



УДК 551.243.1 (571.53)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.70>

Палеосейсмогенные смещения в районе мыса Рытого на северо-западном побережье озера Байкал

О. В. Лунина, И. А. Денисенко*

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

К. Е. Г. Брага

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. В связи с чередой ощутимых землетрясений в Байкало-Монгольском регионе в конце 2020 г. – начале 2021 г., вызвавших у населения Прибайкалья повышенный интерес к зонам возможных очагов землетрясений и их сейсмическому потенциалу, нами проведено детальное картирование палеосейсмогенных деформаций в пределах одного из самых загадочных мест на оз. Байкал – м. Рытого и его окрестностей, пересекаемых зоной Кочериковского активного разлома. Вдоль разрывов в тыловой части дельты р. Риты на основе измерений смещений исходных поверхностей по топографическим профилям реконструированы вертикальные смещения и сопоставлены с данными георадиолокации. Установлено, что деформации на изученной площади связаны как минимум с двумя палеоземлетрясениями: максимальная подвижка при первом была 7,9 м, при втором – 5 м. Оценки магнитуд, рассчитанные по известным уравнениям с использованием этих смещений, составили: M_w более раннего события 7,3, $M_s = 7,4$; M_w более позднего события – 7,1, $M_s = 7,3$. Отмечено, что сохранность сейсмогенных уступов, их углы падения и степень захоронения сильно зависят от исходного рельефа местности и могут различаться даже в пределах первых сотен метров для одного разрыва. Этот факт необходимо учитывать при проведении сейсмогеологических исследований и определении параметров разрыва.

Ключевые слова: палеосейсмогенный разрыв, уступ, смещение, георадиолокация, мыс Рытый.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках базового бюджетного проекта НИР «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009, с использованием оборудования ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682 при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-385001, позволившего провести экспедиционные работы в 2021 г., в которых принимали участие А. А. Гладков и Е. А. Петров. Авторы благодарны им, а также ФГБУ «Заповедное Прибайкалье» за возможность выполнения научно-исследовательских работ на территории Прибайкальского национального парка в рамках договора о сотрудничестве № 43 от 30.05.2019.

Для цитирования: Лунина О. В., Денисенко И. А., Брага К. Е. Г. Палеосейсмогенные смещения в районе мыса Рытого на северо-западном побережье озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 40. С. 70–81. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.70>

Paleoseismogenic Displacements in Cape Rytyi Area on the Northwestern Shore of Lake Baikal

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

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

C. H. G. Braga

Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

Abstract. In connection with a series of sensible earthquakes in the Baikal-Mongolian region at the end of 2020 – beginning of 2021, the population of the area has increased interest in the zones of possible earthquake sources and their seismic potential. In this regard, we carried out a detailed mapping of paleoseismogenic deformations within one of the most mysterious places on Lake Baikal – Cape Rytyi and its vicinity crossed by the zone of the Kocherikovsky active fault. Along the ruptures in the rear part of the Rita river delta, based on displacement measurements of the original surfaces on the hypsometric profiles, the vertical displacements are reconstructed and compared with ground penetrating radar data. It has been established that the deformations in the studied area are associated with at least two paleoearthquakes. The maximum movement at the first one was 7,9 m, at the second one – 5,0 m. The magnitude estimates calculated from the known equations using these displacements were: M_w of the earlier event 7,3, $M_s = 7,4$; M_w of the later event is 7,1, $M_s = 7,3$. It is noted that the preservation of seismogenic scarps, their dip angles and the degree of burial strongly depend on the initial landscape and can differ even within a few hundred meters for a single rupture. This fact must be taken into account when conducting paleoearthquake studies and determining the rupture parameters.

Keywords: paleoseismogenic rupture, scarp, displacement, ground penetrating radar, Cape Rytyi.

For citation: Lunina O.V., Denisenko I.A., Braga C.H.G. Paleoseismogenic Displacements in Cape Rytyi Area on the Northwestern Shore of Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 40, pp. 70-81. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.70> (in Russian)

Введение

Палеосейсмогенное смещение по сейсмогенному разрыву является важнейшим параметром в оценке сейсмического потенциала активного разлома. При этом чаще всего используют максимальную или (реже) среднюю величину [Bonilla, Mark, Lienkaemper ... , 1984; Wells, Coppersmith, 1994; Стром, Никонов, 1994]. В обоих случаях для их определения необходим ряд измерений, которые относительно быстро можно осуществить путем морфоструктурного анализа уступов [Active faulting and ... , 2000; McCalpin, 2009; Slip distribution on ... , 2015; A major, intraplate ... , 2016]. Однако применение только этого метода не позволяет однозначно выявить количество деформационных событий на разломе, для этого необходимо вскрытие поверхностных разрывов канавой [Active tectonics research ... , 2010; Evaluating Quaternary activity ... , 2019], что по разным причинам (заповедные места, курумники, стоимость работ и др.) может быть затруднено или невозможно. В последнее время для установления смещений успешно применяют метод георадиолокации [McClymont, Villamor, Green, 2009; Shallow subsurface structure ... , 2010; Finding the buried ... , 2012; GPR measurements to ... , 2017; Lunina, Denisenko, 2020].

В связи с чередой ощутимых землетрясений в Байкало-Монгольском регионе в конце 2020 г. – начале 2021 г. у населения Прибайкалья повысился интерес к зонам возможных очагов землетрясений и их сейсмическому потенциалу. Мы рассматриваем один из наименее изученных участков в Байкальском рифте – сегмент Кочериковского разлома в районе м. Рытого (рис. 1), для которого ранее были построены ортофотоплан и цифровая модель местности (ЦММ) [Lunina, Gladkov, 2022]. В настоящей работе они использованы для детального картирования сейсмогенных разрывов и определения величин смещений.

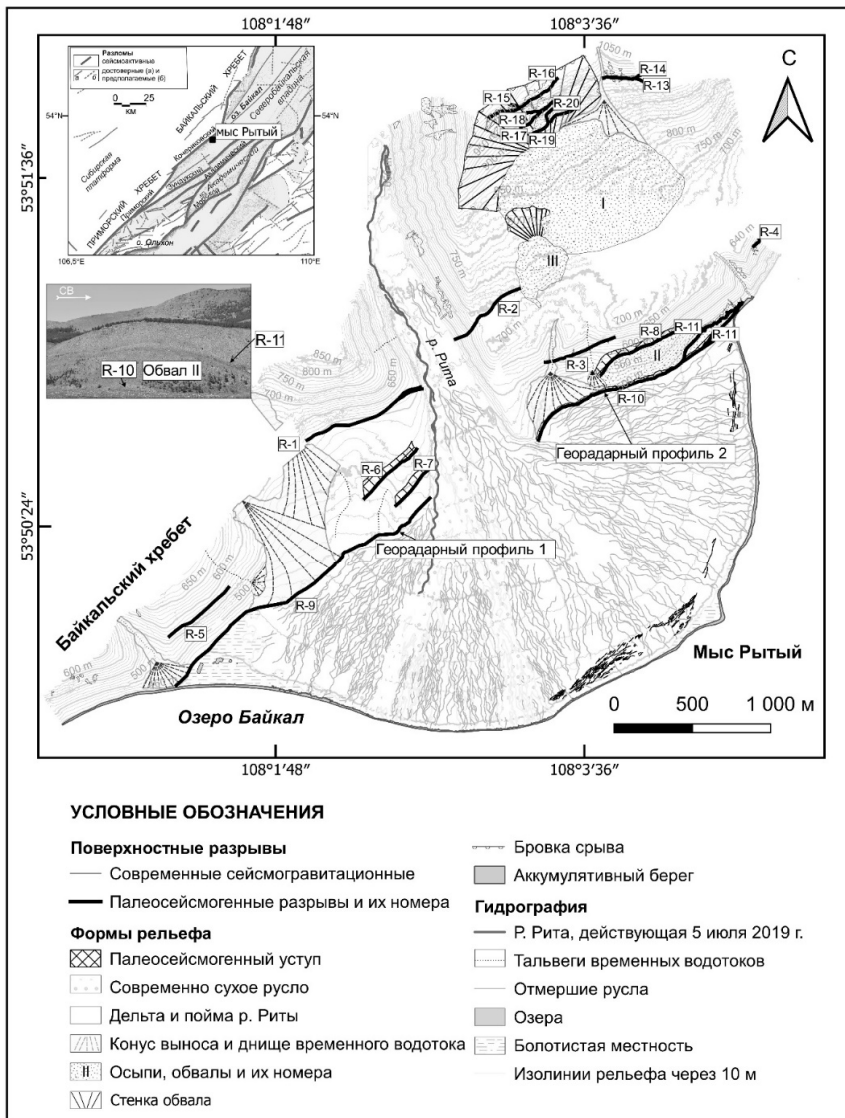


Рис. 1. Расположение поверхностных разрывов на упрощенной геоморфологической схеме района м. Рытого

Площадь и методы исследования

Мыс Рытый расположен на северо-западном побережье оз. Байкал и пересекается зоной Кочериковского разлома, протягивающегося от долины р. Глубокая Падь до м. Шартлай (см. рис. 1). Место овеяно легендами, в связи с чем интерес к нему еще более возрастает со стороны туристических агентств, размещающих на своих сайтах научно-популярную информацию. На м. Рытом отмечаются аномальное магнитное поле, повышенные остаточные изостатические аномалии силы тяжести и следы мощных селей [Бурмейстер, Костюнин, 2006]. Их признаки наблюдаются в отложениях конусов выноса и в современных бортах долины р. Риты. Согласно геологической карте масштаба 1:200 000 [1974], через м. Рытый проходит две линии тектонического контакта, погребенные под молодыми отложениями, а в прилегающих коренных породах – мощная, до 2,5 км, зона милонитизации и катаклаза. На схемах в [Сейсмотектоника ... , 1968; Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения ... , 2003] главный сейсмогенный разлом показан по северо-западной границе дельтовой равнины.

В настоящей работе картирование сейсмогенных разрывов проведено на основе опубликованных материалов аэрофотосъемки, обработанных фотограмметрическим методом [Lunina, Gladkov, 2022, рис. 4–5]. Пространственное разрешение итогового ортофотоплана и ЦММ – 6–10 и 10–20 см/пиксель соответственно. Попутно были дешифрованы некоторые геоморфологические формы, отраженные на полученной схеме (см. рис. 1).

Определение вертикальной подвижки осуществлялось по ЦММ путем измерения смещений исходных поверхностей на поднятом и опущенном крыльях сейсмогенного разрыва (рис. 2). Топографические профили (ТП) располагались вкрест простирания разломного уступа с шагом от 28 до 235 м. Интервал исследования определялся возможностью проведения измерений в данной точке, так как методика подразумевает анализ параллельных или близпараллельных исходных поверхностей [McCalpin, 2009]. Если их наклон отличался более чем на 2 градуса (рис. 2, Д), профиль не рассматривался, поскольку в таких случаях невозможно адекватно оценить смещение по разрыву. В результате на 27 топографических профилях измерены смещения исходных поверхностей (SO). В анализ были вовлечены разрывы R-9 и R-10, так как они лучше других проявлены в рельефе, отражая тем самым наиболее молодой возраст нарушений. С другой стороны, генезис уступов, ассоциируемый с этими разрывами, требовал дополнительного подтверждения методом георадиолокации.

Георадиолокационные исследования вкрест простирания разрывов выполнены на двух профилях георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» с центральной частотой 100 МГц. Принципы метода, особенности сбора, обработки и интерпретации данных неоднократно описывались в предыдущих публикациях [McClymont, Villamor, Green, 2009; Shallow subsurface structure ... , 2010; Finding the buried ... , 2012; GPR measurements to ... , 2017; Lunina, Denisenko, 2020].

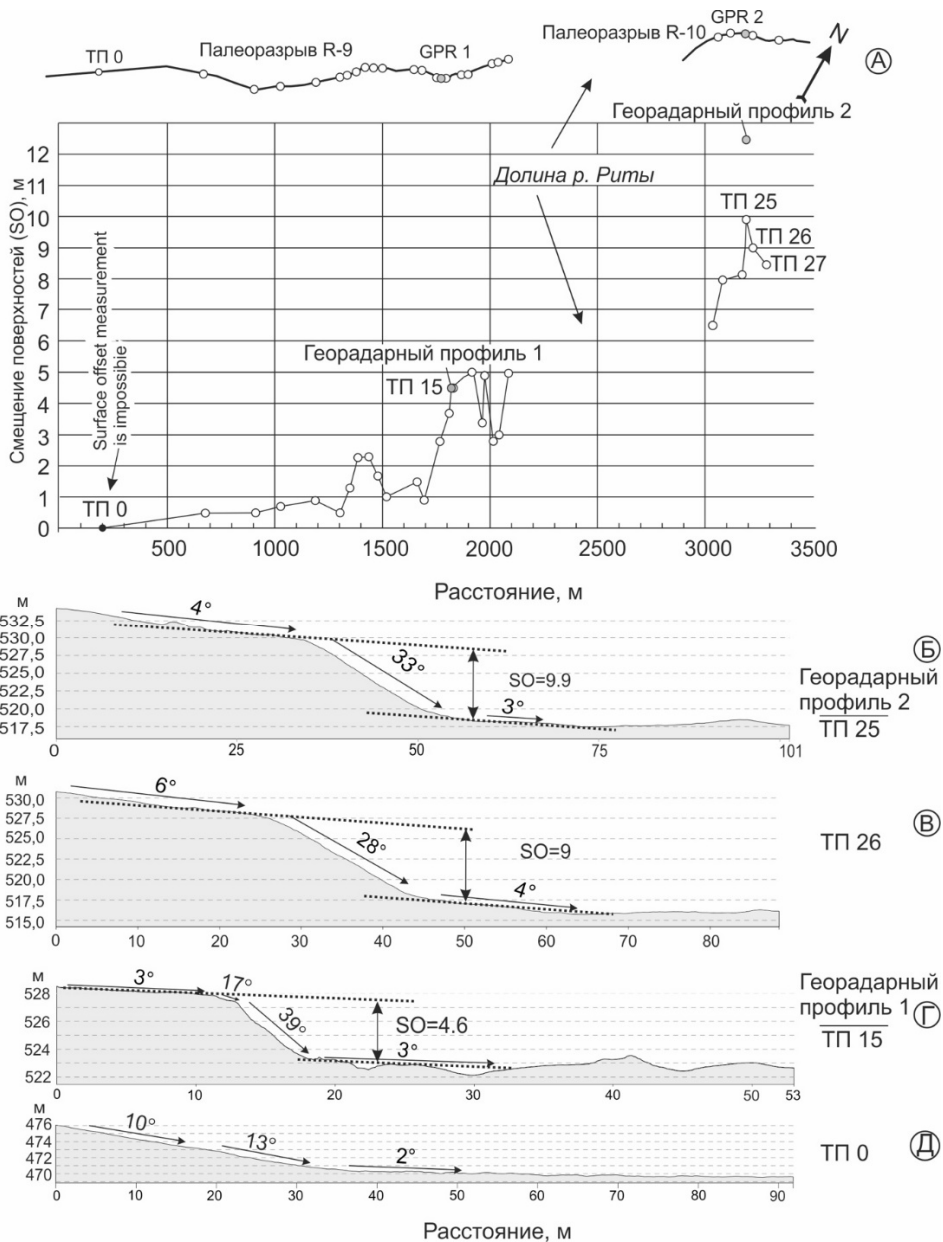


Рис. 2. График распределения смещений исходных поверхностей вдоль палеосейсмогенных разрывов R-9 и R-10 (А) и некоторые топографические профили через разломные уступы с указанием измеренных параметров (Б, В, Г, Д)

Реконструкция палеосейсмогенных смещений

В результате на площади исследования откартировано 20 разрывов, часть из которых являются фрагментами одних и тех же нарушений, разделенных долиной р. Риты (см. рис. 1). Ширина зоны между разрывами R-16 и

R-10 около 2 км. Нарушения представлены в разной степени денудированными уступами и рвами, что предполагает их разное время образования и, возможно, последующую активизацию. Помимо палеосейсмогенных нарушений, в периферийной части дельты р. Риты показаны современные сейсмогравитационные разрывы, которые ассоциированы с землетрясением $M = 5,2$, произошедшим 13.08.1962 напротив м. Рытого, в зоне Морского разлома [Лунина, Гладков, 2022]. Учитывая положение всех разрывов разного генезиса, можно полагать, что в целом видимая ширина зоны динамического влияния Кочериковского разлома равна 3,5 км.

Для измерения смещений мы выбрали наиболее ярко проявленные уступы в тыловой части дельты р. Риты, маркируемые разрывами R-9 и R-10. По результатам гипсометрических измерений отмечается увеличение вертикальных подвижек (SO) с юго-запада на северо-восток (рис. 2, А). На правом берегу максимальное смещение исходных поверхностей равно 5 м, среднее – 2,2 м. Георадиолокационные исследования на профиле 1 (рис. 3), который совпадает с топографическим профилем 15 (рис. 2, Г), показывают, что смещения справа от р. Риты являются результатом одного землетрясения.

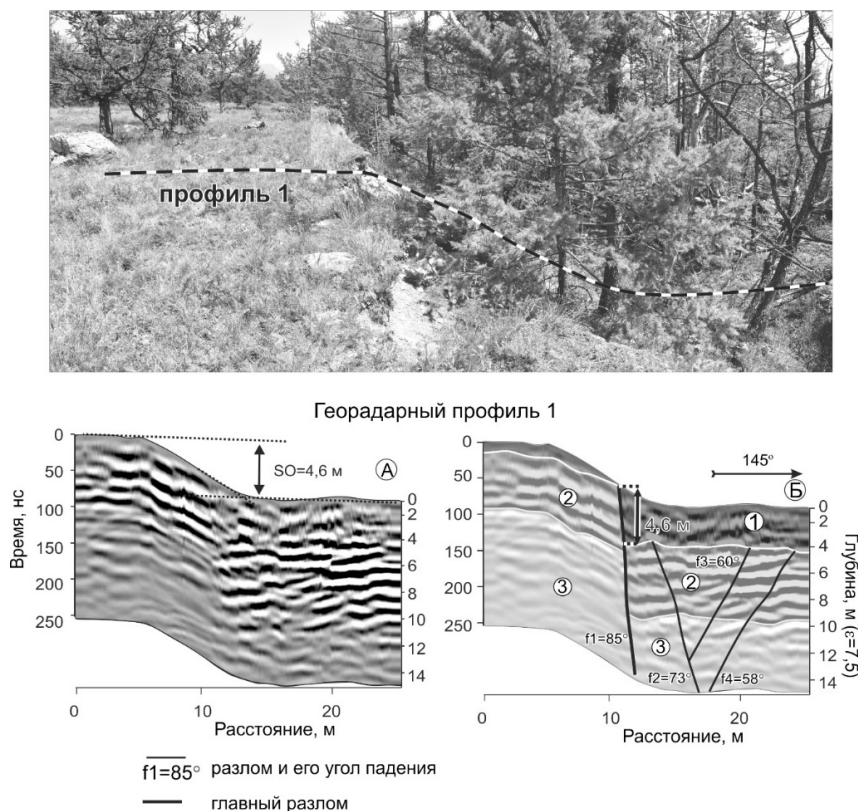


Рис. 3. Георадарный профиль 1 через разрыв R-9: А – без интерпретации; Б – с наложенной интерпретацией, где цифрами в кружках показаны разные георадарные комплексы, отличающиеся по волновой картине. Положение профиля см. на рис. 1

Слева от р. Риты величины смещений исходных поверхностей рельефа существенно выше (см. рис. 2, А). Максимальное значение 9,9 м зафиксировано в месте нахождения георадарного профиля 2 (см. рис. 2, Б), где по смещению георадарных комплексов суммарная амплитуда подвижки составляет 12,5 м (рис. 4).

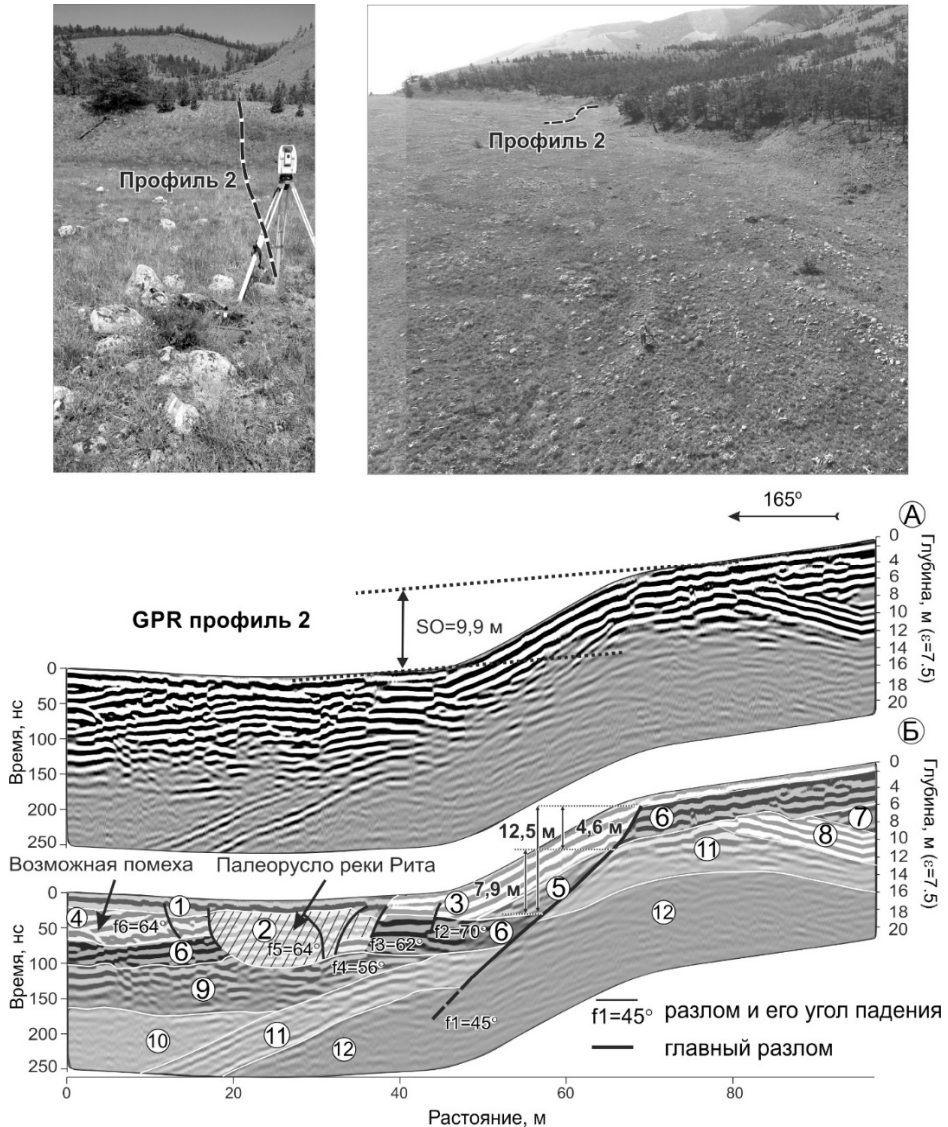


Рис. 4. Георадарный профиль 2 через разрыв R-10: А – без интерпретации; Б – с наложенной интерпретацией, где цифрами в кружках показаны разные георадарные комплексы, отличающиеся по волновой картине. Положение профиля см. на рис. 1

Разница смещений 2,6 м, оцененных разными методами, вероятно, связана с высокой скоростью накопления осадочного материала в подножии разломного уступа, пересекающего малый селевой конус (см. рис. 1). В 10 м на северо-восток, на ТП 26 (см. рис. 2, В), вертикальная подвижка, измеренная по смещению исходных поверхностей, на 0,9 м меньше, а сейсмогенный уступ на 5° положе, что может свидетельствовать о более значительной степени денудации и аккумуляции осадков на профиле ТП 26, а также о сильной изменчивости параметров сейсмогенного разрыва, даже в пределах первых десятков метров. Георадиолокационные исследования на профиле 2, который совпадает с топографическим профилем 25, показывают, что смещения справа от р. Риты являются результатом двух сейсмических событий с амплитудами 7,9 и 4,6 м, а также подтверждают частичное захоронение разломного уступа (см. рис. 4).

Северо-восточнее точки ТП 27 разрыв срезает нижнюю часть обвально-го склона, вследствие чего наклон у подошвы становится круче на $\sim 4\text{--}7^\circ$ (см. фото на рис. 1) и измерение смещений исходных поверхностей на этом сегменте невозможно.

Оценка магнитуды палеоземлетрясений

В результате проведенных реконструкций на м. Рытом и в окрестностях установлено, что система палеосейсмогенных разрывов сформировалась в результате как минимум двух палеоземлетрясений, следы которых фиксируются разными методами. Это дополнительно подтверждается тем, что нарушения 9 и 10 подрезают селевые конуса выноса и эрозионные склоны, которые скрывают нарушения 3, 5, 6. Полученные выводы важны для определения корректных максимальных и средних величин смещений, используемых далее для оценки магнитуд палеоземлетрясений.

Рассчитанные магнитуды палеосейсмических событий представлены в табл. 1.

Таблица 1

Магнитуды палеоземлетрясений, рассчитанные по уравнениям для сбросов

Уравнение по [Wells, Coppersmith, 1994]	M_w	S	Уравнение по [Лунина, 2002]	M_s	S
Раннее событие (1), $MD = 7,9$ м					
$M_w = 6,61 + 0,71 \cdot \log MD$	7,25	0,34	$M_s = 6,73 + 0,79 \cdot \log MD$	7,44	0,44
Позднее событие (2), $MD = 5$ м, $AD = 2,2$ м					
$M_w = 6,61 + 0,71 \cdot \log MD$	7,11	0,34	$M_s = 6,73 + 0,79 \cdot \log MD$	7,28	0,44
$M_w = 6,78 + 0,65 \cdot \log AD$	7,00	0,33			

Примечание. MD – максимальное смещение, м; AD – среднее смещение, м; M_w – моментная магнитуда; M_s – магнитуда, определяемая по поверхностным волнам; S – стандартная ошибка определения зависимой переменной.

В результате M_w более раннего события равна 7,25, $M_s = 7,44$, M_w более позднего события – 7,0–7,11, $M_s = 7,28$. На мелкомасштабной карте сейсмо-тектоники Восточной Сибири сейсмоактивному линеаменту, совпадающему с Кочериковским разломом, присвоена магнитуда 7,0 без указания ее типа и метода получения [A Seismotectonic Zonation ... , 2015], а в работе [Палеосей-

смодислокации и палеоземлетрясения ... , 2003] на основании морфоструктурного анализа уступов предполагается, что сейсмогенные деформации, простирающиеся от м. Кочериковского в северном направлении, куда входят откартированные нами разрывы, могли сформироваться при двух палеосо-бытиях с $M = 7,6-8$ или при одном еще более мощном. Таким образом, наши детальные исследования в значительной мере уточняют существующие представления о сейсмическом потенциале Кочериковского разлома, по крайней мере, для сегмента зоны в пределах м. Рытого.

Заключение

Комплексные морфоструктурные и георадиолокационные исследования м. Рытого и окрестностей позволили сделать следующие выводы.

1. Мыс Рытый и прилегающая территория характеризуются большим разнообразием природных геоморфологических и структурных форм, которые указывают на широкое развитие здесь в прошлом селевых, обвальных и разрывообразующих процессов, связанных как минимум с двумя палеосейсмическими событиями. В настоящее время в периферийной части дельты р. Риты развивается зона сейсмогравитационных нарушений, образование которой связывается с землетрясением 1962 г. с эпицентром напротив м. Рытого в оз. Байкал [Lunina, Gladkov, 2022]. Все эти явления накладывают мистический характер на природный объект, а высокая нарушенность геологической среды может быть причиной различных геофизических и геохимических аномалий.

2. Ширина зоны первичных сейсмогенных деформаций в лежачем крыле сброса ~ 2 км. В висячем крыле зона условно может быть ограничена упомянутой современной зоной нарушений на краю дельты р. Риты, северо-восточный сегмент которой по простиранию совпадает с направлением палеосейсмогенных разрывов и находится в 1,5 км от них.

3. Максимальные смещения при первом палеоземлетрясении достигали 7,9 м, при втором – 5 м. Оценки магнитуд, рассчитанные по разным зависимостям с использованием среднего и максимальных смещений, составили: M_w более раннего события 7,3, $M_s = 7,4$; M_w более позднего события – 7,0–7,1, $M_s = 7,3$.

Таким образом, по разным магнитудным шкалам предельный сейсмический потенциал Кочериковского разлома по данным, полученным на м. Рытом, составляет 7,0–7,4. В дальнейшем целесообразно проведение подобных исследований на других сегментах структуры, где фиксируются сейсмогенные рвы и уступы.

Список литературы

Бурмейстер А. А., Костюнин О. В. Тайны Байкала: Гневный мыс Рытый. Иркутск : Облмашинформ, 2006. 31 с.

Геологическая карта масштаба 1:200 000, серия Прибайкальская, лист № 49-XIX. М. : Аэрогеология, 1974.

Лунина О. В. Влияние напряженного состояния литосферы на соотношение параметров и внутреннюю структуру сейсмоактивных разломов : дис. ... канд. геол.-минер. Наук : 25.00.03. Иркутск, 2002. 223 с.

Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения в пределах Байкало-Ленского заповедника (зона Северобайкальского разлома) / А. В. Чипизубов, А. И. Мельников, А. В. Столповский, В. С. Баскаков // Труды Государственного природного заповедника «Байкало-Ленский». Иркутск : РИО НИЦ ВХ ВСНЦ СО РАМН, 2003. Вып. 3. С. 6–18.

Сейсмотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / Ред. В. П. Солоненко. М. : Наука, 1968. 220 с.

Стром А. Л., Никонов А. А. Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.

A major, intraplate, normal-faulting earthquake: The 1739 Yinchuan event in northern China / T. A. Middleton, R. T. Walker, B. Parsons, Q. Lei, Y. Zhou, Z. Ren // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. Vol. 121. P. 293–320. <https://doi.org/10.1002/2015JB012355>

A Seismotectonic Zonation Map of Eastern Siberia: New Principles and Methods of Mapping / L. P. Imaeva, V. S. Imaev, O. P. Smekalin, N. N. Grib // Open Journal of Earthquake Research. 2015. Vol. 4. P. 115–125. <http://dx.doi.org/10.4236/ojer.2015.44011>

Active faulting and paleoseismology along the Bree fault, lower Rhine graben, Belgium / M. Meghraoui, T. Camelbeeck, K. Vanneste, M. Brondeel // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105 (B6). P. 13,809–13,841. <https://doi.org/10.1029/1999JB900236>

Active tectonics research using trenching technique on the south-eastern section of the Sudetic Marginal Fault (NE Bohemian Massif, central Europe) / P. Štěpančíková, J. Hók, D. Nývlt, J. Dohnal, I. Sýkorová, J. Stemberk // Tectonophysics. 2010. Vol. 485. P. 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.01.004>

Bonilla M. G., Mark R. K., Lienkaemper J. J. Statistical relations among earthquake magnitude, rupture length and surface fault displacement // Bull. Seism. Soc. Amer. 1984. Vol. 74, N 6. P. 2379–2412.

Evaluating Quaternary activity versus inactivity on faults and folds using geomorphological mapping and trenching: Seismic hazard implications / D. Carbonel, F. Gutiérrez, J. Sevil, J. P. McCalpin // Geomorphology. 2019. Vol. 338. P. 43–46. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.015>

Finding the buried record of past earthquakes with GPR – based palaeoseismology: a case study on the Hope fault, New Zealand. / S. Beauprêtre, S. Garambois, I. Manighetti, J. Malavieille, G. Senechal, M. Chatton, T. Davies, C. Larroque, D. Rousset, N. Cotte, C. Romano // Geophys. J. Int. 2012. Vol. 189. P. 73–100. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05366.x>

GPR measurements to assess the characteristics of active faults in Mongolia / M. Bano, J.-R. Dujardin, A. Schlupp, N. Tsend-Ayush, U. Munkhuu // SANE2017-43/ 2017. Vol. 117, N 222. P. 1–6.

Lunina O.V., Denisenko I. A. Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data // Journal of Structural Geology. 2020. Vol. 141. P. 104209. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104209>

Lunina O. V., Gladkov A. A. Rupturing in the deltaic deposits of Cape Rytyi on the northwestern shore of Lake Baikal (based on aerial photography data) // Russian Geology and Geophysics. 2022. Vol. 63, N 2. P. 149–162. <https://doi.org/10.15372/GiG2020204>

McCalpin J. P. Paleoseismology. 2nd ed. Amsterdam : Academic Press, Elsevier, 2009. 613 p.

McClymont A. F., Villamor P., Green A. G. Fault displacement accumulation and slip rate variability within the Taupo Rift (New Zealand) based on trench and 3-D ground penetrating radar data // Tectonics. 2009. Vol. 28. P. TC4005. <https://doi.org/10.1029/2008TC002334>

Shallow subsurface structure of the 2009 April 6 Mw 6.3 L'Aquila earthquake surface rupture at Paganica, investigated with ground-penetrating radar / G. P. Roberts, B. Raithatha, G. Sileo, A. Pizzi, S. Pucci, J. F. Walker, M. Wilkinson, K. McCaffrey, R. J. Phillips, A. M. Michetti, L. Guerrieri, A. M. Blumetti, E. Vittori, P. Cowie, P. Sammonds, P. Galli, P. Boncio, C. Bristow, R. Walters // Geophys. J. Int. 2010. Vol. 183. P. 774–790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04713.x>

Slip distribution on active normal faults measured from LiDAR and field mapping of geomorphic offset: an example from L'Aquila, Italy, and implications for modelling seismic moment release / M. Wilkinson, G.P. Roberts, K. McCaffrey, P. Cowie, J. P. Faure Walker, I. Papanikolaou,

R. J. Phillips, A. M. Michetti, E. Vottory, L. Gregory, L. Wedmore, Z. K. Watson // *Geomorphology*. 2015. Vol. 237. P. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.026>.

Wells D. L., Coppersmith K. J. New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84, N 4. P. 974–1002.

References

Burmeister A.A., Kostyunin O.V. *Tainy Baikala: Gnevnyi mys Rytyi* [Secrets of Baikal: Wrathful Cape Rytvi]. Irkutsk, Oblmashinform Publ., 2006, 159 p. (in Russian)

Geologicheskaya karta masshtaba 1:200 000, seriya Pribaikalskaya, list № 49-XIX [Geological Map. 1974. Scale 1:200,000, Pribaikal'skaya Series, Sheet No. 49-XIX]. Moscow, Aerogeologiya Publ., 1974. (in Russian)

Lunina O.V. *Vliyanie napryazhennogo sostoyaniya litosfery na sootnoshenie parametrov i vnutrennyuyu strukturu seismoaktivnykh razlomov* [Influence of the lithosphere state of stresses on the relationships of the parameters and inner structure of seismically active faults]. Cand. sci. diss. abstr. Irkutsk, 223 p. (in Russian)

Chipizubov A.V., Mel'nikov A.I., Stolpovskii A.V., Baskakov V.S. Paleoseismodislotsatsii i paleozemletryaseniya v predelakh Baikalo-Lenskogo zapovednika (zona Severobaikal'skogo razloma) [Paleoseismic dislocations and paleoearthquakes within the Baikal-Lena Reserve (zone of the Severobaikal'sky fault)]. *Proceedings of Baikal-Lena State Nature Reserve*, 2003, issue 3, Irkutsk, pp. 6–18. (in Russian)

Seismotektonika i seismichnost riftovoi sistemy Pribaikaliya [Seismotectonics and Seismicity of the Rift System of Pribaikalie]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 220 p. (in Russian)

Strom A.L., Nikonov A.A. Sootnosheniya mezhd parametrami seismogennykh razryvov i magnitudoi zemletryaseni [Numerical parameters of seismic faults and their use in paleoseismology and engineering geology]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* [Physics of the Earth], 1997, N 12, pp. 55–67.

Middleton T.A., Walker R.T., Parsons B., Lei Q., Zhou Y., Ren Z. A major, intraplate, normal-faulting earthquake: The 1739 Yinchuan event in northern China. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2016, vol. 121, pp. 293–320. <https://doi.org/10.1002/2015JB012355>.

Imaeva L.P., Imaev V.S., Smekalin O.P., Grib N.N. A Seismotectonic Zonation Map of Eastern Siberia: New Principles and Methods of Mapping. *Open Journal of Earthquake Research*, 2015, vol. 4, pp. 115–125. <http://dx.doi.org/10.4236/ojer.2015.44011>.

Meghraoui M., Camelbeck T., Vanneste K., Brondeel M. Active faulting and paleoseismology along the Bree fault, lower Rhine graben, Belgium. *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105 (B6), pp. 13,809–13,841. <https://doi.org/10.1029/1999JB900236>.

Štěpančíková P., Hók J., Nývlt D., Dohnal J., Sýkorová I., Stemberk J. Active tectonics research using trenching technique on the south-eastern section of the Sudetic Marginal Fault (NE Bohemian Massif, central Europe). *Tectonophysics*, 2010, vol. 485, pp. 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.01.004>.

Bonilla M.G., Mark R.K., Lienkaemper J.J. Statistical relations among earthquake magnitude, rupture length and surface fault displacement. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1984, vol. 74 (6), pp. 2379–2412.

Carbonel D., Gutiérrez F., Sevil J., McCalpin J.P. Evaluating Quaternary activity versus inactivity on faults and folds using geomorphological mapping and trenching: Seismic hazard implications. *Geomorphology*, 2019, vol. 338, pp. 43–60. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.015>

Beauprêtre S., Garambois S., Manighetti I., Malavieille J., Senechal G., Chatton M., Davies T., Larroque C., Rousset D., Cotte N., Romano C. Finding the buried record of past earthquakes with GPR – based palaeoseismology: a case study on the Hope fault, New Zealand. *Geophys. J. Int.*, 2012, vol. 189, pp. 73–100. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05366.x>.

Bano M., Dujardin J-R., Schlupp A., Tsend-Ayush N., Munkhuu U. GPR measurements to assess the characteristics of active faults in Mongolia. *IEICE Technical Report*, 2017, no. SANE2017-43 (2017–10), pp. 1–6.

Lunina O.V., Denisenko I.A. Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data. *Journal of Structural Geology*, 2020, vol. 141, pp. 104209. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104209>.

Lunina O. V., Gladkov A. A. Rupturing in the deltaic deposits of Cape Rytyi on the north-western shore of Lake Baikal (based on aerial photography data). *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. (2), pp. 149-162. <https://doi.org/10.15372/GiG2020204>.

McCalpin J.P. *Paleoseismology*. 2nd ed. Amsterdam, Academic Press, Elsevier, 2009, 613 p.

McClymont A.F., Villamor P., Green A.G. Fault displacement accumulation and slip rate variability within the Taupo Rift (New Zealand) based on trench and 3-D ground penetrating radar data. *Tectonics*, 2009, vol. 28, p. TC4005. <https://doi.org/10.1029/2008TC002334>.

Roberts G.,P., Raithatha B., Sileo G., Pizzi A., Pucci S., Walker J.F., Wilkinson M., McCaffrey K., Phillips R.J., Michetti A.M., Guerrieri L., Blumetti A.M., Vittori E., Cowie P., Sammonds P., Galli P., Boncio P., Bristow C., Walters R. Shallow subsurface structure of the 2009 April 6 Mw 6.3 L'Aquila earthquake surface rupture at Paganica, investigated with ground-penetrating radar. *Geophys. J. Int.*, 2010, vol. 183, pp. 774–790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04713.x>.

Wilkinson M., Roberts G.P., McCaffrey K., Cowie P., Faure Walker J.P., Papanikolaou I., Phillips R.J., Michetti A.M., Vottory E., Gregory L., Wedmore L., Watson Z.K. Slip distribution on active normal faults measured from LiDAR and field mapping of geomorphic offset: an example from L'Aquila, Italy, and implications for modelling seismic moment release. *Geomorphology*, 2015, vol. 237, pp. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.026>.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, vol. 84 (4), pp. 974–1002.

Сведения об авторах

Лунина Оксана Викторовна
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник,
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: lounina@crust.irk.ru

Денисенко Иван Александрович
младший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: denisenkoivan.1994@mail.ru

Брага Карлос Энрике Герра
студент, геолого-географический факультет
Томский государственный университет
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
e-mail: carloshenrique_gb@hotmail.com

Information about the authors

Lunina Oksana Viktorovna
Doctor of Sciences (Geology and
Mineralogy), Principal Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: lounina@crust.irk.ru

Denisenko Ivan Alexandrovich
Junior Research Scientist
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: denisenkoivan.1994@mail.ru

Braga Carlos Henrique Guerra
Student, Faculty of Geology and Geography
Tomsk State University
36, Lenin st., Tomsk, 634050, Russian
Federation
e-mail: carloshenrique_gb@hotmail.com

Код научной специальности: 25.00.03

Статья поступила в редакцию 07.04.2022; одобрена после рецензирования 04.05.2022; принята к публикации 07.06.2022

The article was submitted April, 7, 2022; approved after reviewing May, 04, 2022; accepted for publication June, 7, 2022