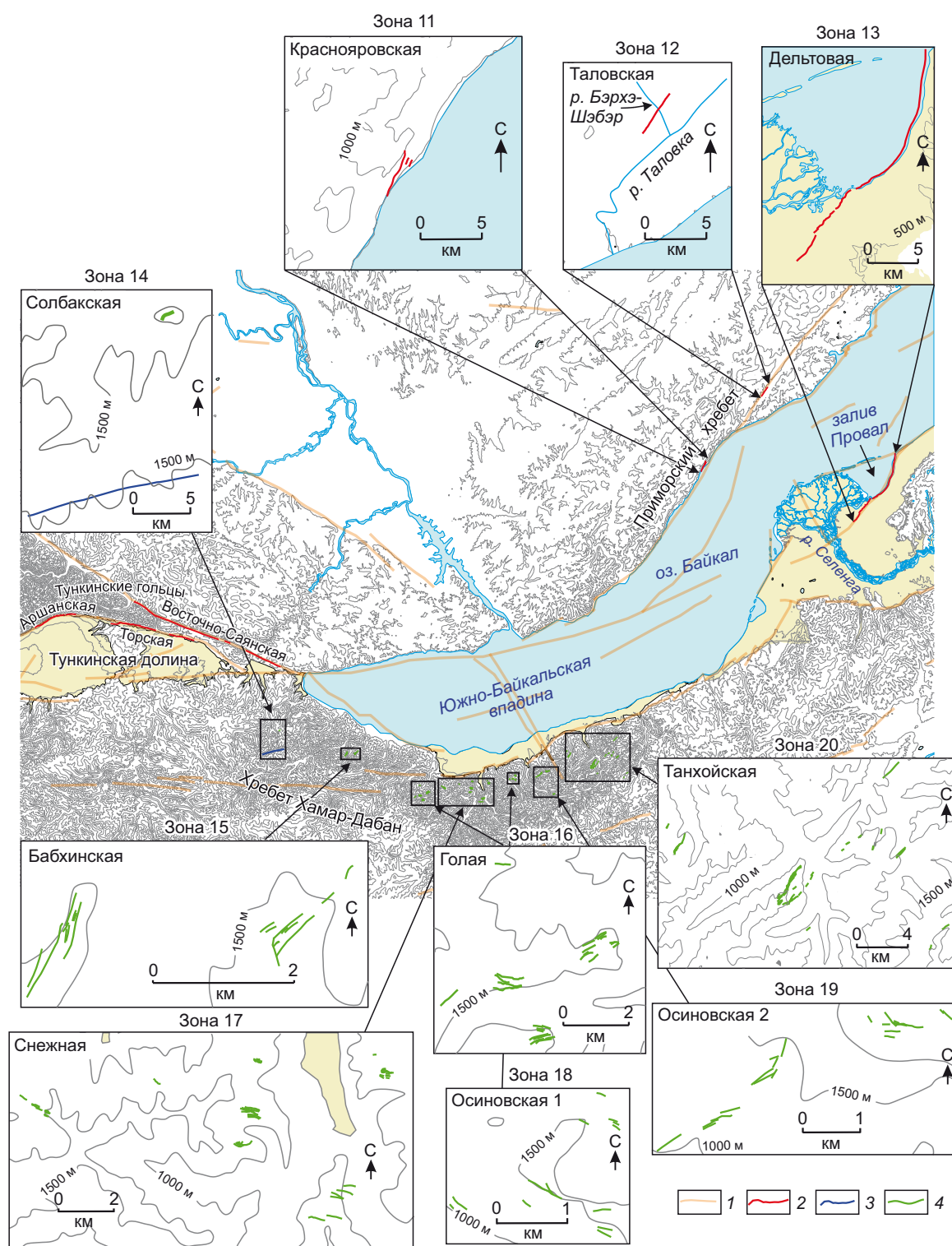


Рис. 3. Зоны сейсмогенных разрывов вдоль побережий Южно-Байкальской впадины, Тункинской долины и в хребте Хамар-Дабан (см. детали строения на авторском сайте <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html> в разделе сейсмогенные разрывы). 1 – сейсмоактивные разломы; 2–4 – сейсмогенные разрывы: 2 – первичные достоверные, 3 – первичные предполагаемые, 4 – вторичные предполагаемые.

Fig. 3. Zones of seismogenic ruptures along the coasts of the South Baikal basin, Tunka basin and Khamar-Daban Range (see also the author's website: <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html> in the section of seismogenic ruptures). 1 – seismically active faults; 2–4 – seismogenic ruptures: 2 – reliable primary, 3 – inferred primary, 4 – inferred secondary.

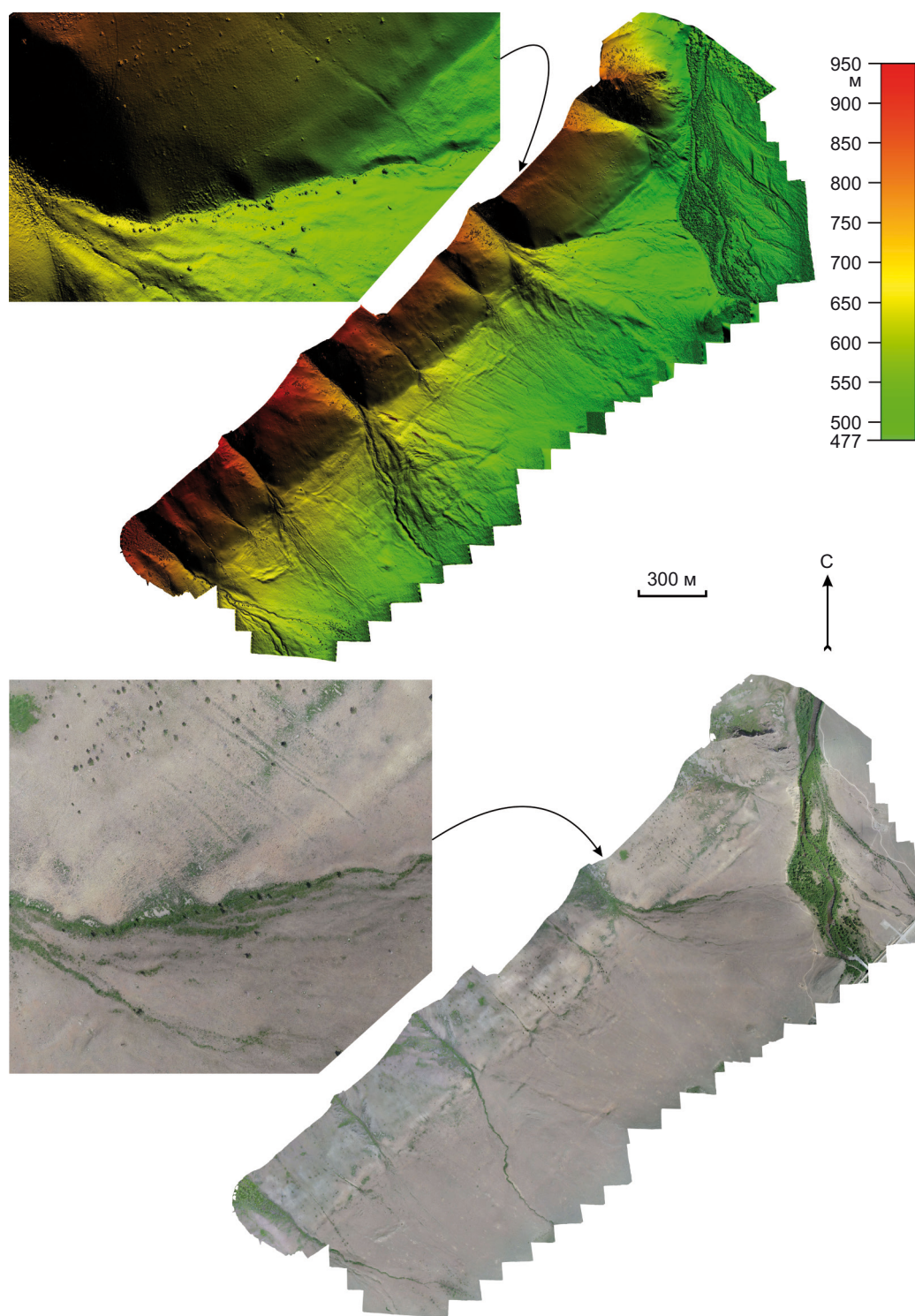


Рис. 4. Пример ЦММ и ортофотоплана участка Сарминской зоны разрывов справа от р. Сарма по данным аэрофотосъемки 11.06.2020 г.

Положение участка см. на рис. 2. На ЦММ хорошо выделяется сейсмогенный уступ и ров у подножия Приморского хребта, а также второстепенные разрывы в висячем крыле разлома (пространственное разрешение 7.3 см/пкс для ортофотоплана, 11 см/пкс – для ЦММ).

Fig. 4. A DSM and an orthophotoplan of a section of the Sarma rupture zone to the right of the Sarma River based on the June 11, 2020 aerial photography data.

See Fig. 2 for the position of the section of the Sarma rupture zone. The DSM clearly shows a seismogenic scarp and a trough at the foot of the Primorsky Range, as well as the secondary ruptures in the hanging wall of the fault (spatial resolution 7.3 cm/px for the orthophotoplan, 11 cm/px for the DSM).

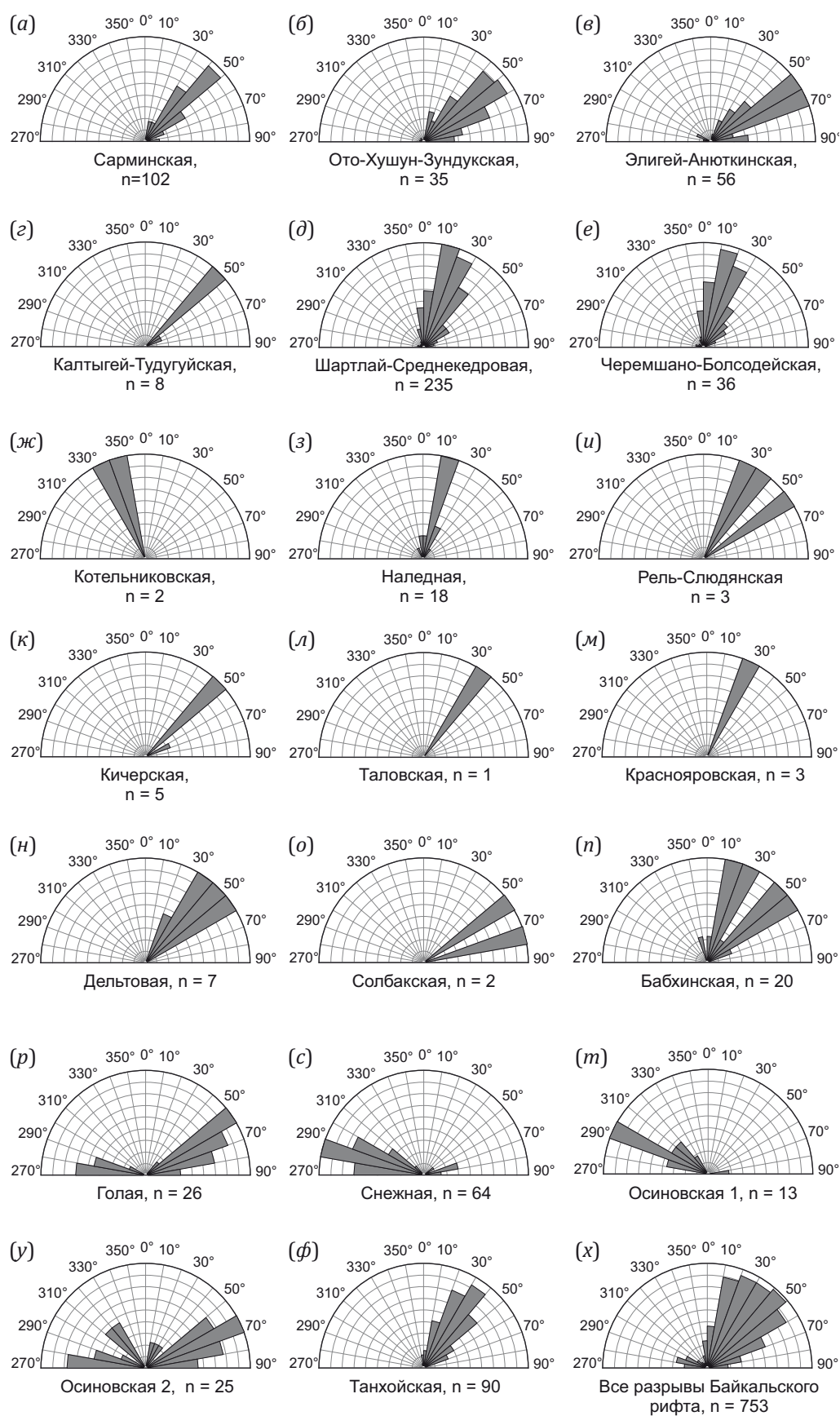


Рис. 5. Роза-диаграммы простирания сейсмогенных разрывов для разных зон (а-ф) и в целом для Байкальского рифта (х), в т.ч. не сгруппированных с восточного борта Северо-Байкальской впадины.

Fig. 5. Rose diagrams of the strike of seismogenic ruptures for different zones (a-f) and for the Baikal rift (x) as a whole, including those ungrouped from the eastern side of the North Baikal basin.

было пройдено два георадарных профиля (рис. 6, б), которые показали на глубине хаотичные смещения осей синфазности и затухание амплитуд сигналов в месте выхода нарушений на поверхность (рис. 7). Амплитуды смещения на поверхности почти на всем протяжении разлома уничтожены денудацией. Ближе к северо-восточному окончанию на суше по ЦММ удалось измерить максимальную вертикальную подвижку 2.3 м (рис. 8). Если допустить, что смещение произошло за одно сейсмическое событие, то вычисленные M_w и M_s землетрясения были 6.87 и 7.02 соответственно. По длине 5.2 км M_w и M_s оцениваются в 5.8 и 6.3.

По Аральской структуре магнитуда может быть рассчитана только по ее протяженности 5.6 км – $M_w=5.85$ и $M_s=6.34$, но длина сейсмогенных разрывов на оз. Байкал не является определяющей, так как большинство

из них уходит в акваторию. Следовательно, для Калтыгей-Тудугуйской зоны можно принять сейсмический потенциал $M_w=6.9$ и $M_s=7.0$.

Элигей-Анюткинская зона начинается в ~2.2 км северо-восточнее устья р. Элигей и заканчивается в районе мыса Анютка, достигая в целом длины ~37 км и ширины ~3.6 км (см. рис. 2, зона 4; рис. 9). В юго-западной части она представлена структурой Элигей – «сейсмогравитационным клином» по [Solonenko, 1968, с. 21–22], тыловая часть которого является сейсмогенным разрывом, рассекающим коренные диабазы и кристаллические сланцы (рис. 10).

Далее на северо-восток позднечетвертичные нарушения скрываются под водами Байкала, а через ~15 км пересекают мыс Кочериково (см. рис. 9) и снова исчезают в акватории озера. У устья р. Хейрем они

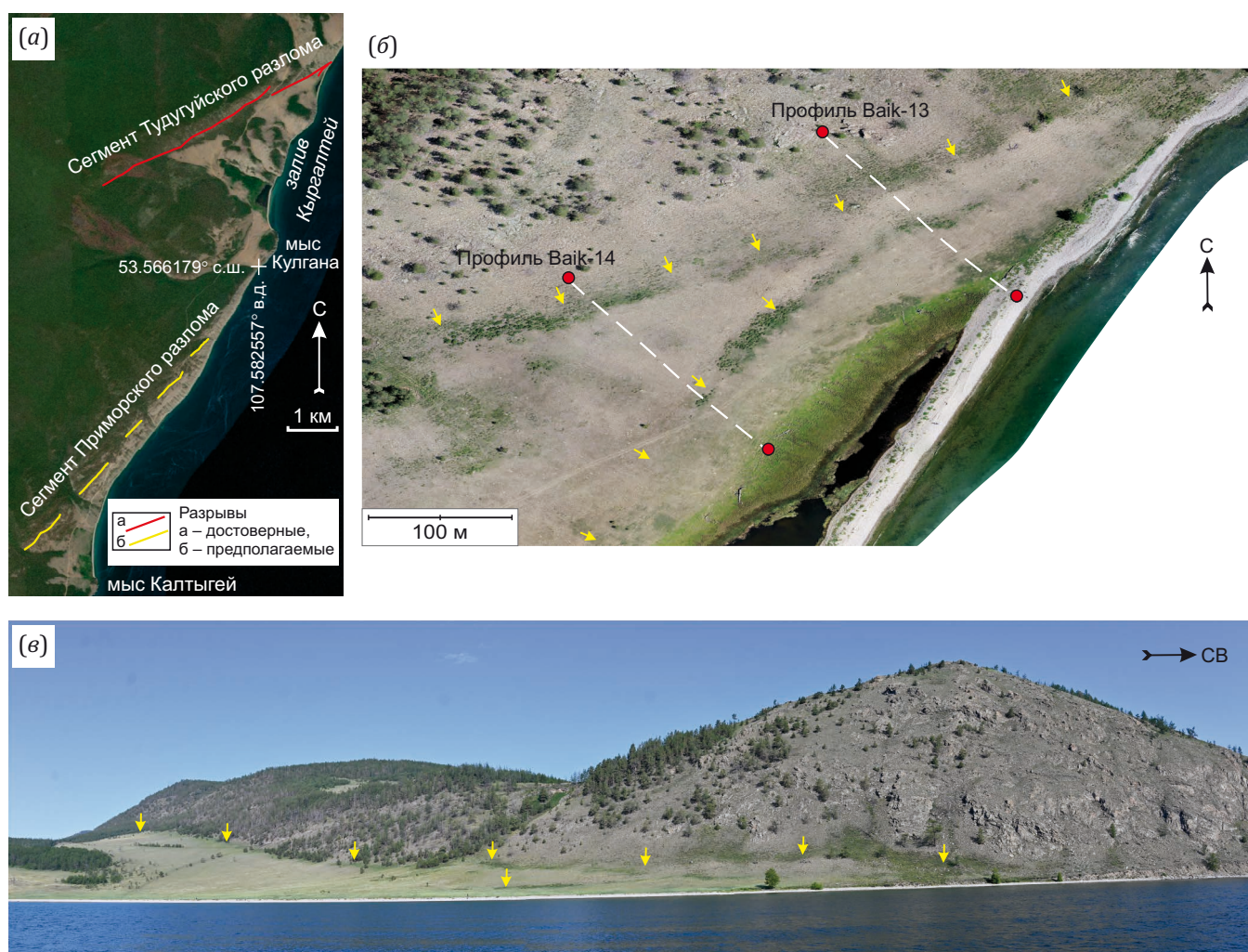


Рис. 6. Калтыгей-Тудугуйская зона разрывов.

(а) – общий вид на космоснимке; (б) – ортофотоплан по данным аэрофотосъемки 11.06.2020 г. для сегмента Тудугуйского разлома с положением георадарных профилей Baik-13 и Baik-14 через сейсмогенные разрывы, показанные желтыми стрелками; (в) – вид на тудугуйские разрывы с оз. Байкал.

Fig. 6. Kaltygei-Tudugui rupture zone.

(а) – a general view on the satellite image; (б) – orthophotoplan based on the June 11, 2020 aerial photography data for the Tudugui fault segment with the position of the Baik-13 and Baik-14 GPR profiles through the seismogenic ruptures shown by yellow arrows; (в) – view of the Tudugui ruptures from Lake Baikal.

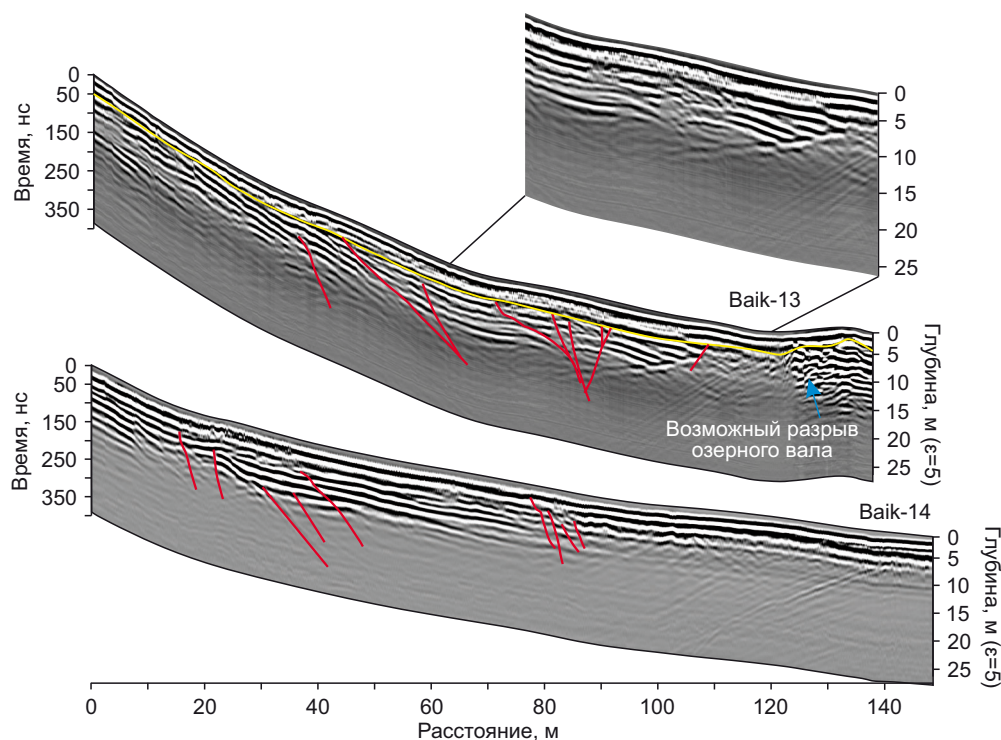


Рис. 7. Георадарные профили через тудугуйские разрывы, выполненные георадаром ОКО-3 с антенным экранированным блоком АБ-150/400М и использованной частотой 150 МГц. Красные линии – интерпретированные нарушения, желтая линия – нижняя граница верхнего георадарного комплекса.

Fig. 7. GPR profiles across the Tudugui ruptures, made using the OKO-3 ground-penetrating radar with the AB-150/400M shielded antenna and a frequency of 150 MHz. Red lines are the interpreted ruptures, yellow line is the lower boundary of the upper radar facies.

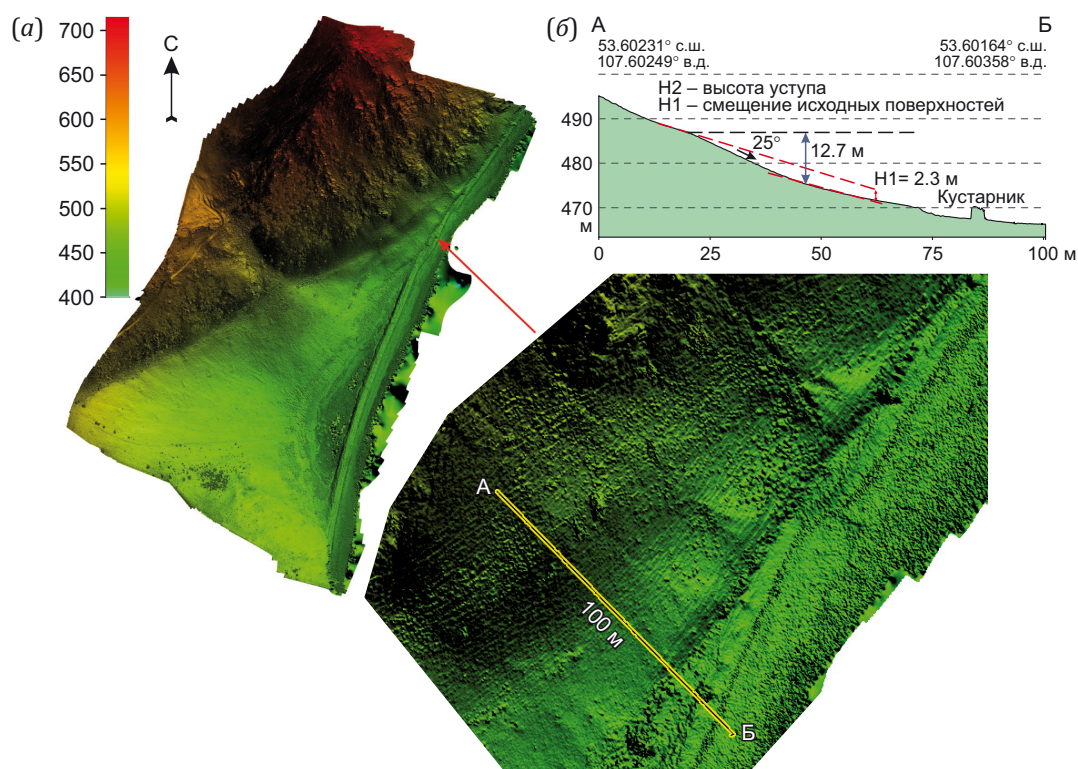


Рис. 8. ЦММ для сегмента Тудугуйского сейсмогенного разлома по данным аэрофотосъемки 11.06.2020 г. (а) и гипсометрический профиль по линии А–Б через уступ (б) (пространственное разрешение 10.3 см/пкс).

Fig. 8. DSM for the segment of the Tudugui seismogenic rupture based on the June 11, 2020 aerial photography data (а) and hypsometric profile along the A–B line across the scarp (б) (spatial resolution 10.3 cm/px.).

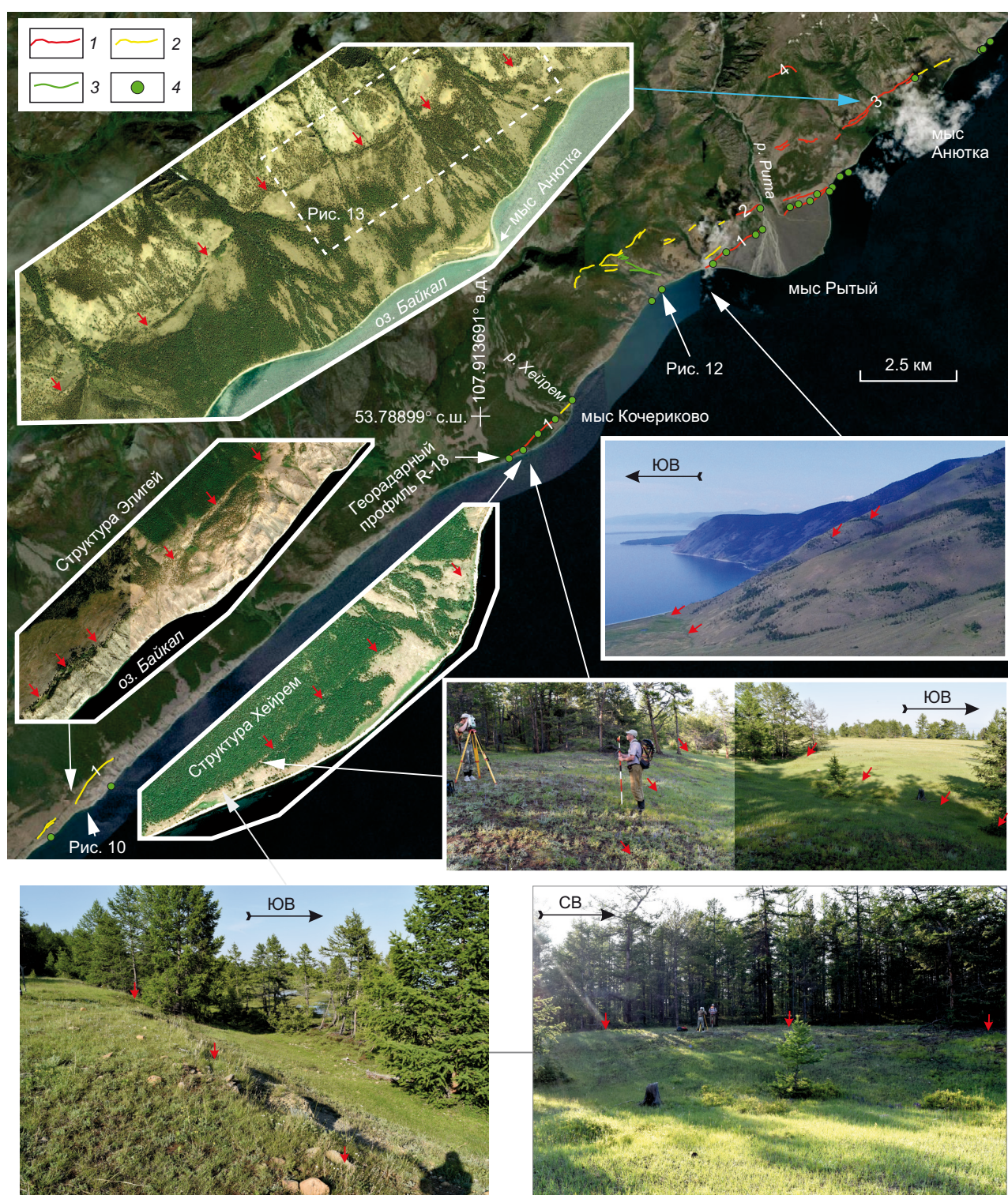


Рис. 9. Элигей-Анюткинская зона разрывов на космоснимке и фотографиях.

Арабскими цифрами обозначены ветви зоны, красными стрелками – разрывы. 1–3 – сейсмогенные разрывы: 1 – первичные достоверные, 2 – первичные предполагаемые, 3 – вторичные достоверные; 4 – точка наземных наблюдений, в т.ч. георадарные профили.

Fig. 9. Eligei-Anyutka rupture zone on the satellite images and photographs.

Arabic numerals indicate the branches of the zone, red arrows indicate the ruptures. 1 – reliable primary, 2 – inferred primary, 3 – reliable secondary; 4 – ground observation site including GPR profiles.



Рис. 10. Фрагмент структуры Элигей на аэрофотоснимках в боковой экспозиции. Стрелками показан предполагаемый первичный разрыв в коренных породах.

Fig. 10. Aerial photographs of the Eligei structure in lateral exposure. Arrows indicate the inferred primary rupture in the bedrock.

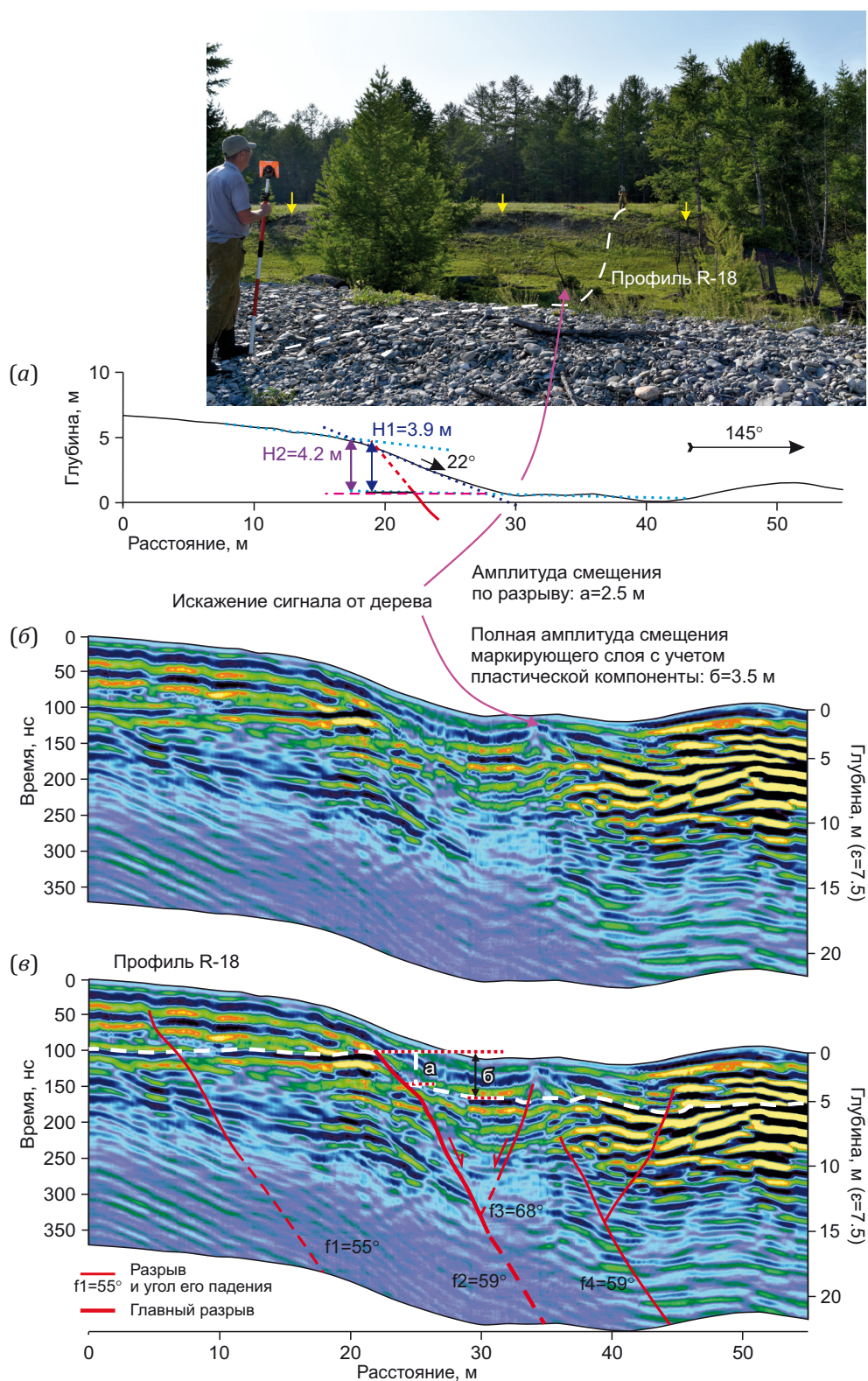


Рис. 11. Георадарный профиль R-18, выполненный с помощью антенного блока АБДЛ «Тритон» вкrest простирания главного разрыва на мысе Кочериково.

(a) – гипсометрический профиль разломного уступа и его параметры; (б) – первичная радарограмма; (в) – интерпретируемый геолого-геофизический разрез. Положение профиля см. на рис. 9.

Fig. 11. GPR profile R-18 made using the ABDL Triton antenna across the strike of the main rupture at Cape Kocherikovo.

(a) – hypsometric profile of the fault scarp and its parameters; (б) – primary radargram; (в) – geological-geophysical rupture interpretation. See Fig. 9 for the position of the profile.

представлены грабенами и субпараллельными сбросовыми уступами с уклоном до 34° (см. рис. 9; рис. 11). Через разрывы мыса Кочериково было сделано четыре георадарных профиля, один из которых (рис. 11) демонстрирует полное вертикальное смещение 3.5 м. Близкая величина получена по морфометрическим измерениям уступа – 3.9 м (рис. 11, а).

Следующий сегмент зоны появляется на мысе Рытом и в его окрестностях. Здесь установлены следы как минимум двух землетрясений с $M_w=7.3$ и 7.1 ($M_s=7.4$ и 7.3), которые произошли в интервале 12.0–5.0 и 4.0–0.3 тыс. лет назад [Lunina et al., 2023]. Максимальное одноактное смещение достигало 7.9 м. Между дельтой р. Рита и мысом Кочериково расположен крупный обвал (рис. 12), образованный в три стадии [Solonenko, 1968, с. 24–25]. Между двумя первыми предполагается значительный перерыв во времени.

Кроме описанной основной линии, в зоне выделяется Анюткинская ветвь разрывов (см. рис. 9, № 3), где на участке площадью 2.137 км² проведена беспилотная аэрофотосъемка (рис. 13). Из-за большой крутизны склонов 35° практически повсюду уступ погребен под делювиальными отложениями, и только в некоторых точках измерения на ЦММ разница между крутизной древнего тектонического склона и сейсмогенного уступа составляет несколько градусов. На одном профиле через уступ среди растительности удалось измерить максимальное смещение исходных поверхностей, равное 7.1 м, что меньше, чем на мысе Рытом.

По степени сохранности в рельефе и закономерности построению в плане структурному рисунку все разрывы Элигей-Анюткинской зоны можно отнести к разновозрастной системе. Время ее последнего обновления более позднее, чем возраст описанных выше сейсмогенных зон 1–3, а возможный сейсмический потенциал составляет $M_w=7.3$ и $M_s=7.4$. Характерно то, что структуры Элигей, Хейрем и Рита лежат практически на одной линии, совпадающей с главным сместителем Кочериковского разлома.

Шартлай-Среднекедровая зона – наиболее выраженная система нарушений, приуроченная к Северобайкальскому разлому (см. рис. 2). Наши результаты опубликованы для разрывов мыса Шартлай [Lunina et al., 2024] и района Среднекедровых мысов [Lunina et al., 2019]. Возраст сейсмогенных нарушений определен в 2.2 ± 0.6 тыс. лет [Lunina et al., 2020], протяженность всей системы дислокаций по прямой 82 км, M_w и M_s по длине структуры – 7.4 и 7.2 соответственно. Максимальное одноактное смещение 8.3 м установлено в зоне Среднекедровой сейсмодислокации [Lunina et al., 2019]. Отсюда максимальный сейсмический потенциал оценен как $M_w=7.26$ и $M_s=7.46$.

Как и в Элигей-Анюткинской зоне, на описываемом сегменте побережья оз. Байкал фиксируются следы не менее двух сейсмических событий. Это было установлено в конусе выноса р. Шартлай [Lunina et al., 2024], а также интерпретируется из данных георадиолокации на мысе Тытери (рис. 14), расположенном в

6.6 км севернее. При этом сейсмогенный уступ высотой 14.8 м и крутизной 33° в месте проходки профиля не имеет перегибов, что предполагает интервал повторяемости землетрясений не более первых тысяч лет [McCalpin, 2009]. Полное многоактное смещение исходных геоморфологических поверхностей здесь не менее 10 м. В разрезе интерпретируется две сбросовых подвижки – 1.3 м и 2.9 м, что предполагает большее количество событий на разломе, следы которых скрыты на большей глубине, чем позволяет зондировать георадар.

Черемшано-Болсодейская зона протягивается от мыса Елохин (см. рис. 2), у которого в правом борту долины реки наблюдался обвал (рис. 15), до Губы Болсодей и далее пересекает р. Татарниково Русло, не доходя до следующего ручья. Ее общая протяженность вдоль Северобайкальского разлома 56 км. Нельзя исключать, что разрывы этой и предыдущей зоны возникли одновременно. Их генеральное простираие почти идентично (см. рис. 5, д, е). Разделение основано на слабом изменении направлений граничащих нарушений и затухании сейсмогенных деформаций на границе двух зон.

Между мысами Хибелен и Болсодей система сбросов наиболее проявлена (рис. 16). Практически непрерывно она проходит вдоль подножия Байкальского хребта по тыловым швам предгорных косых равнин, сложенных аллювиально-пролювиальными отложениями. У подножия гор, в районе мыса Большая Коса, линия разрыва представлена зоной эшелонированных трещин, косо ориентированных к общему простираию разлома и характерных для правого сдвига. На местности сейсмогенные рвы характеризуются значительной глубиной и шириной от первых до первого десятка метров, что свидетельствует также о горизонтальном растяжении при образовании палеосейсмодислокаций. Это было отмечено и В.П. Солоненко с коллегами [Solonenko, 1968].

Черемшано-Болсодейская зона разрывов была нами детально изучена морфоструктурными и георадиолокационными методами. Максимальное многоактное вертикальное смещение по гипсометрическому профилю – 17 м – было установлено между мысами Хибелен и Малая Коса в точке с координатами 54.682504° с.ш. и 108.786689° в.д. (рис. 2, проф. 3 в работе [Denisenko, Lunina, 2023]). Между мысами Малая и Большая Коса амплитуда вертикального смещения по георадарным данным определена как 4.3 м при высоте уступа 4.5 м. Вскрытие его канавой позволило установить общее смещение 4.4 м, представляющее собой сумму амплитуд, связанных с двумя палеоземлетрясениями, 1.45 и 2.95 м. В результате сделан вывод, что за последние 10 тыс. лет в зоне Черемшано-Болсодейского участка Северобайкальского разлома произошло не менее двух сейсмических событий с магнитудой $M_s \geq 6.8$ и $M_s \geq 7.1$. При этом M_w более сильного по смещению должна была быть ≥ 6.94 , а при длине зоны 56 км – 7.17; M_s при той же длине 7.08.



Рис. 12. Многостадийный обвал, известный как структура «Южная Рита», между дельтой р. Рита и мысом Кочериково.

Fig. 12. A multi-stage landslide known as the "South Rita" structure between the Rita River delta and Cape Kocherikovo.

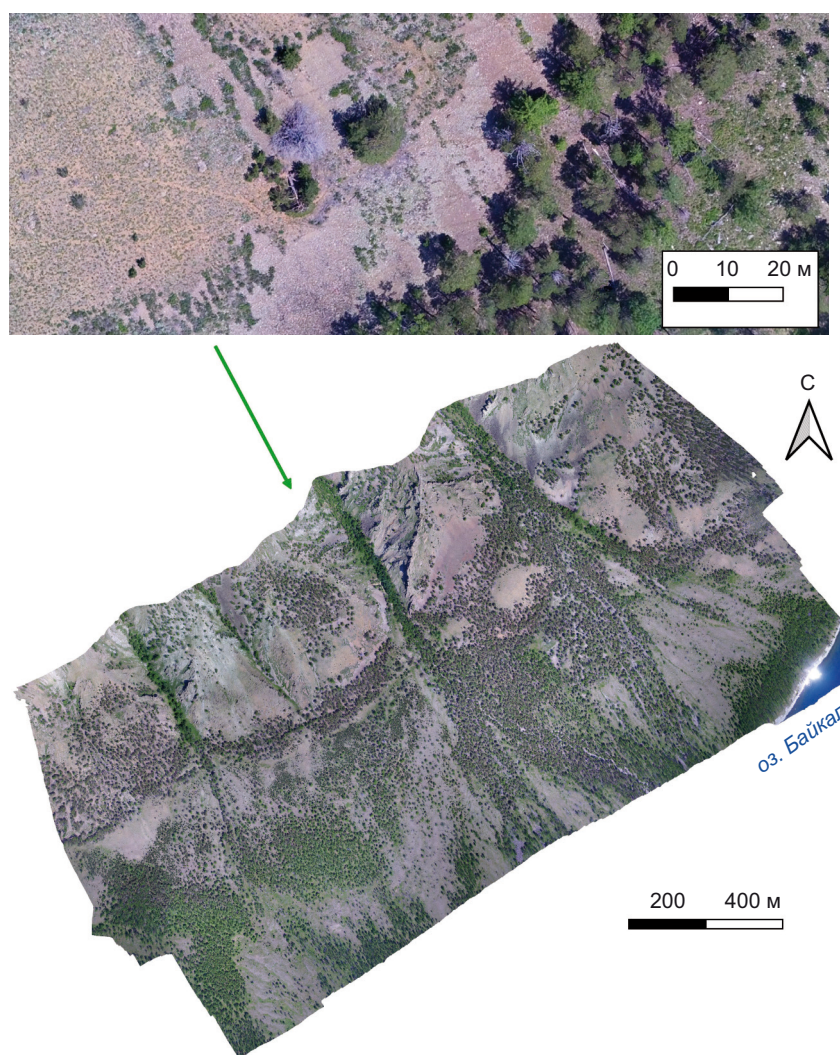


Рис. 13. Ортофотоплан на участок Анюткинской ветви разрывов Элигей-Анюткинской сейсмогенной зоны по данным аэрофотосъемки 02.07.2019 г. (пространственное разрешение 10.1 см/пкс).

Fig. 13. Orthophotoplan of the section of the Anyutka branch of the Eligei-Anyutka seismogenic zone based on the July 2, 2019 aerial photography data (spatial resolution 10.1 cm/px).

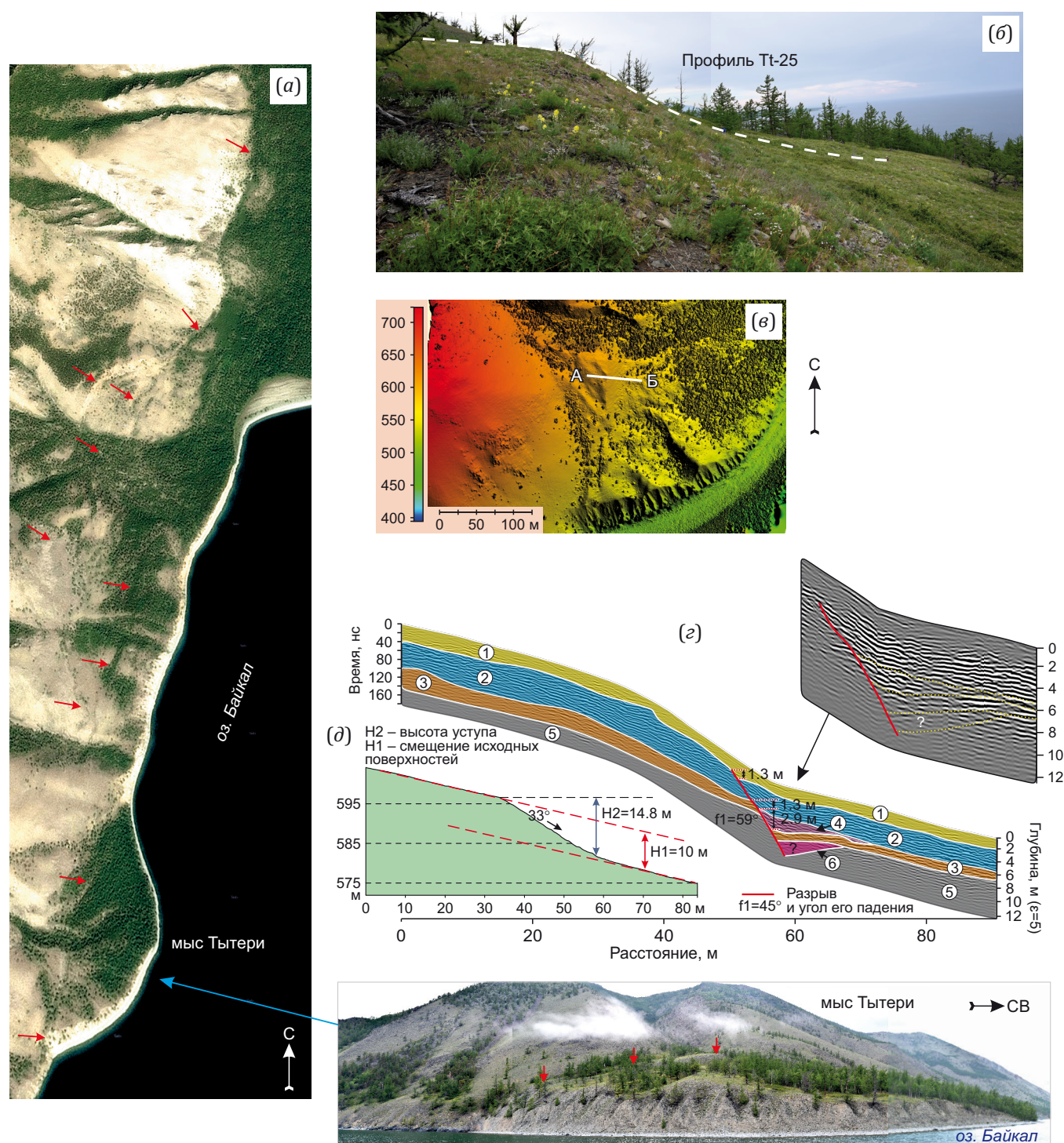


Рис. 14. Разрывы в Шартлай-Среднекедровой зоне на участке мыса Тытери и в окрестностях севернее.

(a) – спутниковый снимок, где поверхностные нарушения показаны красными стрелками; (б) – сейсмогенный уступ; (в) – положение георадарного профиля А-Б на ЦММ; (г) – интерпретированная радарграмма по профилю А-Б; (д) – гипсометрический профиль в т.н. с координатами 53.99481° с.ш. и 108.20650° в.д. Номера в кружках на фрагменте (г) обозначают георадарные комплексы.

Fig. 14. Ruptures in the Shartlai-Srednekedrovaya zone in the area of Cape Tyteri and in the surroundings to the north of it
(a) – satellite image where surface faults are shown by red arrows; (б) – seismogenic scarp; (в) – position of GPR profile A-B on the DSM; (г) – interpreted radargram along A-B profile; (д) – hypsometric profile at the observation site so-called with coordinates 53.99481° N and 108.20650° E. The numbers in circles in fragment (г) indicate GPR facies.



Рис. 15. Обвал в правом борту долины р. Елохин у одноименного мыса.

Fig. 15. A landslide on the right side of the Elokhin River valley near the cape of the same name.

Котельниковская и Наледная зоны (рис. 17, 18) приурочены к субмеридиональным разломам вдоль восточного склона Байкальского хребта – Болсодей-Рельскому (Рель-Тыйскому) и безымянному. Их объединение в одну зону сейсмогенных разрывов затруднительно из-за значительного расстояния между сейсмогенными структурами (47.6 км). Обе палеосейсмодислокации описаны А.В. Чипизубовым (см. рис. 7, 9 в работе [Solonenko, 1985]).

При наземных исследованиях с акватории оз. Байкал мы имели возможность наблюдать сейсмогенные деформации только Котельниковской зоны (см. рис. 17). Хотя качество доступных в онлайн-сервисах космоснимков позволяет дешифрировать одну линию разрывов из двух кривых 2.9 и 3.2 км (общая протяженность 6.3 км с учетом расстояния между ними), на фото можно видеть, что Котельниковская структура представлена как минимум двумя субпараллельными нарушениями.

А.В. Чипизубов дешифрировал системы палеосейсмодислокаций протяженностью 11 и 3 км, возрастом старше первых тысяч лет и первые сотни лет. Максимальное вертикальное смещение 1.5 м им было зафиксировано по более молодой системе разрывов, что предполагает $M_w=6.74$ и $M_s=6.87$. По Наледной зоне разрывов общей протяженностью 5.5 км предшественниками фиксировались смещения до 2.5 м, что предполагает $M_w=6.89$ и $M_s=7.04$.

Рель-Слюдянская и Кичерская зоны протяженностью соответственно ~1.9 и ~1.4 км расположены в зонах Рель-Слюдянского и Кичерского разломов (рис. 19). Установление их сейсмогенного генезиса наиболее проблематично, так как предполагаемые сейсмогенные разрывы являются, по сути, тыловыми швами формирующихся оползневых тел. Фактически небольшие оползневые деформации отмечаются повсеместно вдоль автомобильной трассы 81К-041 между городами Северобайкальском и Нижнеангарском, и предполагаемая зона сейсмогенных разрывов на этом отрезке может быть значительно длиннее, если допустить, что современные экзогенные процессы маркируют здесь сейсмогенные трещины. На актуализированной схеме мы оставили один фрагмент прибрежного участка сейсмогенного вскрытия вдоль Кичерского разлома, показанный ранее в работе [Smekalin et al., 2007]. В действительности разрешить проблему «разрыв или оползень» могут помочь геофизические исследования с глубиной в первые десятки и сотни метров.

Основной сейсмогенный разлом Кичерской зоны длиной более 26 км трассируется вдоль северо-западного борта одноименной суходольной впадины. Это дает основание использовать максимальную, зафиксированную предшественниками, одноактную амплитуду вертикального смещения сбросового типа 6 м для оценки магнитуды Кичерской зоны, уходящей за рамки исследуемой площади: $M_w=7.16$ и $M_s=7.34$.

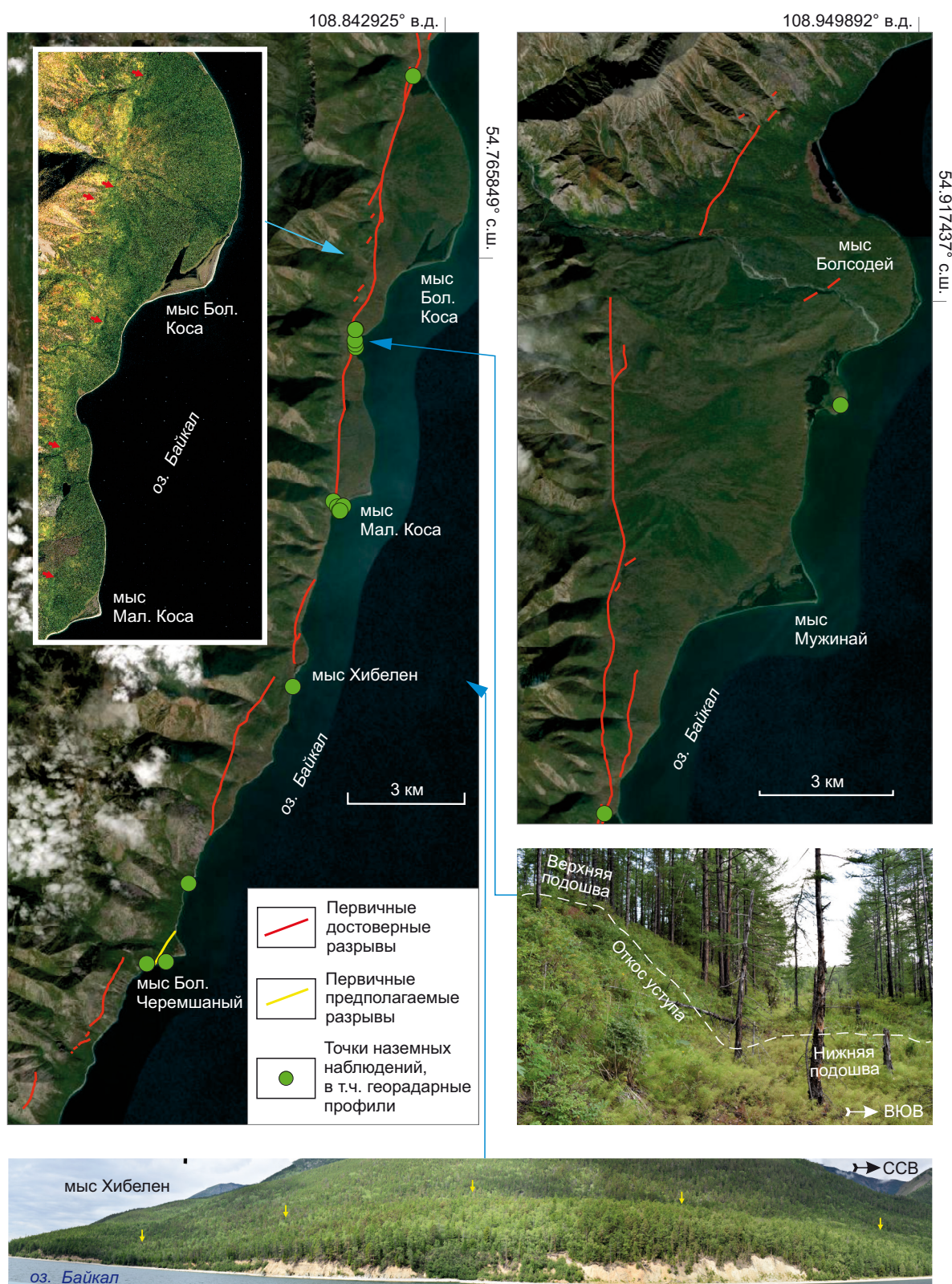


Рис. 16. Фрагменты Черемшано-Болсodeйской зоны разрывов на космоснимках и фотографиях. Красными линиями и стрелками показаны разрывы.

Fig. 16. Fragments of the Cheremshany-Bolsodei rupture zone on satellite images and photographs. Red lines and arrows show the ruptures.

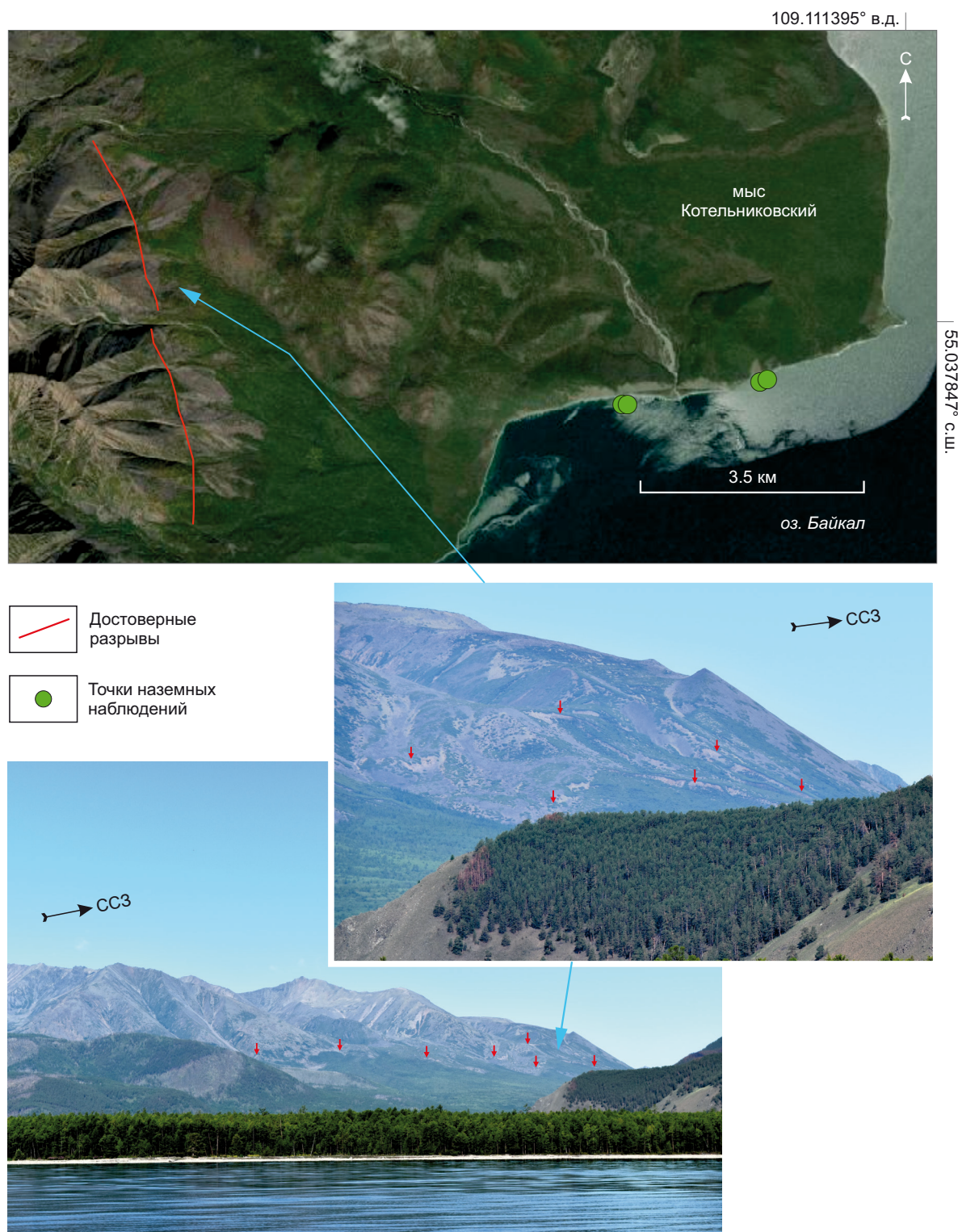


Рис. 17. Котельниковская зона разрывов (красные линии и стрелки) на космоснимке и фотографиях.

Fig. 17. Kotel'nikovskiy rupture zone (red lines and arrows) on the satellite image and photographs.

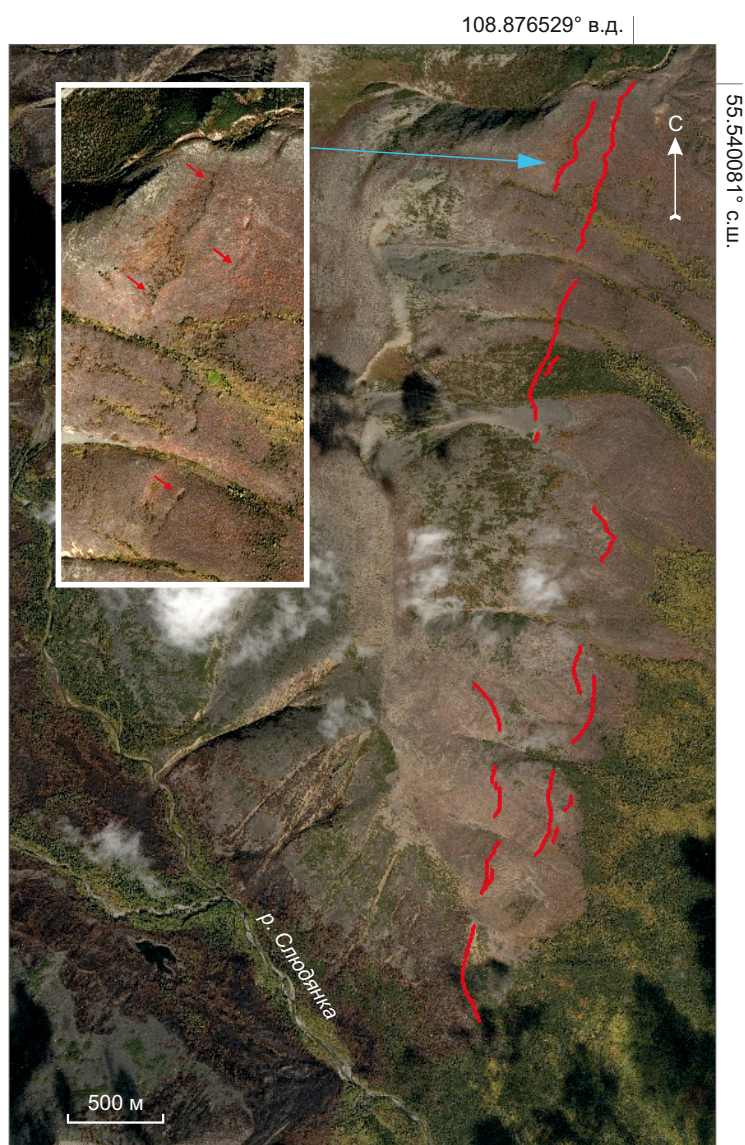


Рис. 18. Наледная зона разрывов (красные линии и стрелки) на космоснимке.

Fig. 18. Naled ice rupture zone (red lines and arrows) on the satellite image.

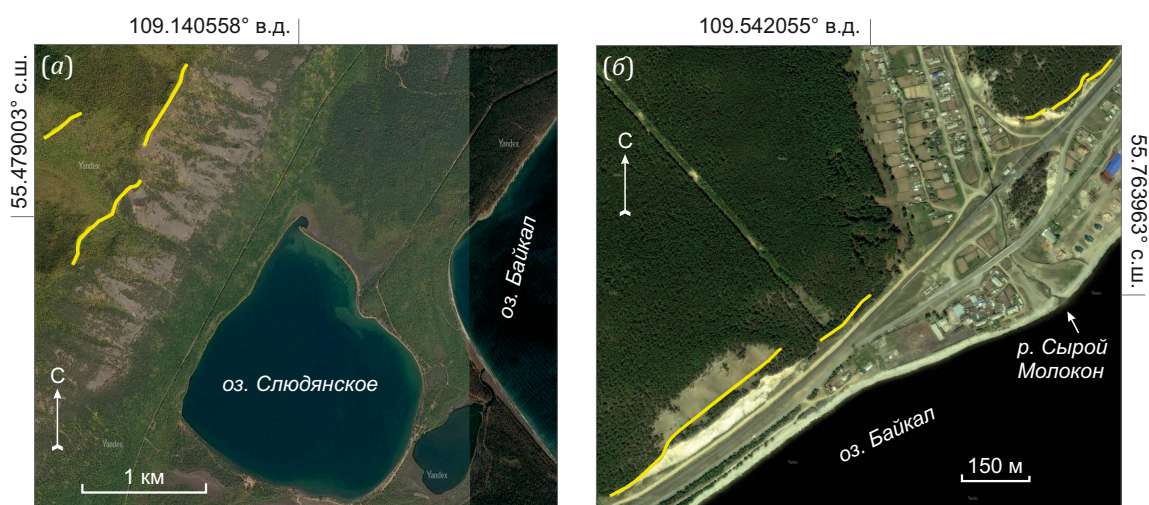


Рис. 19. Рель-Слюдянская (а) и Кичерская (фрагмент, б)) зоны разрывов на космоснимках.

Fig. 19. Rel-Slyudyanka (a) and Kichera (fragment, б)) rupture zones on satellite images.

4.2. Сейсмогенные разрывы побережий Южно-Байкальской впадины и хребта Хамар-Дабан

Южно-Байкальская депрессия в настоящее время более сейсмически активна по сравнению с Северо-Байкальской (см. рис. 1), хотя палеосейсмогенные разрывы на прибрежных и сопредельных территориях в хребтах здесь малоизвестны или их происхождение неоднозначно. Обзор работ [Khromovskikh, 1965; Arzhannikova, Arzhannikov 2019; Lunina, Denisenko, 2020; Solonenko, 1968], а также дешифрирование спутниковых снимков позволили откартировать первичные и вторичные разрывы, которые (по крайней мере, часть из них) не должны игнорироваться при оценке сейсмической опасности (см. рис. 3).

Красноярская зона впервые описана В.П. Солоненко с коллегами [Solonenko, 1968, с. 11, рис. 3], но не вошла в каталог палеосейсмодислокаций Прибайкалья [Smekalin et al., 2010]. В связи с этим нами проведены дополнительные исследования и установлено, что наблюдаемые на юго-восточном склоне Примор-

ского хребта разрывы имеют сейсмогенную природу (рис. 20, 21). Первый из них, расположенный гипсометрически выше между мысами Черный и Красный Яр, отнесен к сбросам, рассекающим коренные граниты и делювиальные отложения. Его длина составляет 4.1 км. Стенки срыва в выходах гранитов имеют высоту до 20 м. Основная плоскость нарушения падает на $147^\circ \angle 75^\circ$. В ее висячем крыле наблюдается зона грубого дробления мощностью около 4 м, в лежащем – зона трещиноватости мощностью около 1 м.

Ниже по склону параллельно картируется еще два разрыва протяженностью 593 м и 573 м. Ближайший к основному нарушению представлен рвом, напоминающим линейную провальную структуру в курумнике, где глыбы достигают 5–6 м в длину (рис. 21). Ширина рва – 11–15 м, глубина – до 3.2 м. На материалах сверхвысокоточной аэрофотосъемки, фото- и сферической 360° панораме (<http://activetectonics.ru/Panoramas/krasnoyarskaya/index.html>) отчетливо видны описанные нарушения. Углы падения склонов Приморского

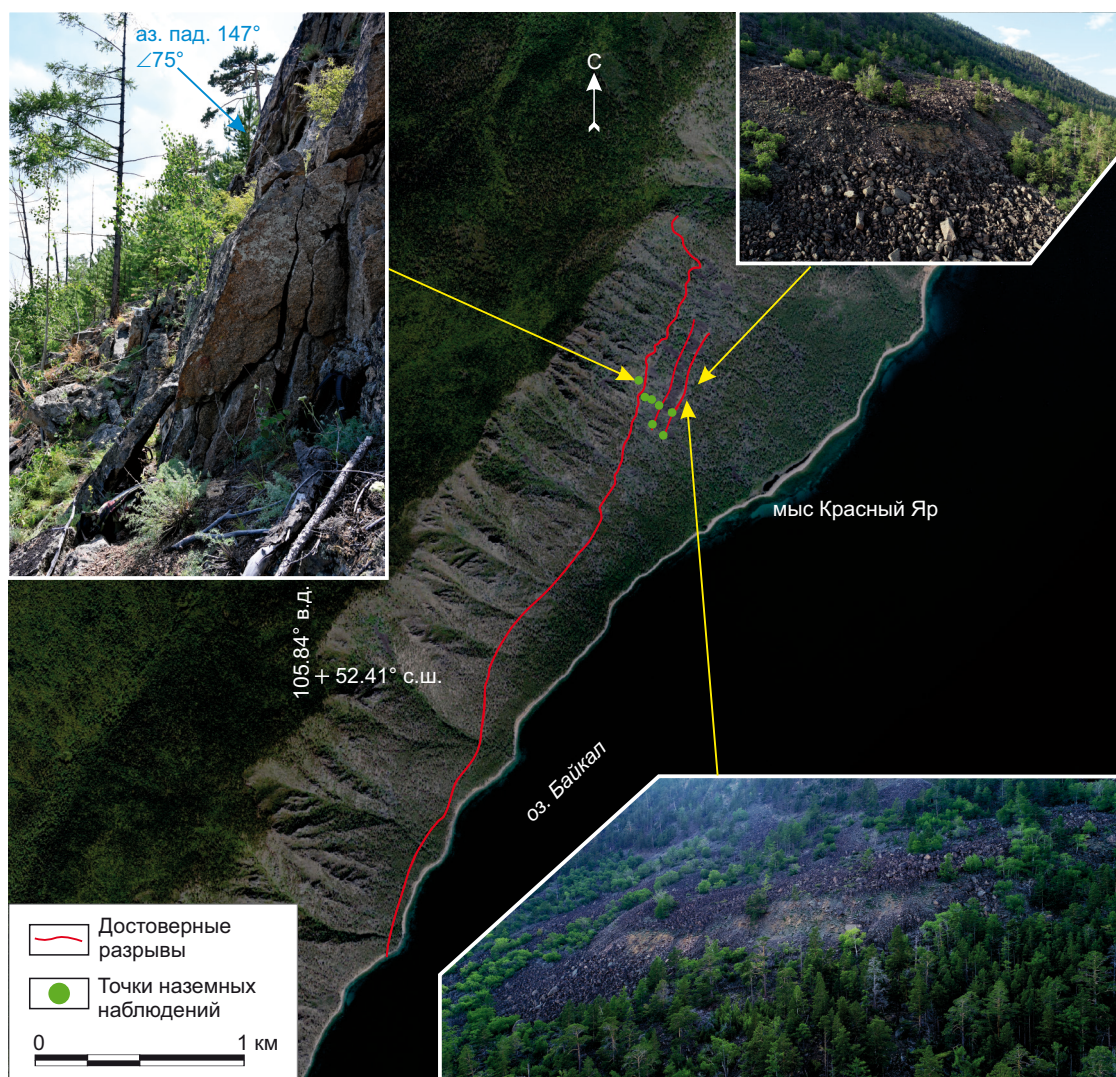


Рис. 20. Красноярская зона разрывов на космоснимке и фотографиях.

Fig. 20. Krasnoyarsk rupture zone on the satellite image and photographs.

хребта в районе Красноярской сейсмодислокации довольно крутые ($30\text{--}50^\circ$), в связи с чем происходит быстрая денудация сейсмогенного уступа и его захоронение склоновыми отложениями. В некоторых местах продукты их разрушения почти полностью перекрывают следы сейсмогенных подвижек. Магнитуда землетрясения, ассоциированного с формированием зоны разрывов, определена по длине: $M_w \geq 5.67$, $M_s \geq 6.25$, но очевидно, эта оценка существенно ниже реальной. На юго-западе главный сейсмогенный разрыв уходит в акваторию оз. Байкал; не исключено его продолжение и на северо-восток.

Таловская зона расположена в зоне динамического влияния Приморского разлома, где пересекает правый приток р. Таловка – р. Бэрхэ-Шэбэр (см. рис. 3). Морфологически она представлена грабеном северо-восточного простирания, обнаруженным А.В. и С.Г. Аржанниковыми [Arzhannikova, Arzhannikov, 2019] при морфометрических исследованиях рельефа. Видимая длина главного разрыва – 3.6 км, высота уступа с северо-западного борта – 2.4–4.5 м, с юго-восточного – 1.2–2.2 м. Авторы цитируемой работы сделали выводы,

что на описываемом сегменте Приморского разлома за последние 1400 лет было как минимум два разрывообразующих землетрясения с $M_w = 6.6$. При этом средняя подвижка составила 0.6 м за одно сейсмическое событие.

Дельтовая зона сейсмогенных разрывов образована при катастрофическом Цаганском землетрясении 12.01.1862 г., во время которого произошло опускание Цаганской степи и краевого участка дельты р. Селенги общей площадью около 230 км^2 [Vietinghoff, 1865; Shchetnikov et al., 2012]. Зона представляет собой систему первичных нарушений СВ–ЮЗ простирания, прослеживающуюся от с. Кудара до мыса Облом на протяжении $\sim 30 \text{ км}$. На поверхности разрывы сильно эродированы и представлены, как правило, одним уступом вдоль песчаного увала, на котором располагаются села.

Материалы по изучению зоны деформаций широко представлены в публикациях [Lunina, Denisenko, 2020; и др., см. в указанной публикации]. По данным георадиолокации с привлечением геологических материалов по канавам и скважинам установлено, что смещение

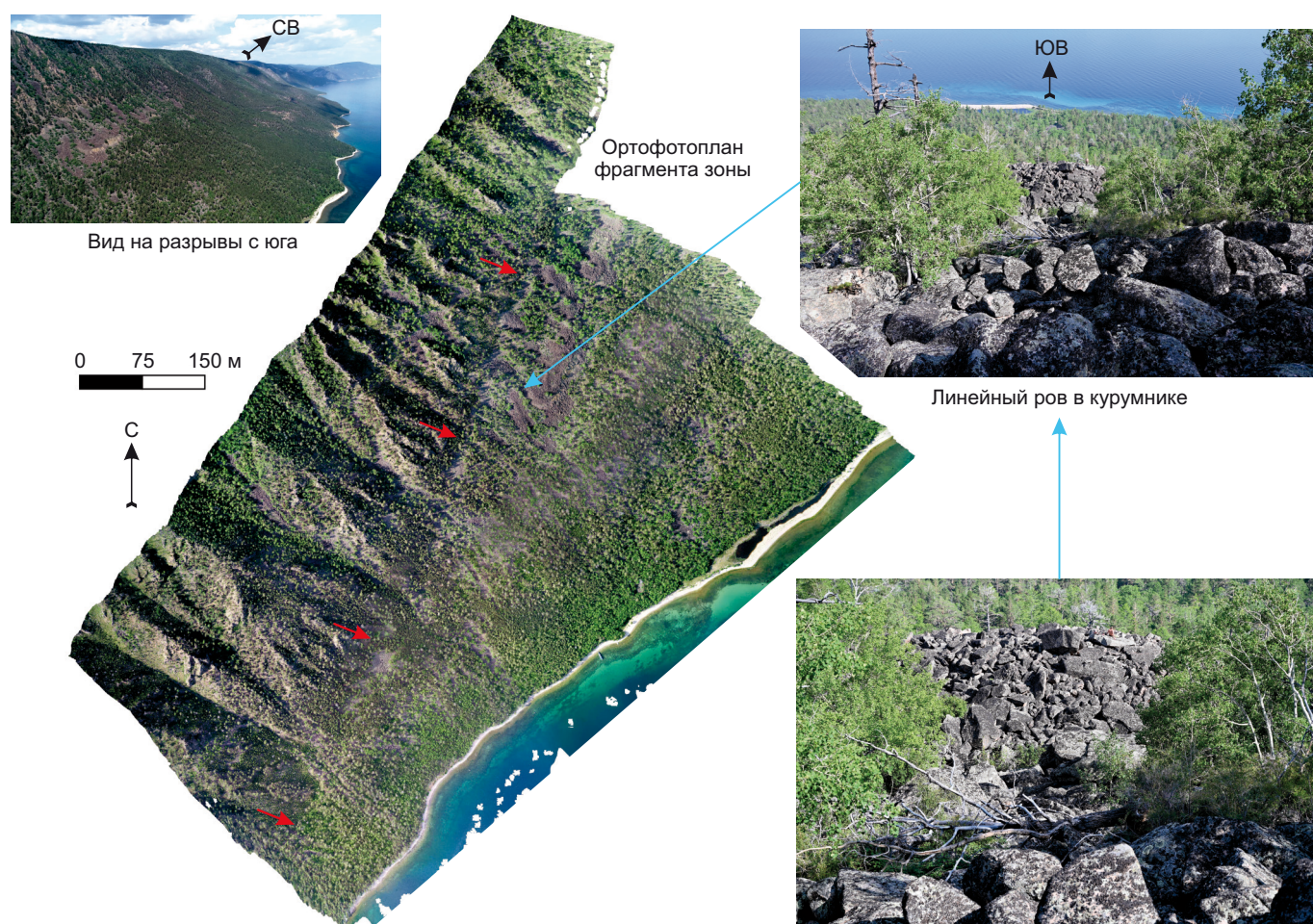


Рис. 21. Ортофотоплан фрагмента Красноярской зоны разрывов по данным аэрофотосъемки 30.06.2020 г. (пространственное разрешение 8.33 см/пкс) и фотографии разрывов на местности.

Fig. 21. Orthophotoplan of a fragment of the Krasnoyarsk rupture zone based on the June 30, 2020 aerial photography data (spatial resolution 8.33 cm/px) and photographs of the ruptures.

при Цаганском землетрясении реализовалось в условиях СЗ–ЮВ растяжения путем формирования ступенчатой системы сбросов с падением главного сместителя на СЗ под углами $56\text{--}76^\circ$. Полные вертикальные амплитуды, включающие хрупкую и пластическую компоненты смещения, по данным георадиолокации составили 3.83, 9.59, 2.40, 4.27, 9.28, 6.60 и 1.81 м. Оценка магнитуд проведена по максимальной подвижке и составила $M_w=7.31$, $M_s\geq 7.51$, что согласуется с предыдущими представлениями.

Солбакская зона объединяет два разрыва, расположенных в 16.8 и 22.1 км на юг-юго-запад от оз. Байкал (см. рис. 3; рис. 22). Один из них, длиной 565 м на возвышенности между р. Подкамарная и левыми притоками р. Слюдянки, отнесен к сейсмогравитационным, так как имеет дугообразную форму и небольшую протяженность.

Южнее, в районе верховьев рек Корнилова, Голая и Спускосая (притоки р. Утулик), находится вторая структура, отнесенная, благодаря своей прямолинейности, к группе предполагаемых первичных сейсмогенных разрывов (рис. 22). Нарушение линейно вытянуто в восток-северо-восточном направлении и имеет

длину 7.8 км. На спутниковых снимках хорошо видны деформации водоразделов и распадков, которые пересекает молодой дизъюнктив. Эта и остальные описанные ниже зоны требуют наземного обследования, а также цифровой аэрофотосъемки. Минимальная магнитуда землетрясения может быть оценена по длине разрыва: $M_w=6.04$, $M_s\geq 6.45$.

Бабхинская зона расположена слева и справа от р. Бабха (рис. 23) в пределах 2.5 км от Верхнебабхинского разлома. По спутниковым снимкам в гольцовой части водоразделов откартирована серия рвов, рассекающих докембрийские граниты и гранат-биотитовые гнейсы. Участок можно условно разделить на две подзоны – западную и восточную, расположенные в ~ 3 км друг от друга. Западная подзона представлена серией нарушений север-северо-восточного простирания по направлению хребта. Общая длина этой подзоны составляет 1715 м, максимальная ширина – 355 м.

Восточная подзона была выявлена В.С. Хромовских и подробно описана в работе [Solonenko, 1968, с. 52–54] как часть структуры Бабхи. Она представлена серией сбросовых и сбросо-сдвиговых рвов в коренных породах, на стенках которых предшественниками

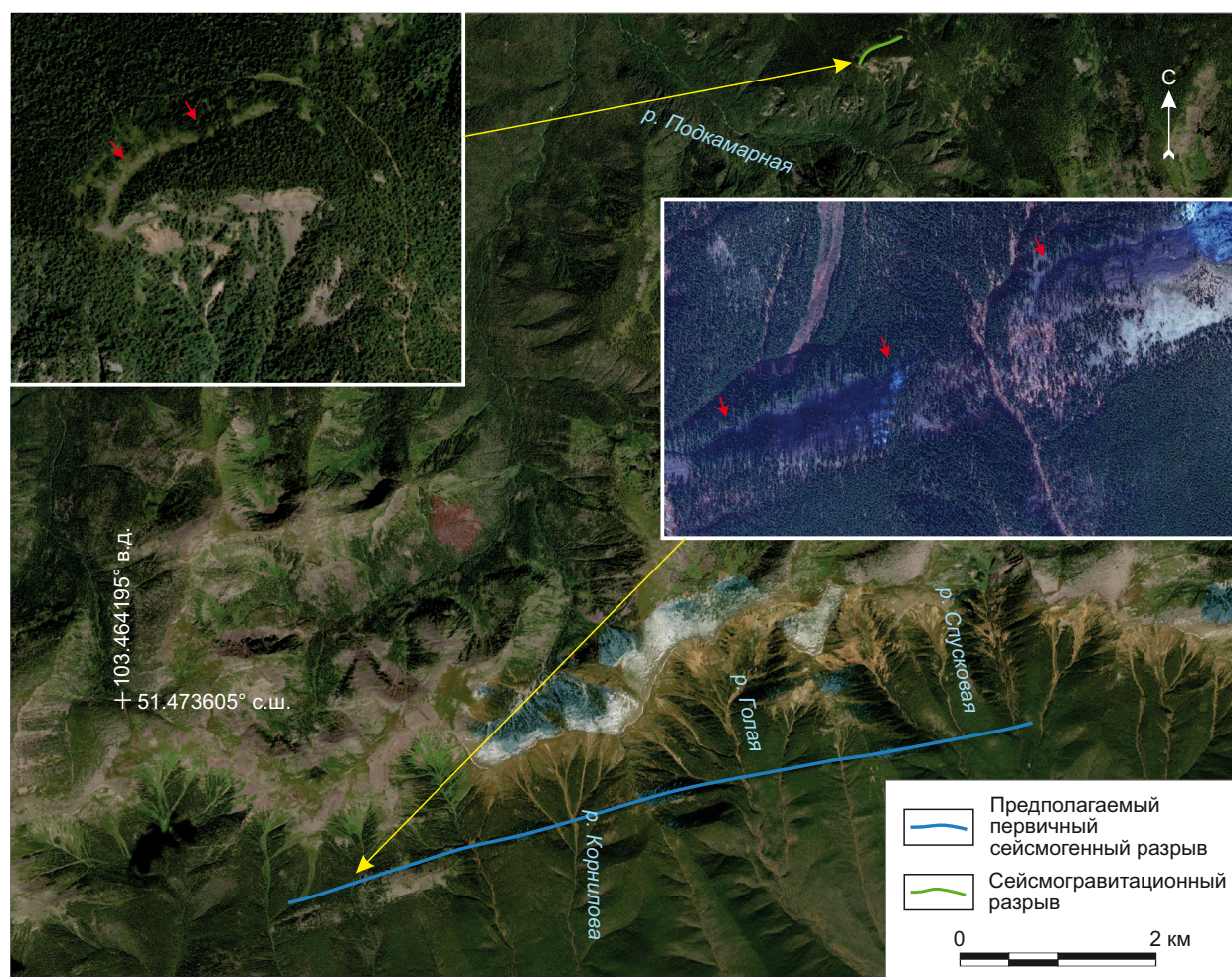


Рис. 22. Солбакская зона разрывов на космоснимке.

Fig. 22. Solbak zone of ruptures on the satellite image.

наблюдались зеркала скольжения, чередующиеся с поверхностями отрыва. Общая протяженность восточной подзоны разрывов, видимых на космоснимках, составляет около 1800 м, ширина – 400 м. По данным [Solonenko, 1968] ширина рвов колеблется от 6 до 20 м, глубина – до 9 м, вертикальная амплитуда смещения – до 9 м. В монографии описано гораздо больше нарушений рельефа на протяжении 15 км, которые были ассоциированы со структурой «Бабха», но на доступных спутниковых материалах они не обнаружены.

Зона Голая картируется на водоразделах в бассейне р. Голый в 16.5 км от береговой линии оз. Байкал на продолжении широтного сейсмоактивного Хамар-Дабанского разлома, в 13–15 км от его восточного окончания. Разрывы субширотного и северо-восточного простирания (см. рис. 5, р) группируются в пять подзон (рис. 24), в пределах которых сбросовые уступы и рвы сближены в пространстве. В южной подзоне разрывы рассекают один из водоразделов и далее уходят в долину притока. Ширина зоны составляет ~500 м, длина ~760 м. В западной подзоне на водораздельной седловине картируется один северо-восточный разрыв длиной 694 м. В восточной подзоне шириной ~550 м серия рвов северо-восточного простирания сечет хребет слева от р. Голый на протяжении 1.3 км. В северной подзоне основной разрыв имеет протяженность 452 м. В центральной подзоне уступы и рвы нарушают склоны хребта на левобережье р. Голый на протяжении 865 м. Общая протяженность зоны в северо-восточном направлении 5.8 км.

Зона Снежная, расположенная на водоразделе одноименной реки при впадении в нее р. Селенгинка, в деталях была описана в работе [Solonenko, 1968, с. 47–50]. Значительно западнее при дешифрировании спутниковых снимков нами обнаружены новые нарушения, которые по простиранию ложатся в одну линию с описанной ранее запад-северо-западной структурой Снежной и поэтому были ассоциированы с ней (рис. 25). Протяженность всей зоны в итоге составила 16.6 км. Как и во всех предыдущих зонах, разрывы здесь рассеяны по площади (см. рис. 3; рис. 25). В центре наблюдается опускание приповерхностной части водораздела вниз по обе стороны локального хребта в полосе шириной 400 м. Простирание сбросовых разрывов субширотное и запад-северо-западное. Длина разрывных нарушений варьируется от 136 до 750 м. Максимальная амплитуда вертикального перемещения согласно данным [Solonenko, 1968] измеряется от первых до десятков метров.

В северо-восточной части исследуемой зоны по спутниковым снимкам картируется серия сбросовых уступов преимущественно субширотного простирания. Максимальная ширина зоны разрывов 446 м, общая длина – 520 м. Максимальная амплитуда вертикальных смещений крыльев разрывов составляет от 4 до 16 м [Solonenko, 1968].

Юго-восточная часть зоны палеосейсмодислокации Снежной представлена сбросовыми структурами, преимущественно обвальными. Один из обвалов перегородил русло р. Селенгинка, в результате чего образовалось

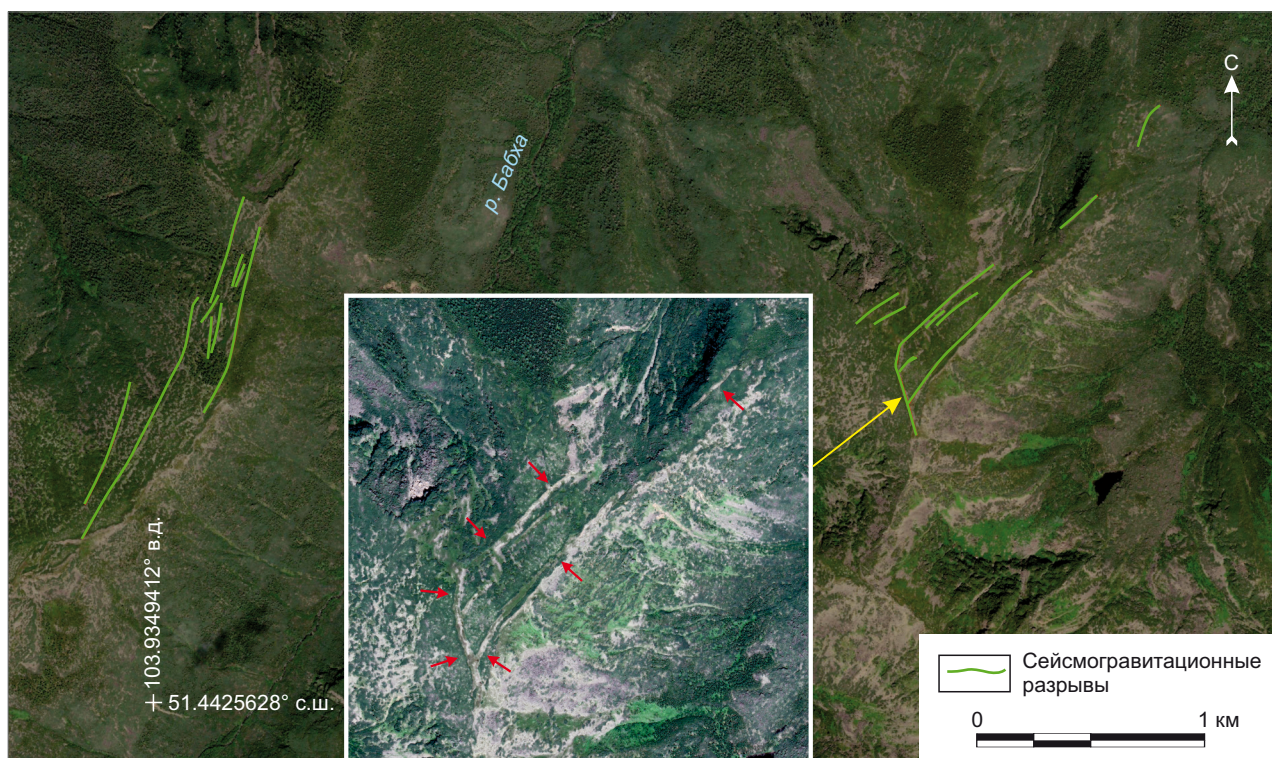


Рис. 23. Бабхинская зона разрывов на космоснимке.

Fig. 23. Babkha zone of ruptures on the satellite image.

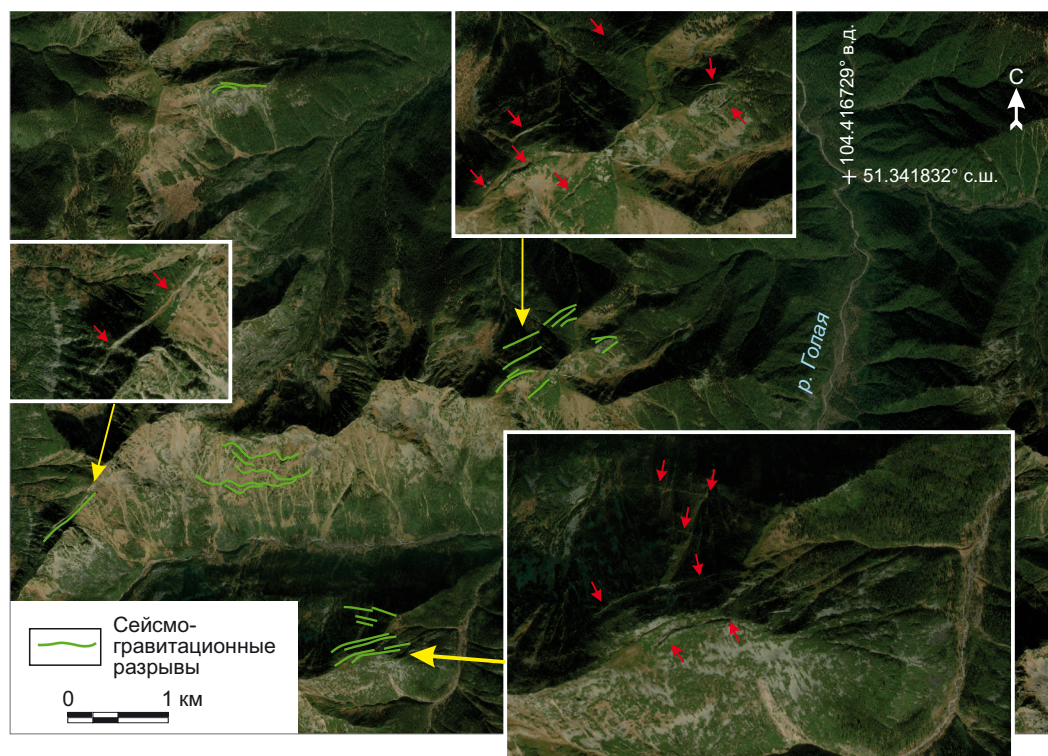


Рис. 24. Зона разрывов Голая на космоснимке.

Fig. 24. Golaya zone of ruptures on the satellite image.

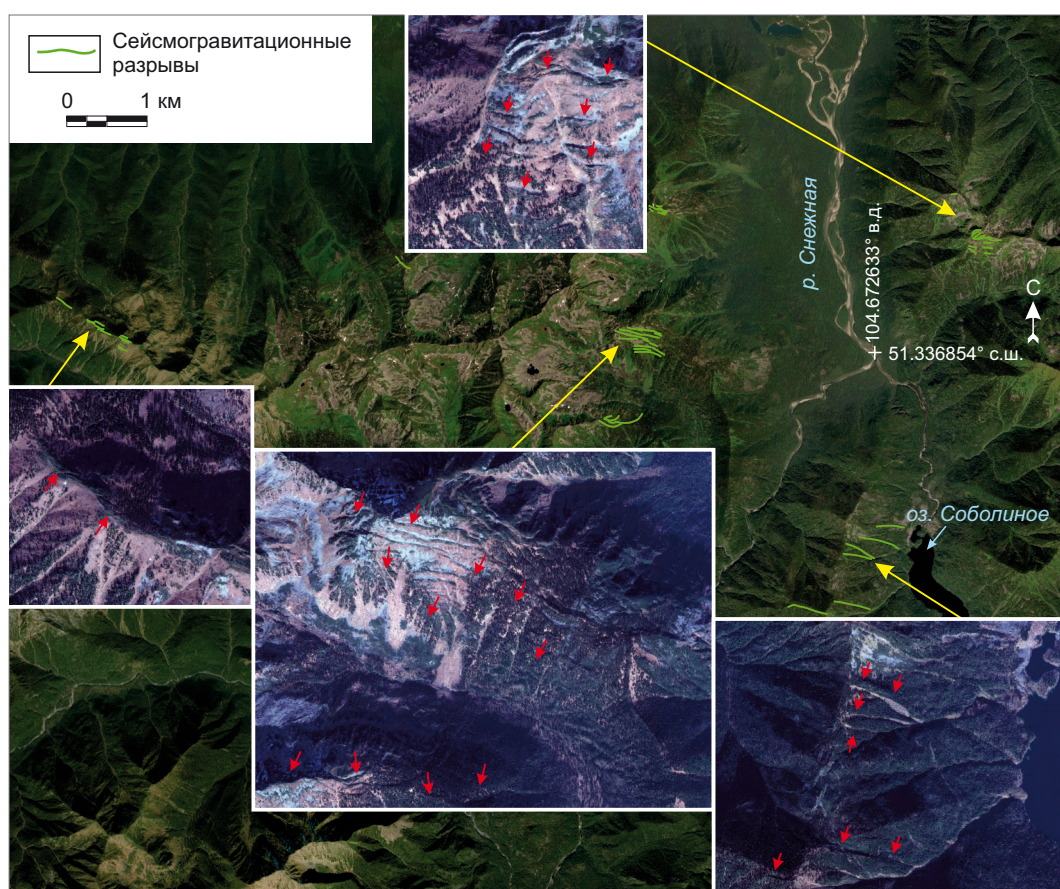


Рис. 25. Зона разрывов Снежная на космоснимке.

Fig. 25. Snezhnaya zone of ruptures on the satellite image.

оз. Соболиное. Общая длина дислокаций в северо-западном направлении 16.6 км.

Осиновская зона 1 сейсмогравитационных разрывов находится в ~10 км к югу от оз. Байкал, в горах между долинами рек Осиновка (1) и Бол. Мамай (см. рис. 3; рис. 26). Почти все нарушения линейно вытянуты преимущественно в северо-западном направлении (см. рис. 5, т) на участке 2.6×2.8 км. Протяженность нарушений варьируется от 70 до 550 м.

Осиновская зона 2, описанная в работе [Solonenko, 1968] как Осиновско-Кедровая, находится восточнее Осиновской зоны 1, в 14 км от побережья оз. Байкал, в горах между реками Выдриная и Осиновка (2) (см. рис. 3; рис. 27). Зона условно разделена на две подзоны: западную и восточную. В первой разрывы северо-восточного простирания, выстроенные кулисообразно на протяжении ~3 км, рассекают водораздел слева от реки. Длина отдельных нарушений составляет от 146 до 490 м.

Во второй подзоне разрывы, разрезающие хребет, имеют субширотное и северо-западное простирание. Из-за небольшой протяженности нарушений и особенностей их распространения все они, как и в других зонах (кроме главного Солбакского разрыва), отнесены к сейсмогравитационным. Общая длина системы разрывов в преобладающем направлении 5.5 км, хотя через 8.7 км на северо-восток, на водоразделе р. Осиновка (3) и ее левого притока, картируются новые по-

верхностные разрывы (см. <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html>).

Танхойская зона расположена на водораздельных хребтах в бассейне р. Переемной и на сопредельных территориях, в 9.3–17 км от берега оз. Байкал и в 1.2–2.1 км от Осино-Рассохинского разлома (см. разлом и разрывы на сайте <http://activetectonics.ru/ActTecServ.html>; см. рис. 3; рис. 28). Наибольшее сгущение разрывов наблюдается в вершинной части водораздела между реками Рассохой и Переемной, где они линейно вытянуты на протяжении ~4 км в северо-восточном направлении. Эта часть структуры хорошо изучена В.С. Хромовских [Khromovskikh, 1965; Solonenko, 1968]. Трещины и сбросовые рвы рассекают протерозойские биотитовые граниты с амплитудой смещения 1.5–12.0 м. На некотором удалении на северо-восток нами откартированы подобные нарушения рельефа, что в совокупности с Танхойской палеосейсмодислокацией представляет собой зону протяженностью 15.2 км. Ряд разрывов находятся в 9.2 км от нее на северо-запад (рис. 28).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые за многие годы проведена ревизия всех известных и доступных материалов по сейсмогенным разрывам Байкальского рифта. Масштабные сейсмогеологические исследования 60–80-х годов прошлого века, продолженные в 2000-х годах, дополнены

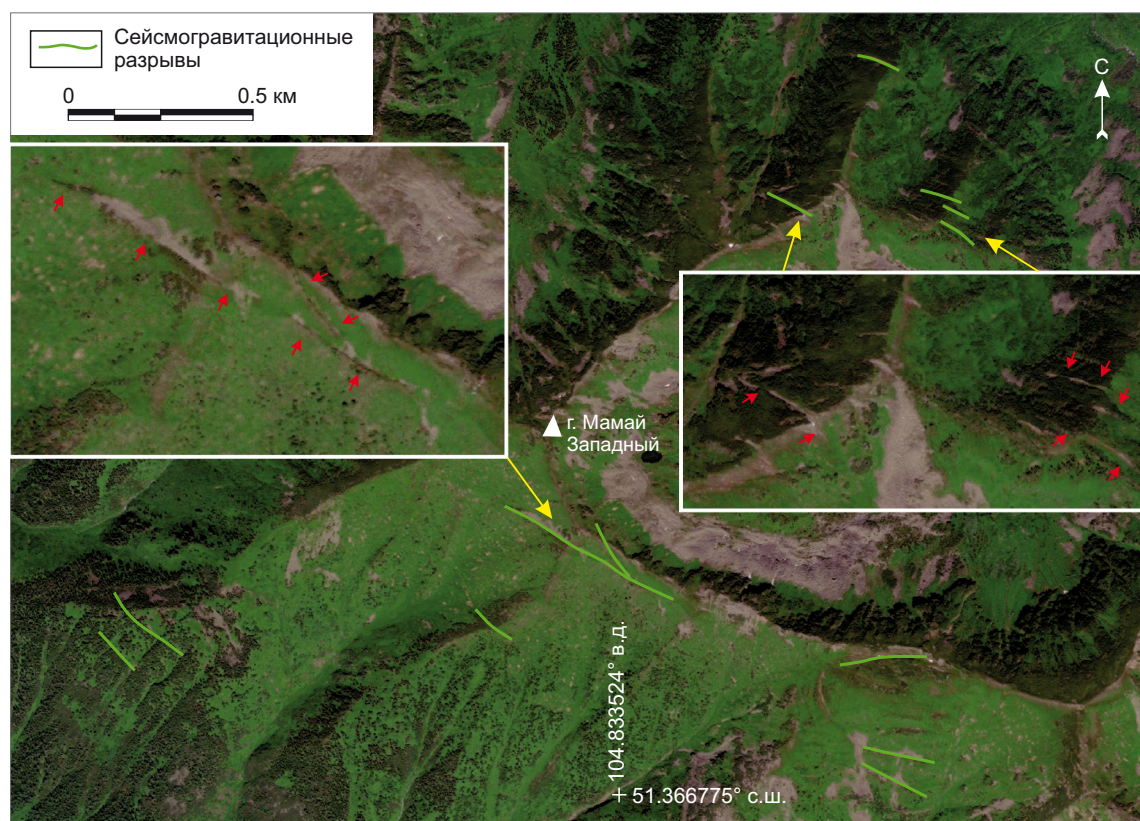


Рис. 26. Осиновская зона разрывов 1 на космоснимке.

Fig. 26. Osinovka zone of ruptures 1 on the satellite image.

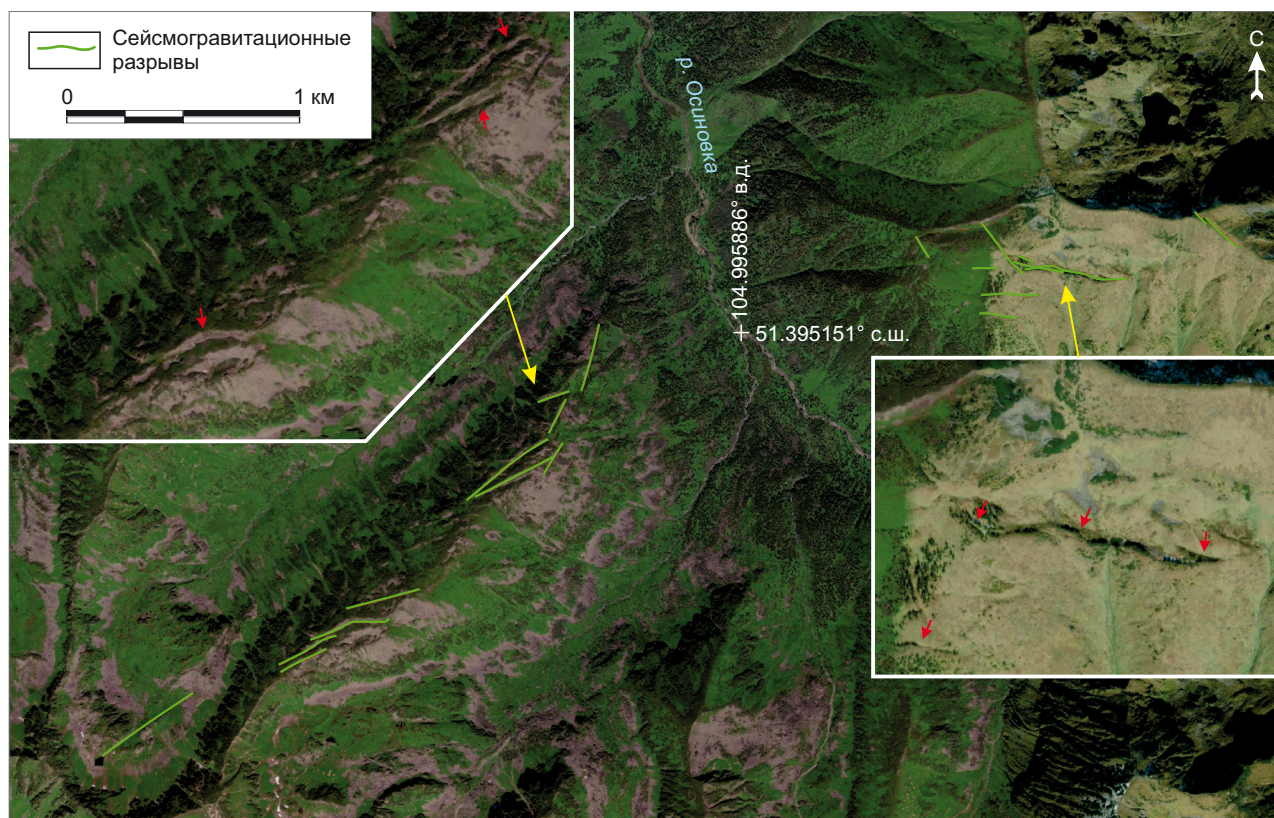


Рис. 27. Осиновская зона разрывов 2 на космоснимке.

Fig. 27. Osinovka zone of ruptures 2 on the satellite image.

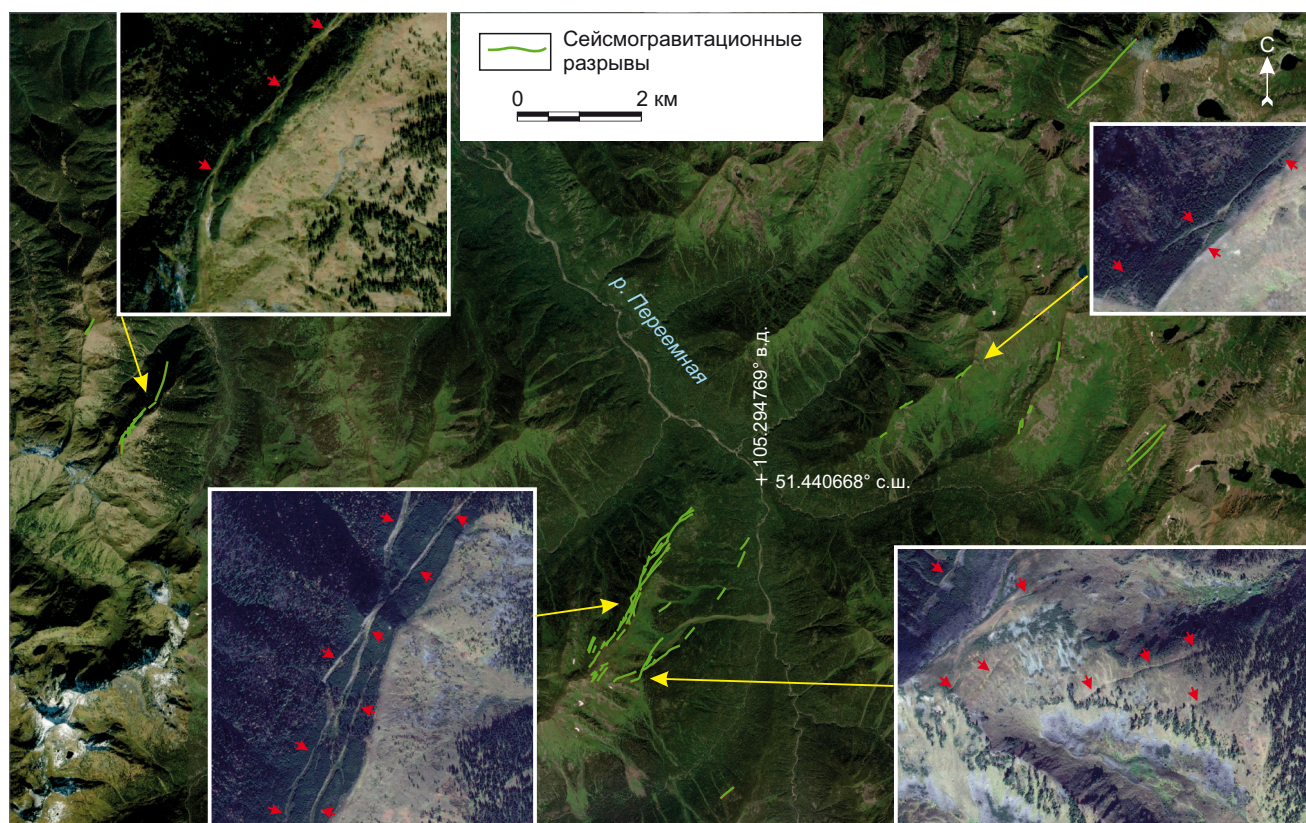


Рис. 28. Танхойская зона разрывов на космоснимке.

Fig. 28. Tankhoi zone of ruptures on the satellite image.

Таблица 1. Зоны первичных и вторичных сейсмогенных разрывов и магнитуды ассоциированных с ними землетрясений в сравнении с предшествующими данными
Table 1. Zones of primary and secondary seismogenic ruptures and magnitudes of associated earthquakes compared with the previous data

Название зоны	Наличие в каталоге [Smekalin et al., 2010]	Возраст последней активности, тыс. лет назад	Максимальное установленное вертикальное смещение за одно событие, м	Координаты места определения смещения, град.		Длина зоны, км	Расчетные максимальные магнитуды для зоны*		Магнитуда по данным предшественников**
				Широта	Долгота		M_w	M_s	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сарминская	Да	8–10 ^[2]	7.7	53.1367	106.8617	23	7.2 ^D	7.4 ^D	6.9 ^[1] ; 7.5 ^[2]
Ото-Хушун-Зундукская	Нет	12–14 ^[2]	8.4	53.3339	107.2567	19.5	7.3 ^D	7.5 ^D	7.7 ^[2]
Калтыгей-Тудугуйская	Нет	–	2.3	53.6020	107.6029	5.2; 5.6	6.9 ^D	7.0 ^D	–
Элигей-Анюткинская	Нет	0.3–4 ^[3]	7.9	53.8482	108.0620	37	7.3 ^D	7.4 ^D	7.6–8.0 ^[4]
Шартлай-Среднекедровая	Частично да	2.2 ^[5]	8.3	54.4289	108.5053	82	7.3 ^{D, L}	7.5 ^D	7.6–8.0 ^[4]
Черемшано-Болсодейская	Частично да	<1–2 ^[4]	2.95	54.74733	108.8072	56	7.2 ^L	7.1 ^{D, L}	7.6–8.0 ^[4]
Котельниковская	Да	<1 ^[6]	1.5 ^[6]	–	–	6.3	6.7 ^D	6.9 ^D	6.8 ^[1, 6]
Рель-Слюдянская	Нет	–	–	–	–	1.9	5.2 ^L	6 ^L	–
Наледная	Да	–	2.5 ^[6]	–	–	5.5	6.9 ^D	7.0 ^D	6.9 ^[6]
Кичерская	Да	–	6 ^[1]	–	–	1.4 (26)	7.2 ^D	7.3 ^D	7.4 ^[1]
Красноярская	Нет	–	–	–	–	4.1	5.7 ^L	6.3 ^L	–
Таловская	Нет	<1.4	–	–	–	3.6	6.6 ^[7]	–	6.6 ^[7]
Дельтовая	Нет	0.163	9.59	52.2450	106.6870	30	7.3 ^D	7.5 ^D	7.5 ^[8]
Солбакская	Нет	–	–	–	–	7.8	6.0 ^L	6.5 ^L	–
Бабхинская***	Нет	–	–	–	–	1.7; 1.8	–	–	–
Голая***	Нет	–	–	–	–	5.8	–	–	–
Снежная***	Нет	–	–	–	–	16.6	–	–	–
Осиновская 1***	Нет	–	–	–	–	2.4	–	–	–
Осиновская 2***	Нет	–	–	–	–	5.5	–	–	–
Танхойская***	Нет	–	–	–	–	15.2	–	–	–

Примечание. * – верхние индексы D и L указывают параметры, по которым оценены максимальные M_w и M_s . ** – верхние индексы в [...] указывают ссылки: 1 – [Smekalin et al., 2010]; 2 – [Chipizubov et al., 2015]; 3 – [Lunina et al., 2023]; 4 – [Chipizubov et al., 2003]; 5 – [Lunina et al., 2020]; 6 – [Solonenko, 1985]; 7 – [Arzhannikova, Arzhannikov, 2019]; 8 – [Kondorskaya, Shebalin, 1982]. Смещения без указания публикаций означают, что они получены по данным авторов настоящей работы, в т.ч. обоснованным в публикациях (см. по тексту). *** – генезис разрывов на данном этапе исследований считается сейсмогравитационным, магнитуда не рассчитывается.

Note. * – upper indexes D and L show the parameters from which maximum M_w and M_s are estimated. ** – upper indexes in [...] show the references: 1 – [Smekalin et al., 2010]; 2 – [Chipizubov et al., 2015]; 3 – [Lunina et al., 2023]; 4 – [Chipizubov et al., 2003]; 5 – [Lunina et al., 2020]; 6 – [Solonenko, 1985]; 7 – [Arzhannikova, Arzhannikov, 2019]; 8 – [Kondorskaya, Shebalin, 1982]. Displacements with no reference to publications imply that they have been obtained from the data provided by the authors of this paper, including those substantiated in publications (see text). *** – rupture genesis at the present stage of the study is considered gravitational, with magnitude uncalculated.

морфоструктурными и георадиолокационными данными, полученными нами за последние несколько лет. В итоге поверхностные разрывы сгруппированы в 20 зон, основные данные о которых сведены в табл. 1. Многие системы сейсмогенных нарушений были известны до 2010 г., но не вошли в последний каталог, хотя на карте палеоземлетрясений Прибайкалья показаны эллипсом [Smekalin et al., 2010]. Авторы таким образом интерпретировали несколько сейсмических событий разных магнитуд на одном сегменте сейсмоактивного разлома.

В отличие от предшественников, поверхностные сейсмогенные разрывы отображены нами в виде линий на карте, которые сопровождаются базой данных (Suppl. 1). Цифровое представление позволяет сразу увидеть активные сегменты разломов, а их группирование в зоны по ряду описанных выше признаков – оценить возможную максимальную магнитуду, ассоциированную с их формированием (табл. 1). На сегодняшний день M_w и M_s достаточно обоснованы для Сарминской, Ото-Хушун-Зундукской, Элигей-Анюткинской, Шартлай-Среднекедровой, Черемшано-Болсодейской, Таловской и Дельтовой зон. Остальные, как видно из табл. 1, требуют дальнейшего изучения с применением цифровой беспилотной аэрофотосъемки, георадиолокации и других наземных наблюдений. Особая проблема – абсолютное датирование сейсмогенных деформаций, которое необходимо для всех описанных дислокаций.

Сводка данных в табл. 1 показывает, что сейсмический потенциал зон в Байкальском рифте определяется максимальной $M_w=7.3$ и $M_s=7.5$. Большинство магнитуд, вычисленных по протяженности из-за отсутствия данных об одноактных смещениях, явно занижены. Магнитуды, рассчитанные для Дельтовой, Наледной, Котельниковской зон, согласуются с более ранними их оценками. Для Ото-Хушун-Зундукской, Элигей-Анюткинской, Шартлай-Среднекедровой, Черемшано-Болсодейской и Кичерской зон магнитуды завышены предшественниками, хотя для Черемшано-Болсодейской зоны, возможно, мы недооценили этот параметр, так как вскрытый уступ [Denisenko, Lunina, 2023] был не самый высокий.

Наиболее дискуссионными в плане генезиса являются разрывы в хребте Хамар-Дабан, которые ранее были определены как первичные сейсмодислокации, связанные с катастрофическими землетрясениями прошлого [Solonenko, 1968]. Позднее они нигде не упоминались.

В результате проведенного дешифрирования космоснимков в хребте Хамар-Дабан с юго-восточной стороны Южнобайкальской впадины было выделено 240 разрывов, сгруппированных в десять зон. Протяженность варьируется от 25 до 7763 м, но большая часть не превышает 1000 м. Выявленные структуры, как правило, расположены на вершинах водоразделов или склонах гряд и имеют близкое с ними простирание. Эти признаки, в совокупности с небольшой протяженностью

и относительно большими амплитудами вертикальных смещений от первых до десятков и даже иногда первых сотен метров, дали возможность предполагать сейсмогравитационную природу данных структур. В зарубежной литературе подобные явления называют закунгенами (sackungen). Эти глубокие деформации склонов в горах, которые проявляются гребневыми рвами, противоположными склону уступами и закрытыми депрессиями, могут формироваться в результате смещения по разлому, гравитационного смещения при землетрясении и гравитационного смещения, не связанного с тектоникой [McCalpin, 1999]. Обычно размеры деформаций сопоставимы с самим склоном [Tomáš et al., 2015], что зачастую наблюдается в хребте Хамар-Дабан. Учитывая то, что простирание структур согласуется с ближайшими разломами или с направлением береговой линии оз. Байкал, мы предполагаем, что образование разрывов в хребте Хамар-Дабан предопределено тектоническим строением и сейсмическим процессом. Третий фактор, который мог повлиять на формирование разрывов на крутых склонах – это отступление ледников, вызывающее значительную разгрузку склона, за которой следует поверхностное разрушение и активация ранее существовавших трещин [Tomáš et al., 2015; Gori et al., 2014], усиливающаяся при землетрясениях. В сартанское время отмечается глубокая депрессия нижней снеговой границы у южного побережья оз. Байкал до уровня 1200 м, а в некоторых случаях – до абсолютных отметок 800–900 м. На северном склоне хребта Хамар-Дабан ледники выходили на южное побережье озера [Enikeev, 2020]. Таким образом, структуры могут иметь как первичный сейсмогенный, так и вторичный сейсмогравитационный или иной генезис. От решения данного вопроса зависит сейсмическая безопасность населенных пунктов, сосредоточенных вдоль южного побережья оз. Байкал. В связи с этим описываемые разрывы были включены в настоящую базу данных – фундаментальную основу для проведения будущих углубленных исследований нарушений рельефа Байкальского рифта, связанных с сейсмичностью и другими геологическими процессами.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа, с одной стороны, подводит некоторый итог в исследованиях сейсмогенных разрывов Байкальского рифта, с другой – определяет текущие проблемы их изучения. Основные результаты проведенной работы следующие:

1. В формате ГИС составлена актуализированная схема и база данных сейсмогенных разрывов Байкальского рифта (см. Suppl. 1 и сайт <http://activetectonics.ru>). Для этого разработана специальная входная информация (Suppl. 2), согласно которой на сайте заполнены сведения о нарушениях.

2. Проведена беспилотная аэрофотосъемка на более чем 50 участках вдоль побережья оз. Байкал, что позволило уточнить строение зон сейсмогенных разрывов

на сегментах разломов (см. положение участков на рис. 1). Примеры ортофотопланов приведены для фрагментов Сарминской (см. рис. 4), Калтыгей-Тудугуйской (см. рис. 6), Элигей-Анюткинской (см. рис. 13) и Краснояровской зон (см. рис. 21). Некоторые материалы аэрофотосъемки по объектам загружены на сайт: <http://demdata.activetectonics.ru>.

3. Сейсмогенные разрывы, сближенные в пространстве, со схожей сохранностью в рельефе и близким простиранием объединены в 20 зон, что позволяет интерпретировать их вскрытие при одном землетрясении с магнитудой, рассчитанной из максимального одноактного смещения или длины зоны. Большинство магнитуд, вычисленных по протяженности, занижены из-за того, что разрывы часто трассируются в акваторию оз. Байкал. Максимальный сейсмический потенциал наиболее изученных сейсмогенных зон в Байкальском рифте составляет $M_w=7.2-7.3$ и $M_s=7.3-7.5$. Преваляющая кинематика смещений – сброс.

4. Большинство поверхностных разрывов в хребте Хамар-Дабан могли быть результатом одновременно-го воздействия структурных (тектоническое строение), сейсмических и климатических факторов (отступление ледников и снятие нагрузки), что позволяет на данном этапе наших знаний отнести их к сейсмогравитационным структурам.

5. Предложен и апробирован оптимальный и эффективный комплекс современных технологий для проведения работ по изучению следов палео- и исторических землетрясений в пределах особо охраняемых природных территорий, включающий: 1) дешифрирование космических снимков; 2) беспилотную аэрофотосъемку (при возможности дополнительно лидарную съемку); 3) наземные исследования с применением георадиолокации и морфоструктурных наблюдений; 4) анализ цифровых моделей местности и радарограмм для изучения величин смещений вдоль разрывов и установления максимальной подвижки; 5) расчет магнитуд землетрясений для сейсмогенной зоны согласно уравнениям $M_w=f(D_{max})$ и $M_s=f(L)$. Для определения возраста деформаций по возможности рекомендуется отбирать материал из естественных выходов горных пород, в том числе коренных, для которых может быть применен метод датирования с использованием земных космогенных нуклидов по ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al .

Полученные результаты имеют важное значение для уточнения оценки сейсмической опасности Прибайкалья и развития образовательного туризма в регионе.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективу ФГБУ «Заповедное Прибайкалье», предоставившему возможность выполнения научно-исследовательских работ на территории Байкало-Ленского заповедника в рамках договора № 43 от 30.05.2019 г. Частично техническую помощь при заполнении базы данных сейсмогенных разрывов оказывала Е.Б. Игнатенко.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

О.В. Лунина – дешифрирование и заполнение базы данных для разрывов западного побережья оз. Байкал, разработка логической модели данных, анализ всех материалов, подготовка рукописи; И.А. Денисенко – дешифрирование и заполнение базы данных для разрывов в хребте Хамар-Дабан, обработка радарограмм; А.А. Гладков – аэрофотосъемка и фотограмметрическая обработка данных, разработка программного обеспечения и веб-страниц для базы данных. Все авторы принимали участие в полевом изучении разрывов.

O.V. Lunina – interpreting and adding data on the Baikal west coast ruptures to the database, creating a logical data model, materials analysis, manuscript preparation; I.A. Denisenko – interpreting and adding data on the ruptures in the Khamar-Daban Range to the database, radarograms processing; A.A. Gladkov – aerial photography photogrammetric data processing, software development and creating web pages for the database. All the authors participated in the field study of the ruptures.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью. Авторы прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript. The authors read and approved the final manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Arzhannikova A., Arzhannikov S., 2019. Morphotectonic and Paleoseismological Studies of Late Holocene Deformation Along the Primorsky Fault, Baikal Rift. *Geomorphology* 342, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.016>.
- Bucknam R.C., Anderson R.E., 1979. Estimation of Fault Scarp Ages from a Scarp-Height-Slope-Angle Relationship. *Geology* 7 (1), 11–14.
- Caputo R., 2005. Ground Effects of Large Morphogenic Earthquakes. *Journal of Geodynamics* 40 (2–3), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.07.001>.
- Chipizubov A.V., 2007. Optimal Assessment of Seismic Hazard in Pribaikalye. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 417 p. (in Russian) [Чипизубов А.В. Оптимальная оценка сейсмической опасности Прибайкалья: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск, 2007. 417 с.].
- Chipizubov A.V., Melnikov A.I., Imaev V.S., Baskakov V.S., 2006. Fragments of Paleoseismic Dislocations in the North Baikal (Southern Flank) and Primorsky Fault Zones. In: *Transactions of the Baikal-Lena Nature Reserve. Iss. 4*. Irkutsk, p. 7–13 (in Russian) [Чипизубов А.В., Мельников А.И., Имаев В.С., Баскаков В.С. Фрагменты палеосейсмических дислокаций в зонах Северобайкальского (южный фланг) и Приморского разломов // Труды Государственного природного заповедника «Байкало-Ленский». Иркутск, 2006. Вып. 4. С. 7–13].

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].

Denisenko I.A., Lunina O.V., 2020. Late Quarternary Displacements Along the Sarma Segment of the Primorsky Fault Based on GPR Survey Data (Baikal Rift). Geodynamics & Tectonophysics 11 (3), 548–565 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>.

Denisenko I.A., Lunina O.V., 2021. Late Quaternary Displacements Along the Zunduk Fault According to Ground-Penetrating Radar and Morphostructural Analysis (North-western Coast of Lake Baikal). Vestnik of SPU. Earth Sciences 66 (2), 374–395 (in Russian) [Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Зундукского разлома по данным георадиолокации и морфоструктурного анализа (северо-западное побережье оз. Байкал) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 2. С. 374–395]. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.210>.

Denisenko I.A., Lunina O.V., 2023. Seismogenic Deformations Confined to the Cheremshano-Bolsodeysky Segment of the North Baikal Fault. Problems 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>.

Enikeev F.I., 2020. Paleogeography of the Sartan Glaciation of the Hamar-Daban Ridge (Southern Baikal Region). Transbaikal State University Journal 26 (7), 17–32 (in Russian) [Еникеев Ф.И. Палеогеография Сартанского оледенения хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26. № 7. С. 17–32]. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-7-17-32>.

Gori S., Falcucci E., Dramis F., Galadini F., Galli P., Giaccio B., Messina P., Pizzi A., Sposato A., Cosentino D., 2014. Deep-Seated Gravitational Slope Deformation, Large-Scale Rock Failure, and Active Normal Faulting Along Mt. Morrone

(Sulmona Basin, Central Italy): Geomorphological and Paleoseismological Analyses. Geomorphology 208, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.017>.

Khromovskikh V.S., 1965. Seismogeology of South Pribaikalye. Nauka, Moscow, 122 p. (in Russian) [Хромовских В.С. Сейсмогеология Южного Прибайкалья. М.: Наука, 1965. 122 с.].

Khromovskikh V.S., Chipizubov A.V., Kurushin R.A., Smekalin O.P., Delyansky E.A., 1993. New Data on Paleoseismodislocations in the Baikal Rift Zone. In: Seismicity and Seismic Zoning of the East Eurasia. Iss. 1. Moscow, p. 256–265 (in Russian) [Хромовских В.С., Чипизубов А.В., Курушин Р.А., Смекалин О.П., Делянский Е.А. Новые данные о палеосейсмодислокациях Байкальской рифтовой зоны // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М., 1993. Вып. 1. С. 256–265].

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., 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 Rytty and Surroundings, Baikal Rift, Siberia: Seismic Hazard Implication. Quaternary 6 (1), 22. <https://doi.org/10.3390/quat6010022>.

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 (in Russian) [Лунина О.В., Денисенко И.А., Игнатенко Е.Б., Гладков А.А. Сейсмогенная зона на мысе Шартлай (оз. Байкал): особенности строения, смещений и роста разрывов // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 4. 0776]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-4-0776>.

Lunina O.V., Gladkov A.S., Gladkov A.A., 2019. Surface and Shallow Subsurface Structure of the Middle Kedrovaya Paleoseismic Rupture Zone in the Baikal Mountains from Geomorphological and Ground-Penetrating Radar Investigations. Geomorphology 326, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.009>.

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 ¹⁰Be 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.

McCalpin J.P., 1999. Criteria for Determining the Seismic Significance of Sackungen and Other Scarplike Landforms in Mountainous Regions. In: Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origins. NUREG/CR-5503. P. A-122-A-142.

Nurminen F., Baize S., Boncio P., Blumetti A.M., Cinti F.R., Civico R., Guerrieri L., 2022 SURE 2.0 – New Release of the Worldwide Database of Surface Ruptures for Fault Displacement Hazard Analyses. Scientific Data 9, 729. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01835-z>.

Radulov A., Dilov T., Rockwell T., Štěpančíková P., Yaneva M., Donkova Y., Stemberk J., Sana H., Nikolov N., 2023. First Paleoseismic Data from the Balkan Range. Tectonophysics 863, 230009. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230009>.

Rogozhin E.A., 2012. An Outline of the Regional Seismotectonics. IPE RAS Publishing House, Moscow, 340 p. (in Russian) [Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2012. 340 с.].

Shchetnikov A.A., Radziminovich Y.B., Vologina E.G., Ufimtsev G.F., 2012. The Formation of Proval Bay as an Episode in the Development of the Baikal Rift Basin: A Case Study. Geomorphology 177–178, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.023>.

Smekalin O.P., Chipizubov A.V., Imaev V.S., 2010. Paleoeearthquakes in the Pribaikalie: Methods and Results of Dating. Geodynamics & Tectonophysics 1 (1), 55–74 (in Russian) [Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С. Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 1. С. 55–74]. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-1-0006>.

Smekalin O.P., Imaev V.S., Chipizubov A.V., 2007. The Studying of Seismogenic Normal Faults of Kichera Structure (Northern Baykal Region) in the Trench Profiles. Lithosphere 6, 111–124 (in Russian) [Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Изучение сейсмогенных сбросов Кичерской структуры Северного Прибайкалья в разрезах канав (трэнчинг) // Литосфера. 2007. № 6. С. 111–124].

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.].

Solonenko V.P. (Ed.), 1977. Seismic Zoning of East Siberia and Its Geological and Geophysical Bases. Nauka, Novosibirsk, 301 p. (in Russian) [Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1977. 301 с.].

Solonenko V.P. (Ed.), 1981. Seismogeology and Detailed Seismic Zoning of Pribaikalye. Nauka, Novosibirsk, 168 p. (in Russian) [Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1981. 168 с.].

Solonenko V.P. (Ed.), 1985. Geology and Seismicity of the Baikal-Amur Mainline Zone. Seismogeology and Seismic Zoning. Nauka, Novosibirsk, 192 p. (in Russian) [Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование // Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1985. 192 с.].

Strom A.L., Nikonov A.A., 1997. Relations Between the Seismogenic Fault Parameters and Earthquake Magnitude. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 33 (12), 1011–1022.

Tomáš P., Mentlík P., Zondervan A., Norton K., Hradecký J., 2015. Are Sackungen Diagnostic Features of (De)Glaciated Mountains? Geomorphology 248, 396–410. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.022>.

Vietinghoff A.Kh., 1865. Description of the Land near the Selenga River Mouth, Subsided After the Earthquakes of December 30 and 31, 1861. Mining Journal 3(7), 95–101 (in Russian) [Фитингоф А.Х. Описание местности при устье реки Селенги, понизившейся от землетрясений 30 и 31 декабря 1861 года // Горный журнал. 1865. Т. 3. № 7. С. 95–101].

Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New Empirical Relationship 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>.