



УДК 551.243.1(571.54)  
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.70>

## Особенности вертикальных смещений вдоль Дельтового разлома при Цаганском землетрясении 1862 г. на Байкале

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

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

**Аннотация.** По комплексу георадиолокационных, геологических и морфоструктурных данных реконструированы и изучены особенности одноактных вертикальных смещений в голоценовых отложениях различной компетентности вдоль сухопутного и подводного сегментов Дельтового разлома, активизированного при Цаганском землетрясении 12.01.1862 магнитудой  $M \sim 7,5$  (юго-восточный борт Байкальского рифта). Показано, что амплитуда, определяемая по морфологии уступа с учетом положения главного разрыва в разрезе, отражает полную величину подвижки, которая складывается из суммы разрывной и пластической компонент деформации. Отмечено, что наличие в геологическом разрезе водонасыщенных слаболитифицированных отложений увеличивает вклад пластической составляющей, при этом возрастает ширина зоны разрывов и уменьшается угол падения главного разрыва.

**Ключевые слова:** георадиолокация, Дельтовый разлом, залив Провал, Цаганское землетрясение, параметры, смещение.

**Для цитирования:** Лунина О. В., Денисенко И. А., Гладков А. А. Особенности вертикальных смещений вдоль Дельтового разлома при Цаганском землетрясении 1862 г. на Байкале // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 37. С. 70–85. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.70>

### Введение

Тектоническое смещение по сейсмогенному разрыву является важнейшим параметром для оценки магнитуды прошлых и будущих землетрясений. Его распределение по простиранию структуры сильно изменчиво [Active faulting and ... , 2000; McCalpin, 2009; Reassessment of the ... , 2015; A major, intraplate ... , 2016; Occurrence of partial ... , 2019] и зависит от внутреннего строения (наличия изгибов, эшелонированных трещин и их взаимодействия), геометрии (ориентации и падения главного сместителя) и кинематики (направления подвижки) разломной зоны [Horizontal strain-rates ... , 2009; Slip distribution on ... , 2015]. Структурные неоднородности еще больше проявляются в слабосцементированных и рыхлых осадках различной компетентности, так как их механические свойства, мощности слоев и особенности трения на границах скольжения влияют на зарождение и рост нарушений, их положение в пространстве и процессы, происходящие в разломной зоне [Ferrill, Morris, 2008; Morris, Ferrill, McGinnis, 2009; Roche, Homberg, Rocher,

2012]. В связи с этим при оценке сейсмической опасности существенное значение имеет как качество, так и количество измерений одноактных амплитуд смещений на разных сегментах активного разлома.

Цаганское землетрясение 12.01.1862 магнитудой  $M \sim 7,5$  является самым сильным на Байкале за последние 160 лет, а его последствия хорошо описаны в литературе [Демин, 2005]. Сейсмическое событие произошло в результате смещения по Дельтовому разлому, который простирается вдоль юго-восточного побережья оз. Байкал, отсекая от основной части суши дельту р. Селенги (рис. 1) и образовавшийся залив Провал общей площадью около  $230 \text{ км}^2$  [The formation of ... , 2012]. Озеро заполняет Байкальскую впадину, которая является центральным звеном одноименной рифтовой зоны, развивающейся в самом сердце Азии с конца мела по настоящее время [Mats, Perepelova, 2011].

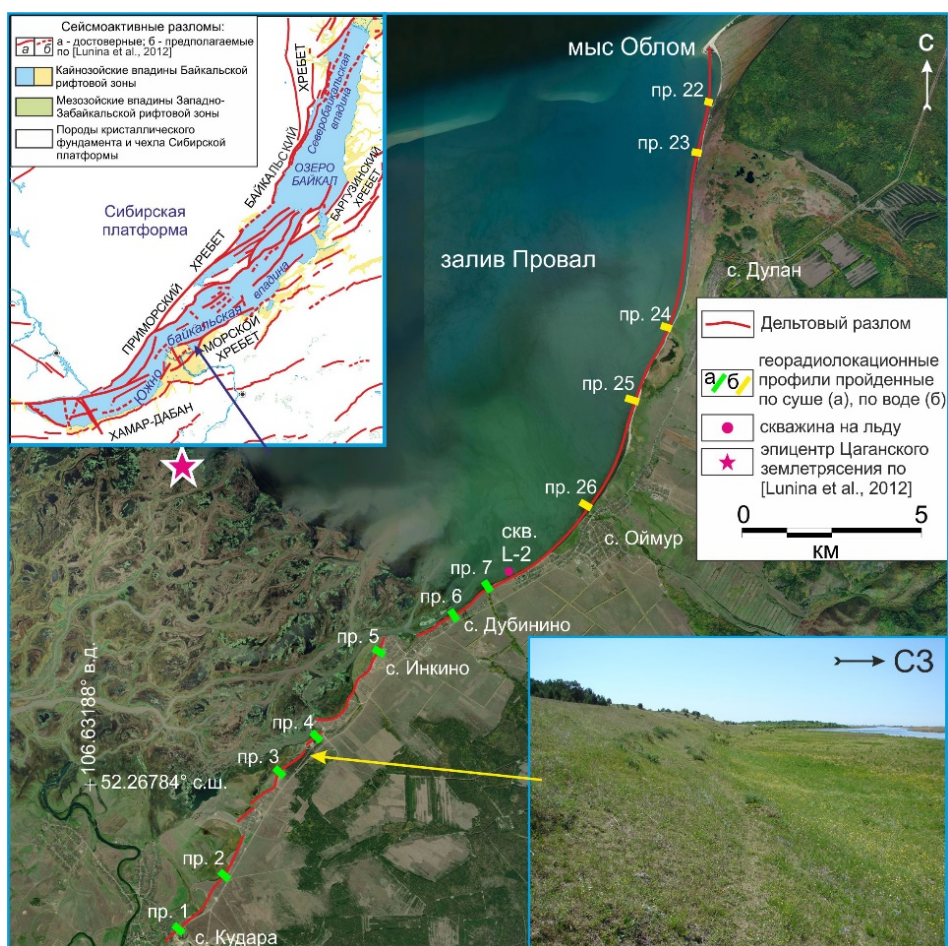


Рис. 1. Расположение георадиолокационных профилей в эпицентральной зоне Цаганского землетрясения на юго-восточном побережье оз. Байкал

На основе морфоструктурного анализа и геолого-структурной интерпретации георадиолокационных данных нами были реконструированы амплитуды подвижек при Цаганском землетрясении и показано, что при формировании сейсмогенного уступа большую роль играла пластическая компонента смещения, которая влияет на угол падения плоскости разрыва, ширину зоны и амплитуду смещения [Lunina, Denisenko, 2020], что важно для прогнозной оценки деформаций при землетрясениях на участках со сходными свойствами грунтов. Данные работы проведены для сегментов Дельтового разлома, расположенных в пределах суши. Целью настоящей работы было дополнить эти исследования георадарными профилями, выполненными в прибрежной части акватории залива Провал через предполагаемый сместитель под водой, и их интерпретацией с возможной оценкой смещений.

### **Методика исследования**

Базовым методом в исследованиях послужила георадиолокация (GPR), основанная на излучении электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [Владов, Старовойтов, 2004]. В последние годы метод интенсивно развивается и применяется в различных областях знаний. Сейчас уже доказана его высокая эффективность при изучении разрезов горных пород, в том числе при изучении зон сейсмогенных разрывов и определении амплитуд смещений по разломам [McClymont, Villamor, Green, 2009; Finding the buried ..., 2012; GPR measurements to ..., 2017]. Для успешного решения практических задач важен выбор адекватного оборудования и комплексирования георадиолокации с другими прямыми и косвенными методами исследования. В настоящей работе использовался георадар «ОКО-2» с антенными блоками АБ-250М с частотой 250 МГц на суше и АБДЛ «Трифон» с частотой 100 МГц на воде, бурение скважин буровым станком УКБ 12/25 и проходка канав. По мере накопления мирового опыта георадиолокация будет становиться все более самостоятельным методом исследования, что способствует удешевлению стоимости сейсмогеологических изысканий и благоприятно скажется на экологии изучаемых регионов. В связи с этим настоящая работа также важна в методическом аспекте.

Полевые исследования на суше выполнялись в 2013, 2015 и 2018 гг. на 7 участках, расположенных в 1,3–3,4 км друг от друга в пределах сегмента длиной ~ 15 км (см. рис. 1). На каждом из них вкрест простирания разломного уступа сделано от 2 до 5 георадарных и гипсометрических профилей длиной 30–130 м, из которых впоследствии выбрано по одному профилю. Критерием для выбора послужили дополнительные геологические данные, полученные по результатам документации канав и малоглубинных скважин и позволяющие уверенно интерпретировать радарограммы с достаточно точным подбором диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 5,1$ ). Расположение участков работ было организовано таким образом, чтобы через равное расстояние охватить весь уступ Дельтового разлома, вдоль которого проходил сейсмогенный разрыв Цаганского землетрясения 1862 г. на суше. В северо-восточной части за с. Оймур эта структура скрывается под водами залива Провал.

В акватории залива Провал летом 2015 г. было организовано 5 георадарных профилей длиной 118–226 м, расположенных вкрест простирания береговой линии и предполагаемого под водой Дельтового разлома на участке между с. Оймур и мысом Облом (см. рис. 1). Работы были организованы на лодке, за которой по воде передвигалась антенна АБДЛ «Тритон». После стандартной обработки в программе GeoScan32 с учетом глубины залива на профилях и строения скважины L-2, пробуренной на льду в 2018 г., мы подобрали диэлектрическую проницаемость для всего разреза, равную 56, – среднюю для всего разреза водонасыщенных осадочных слоев и толщи воды,  $\epsilon$  которой равна 81.

### Результаты исследований

**Строение сейсмогенного уступа.** Главный разрыв Цаганского землетрясения 1862 г. образовался на склоне песчано-глинистого увала и прослеживался до д. Манжеево (ныне с. Кудара), исчезая в протоке Харауз [Фитингоф, 1865]. Морфология этого песчаного уступа в настоящее время неравномерна (рис. 1 и 2), что проявляется в разных углах наклона его откоса – от 0 до 39°, разной высоте – от 5,19 до 20,44 м и наличии мелкобугристого оползневого рельефа, хорошо развитого на участках расположения профилей 4, 5 и 6. Местами в пространстве уступ совпадает с озерно-дельтовыми 1-й Кабанской и 2-й Кударинской террасами, осложненными эоловыми формами [Эоловые и абразионные ... , 2006]. Высота увала до Цаганского землетрясения составляла с юго-запада на северо-восток ~ 1,35; ~ 0,61; ~ 5,6; ~ 15,51; ~ 3,85; ~ 0 и ~ 3,38 м, достигая наибольшей величины в районе д. Инкино [Lunina, Denisenko, 2020].

Уступ сложен переслаивающимися разноцветными песками различной зернистости, супесями, суглинками и глинами, интенсивно нарушенными разрывными и пластическими деформациями (рис. 3). Последние связаны с процессами разжижения и флюидизации, о чем свидетельствуют инъекционные дайки, лимонитизация осадков, а также характерные изгибы слоев и следы течения материала в канавах и разрезах [Lunina, Andreev, Gladkov, 2012]. Уровень грунтовых вод под верхней площадкой увала, на котором расположены села, по данным бурения скважин, находится на глубинах ~ 7,5–18 м и глубже; у подножия уступа уменьшается до 1–3 м. Близость грунтовых вод к поверхности и высокая водонасыщенность пластов обеспечили повышенную пластичность отложений при их сейсмогенном деформировании.

На радарограммах разрывы выражены смещением георадарных комплексов вдоль резко падающих осей синфазности, или «прозрачных» зон (нитей), где амплитуда сигнала заметно слабее (см. рис. 2). За пределами зоны нарушений волновая картина на всех радарограммах характеризуется преимущественно протяженными осями синфазности разной интенсивности, свидетельствующими о спокойном залегании толщ.

**Смещения на суше.** В пределах первых 6 м от поверхности смещение при Цаганском землетрясении реализовалось в условиях СЗ–ЮВ растяжения

путем формирования ступенчатой системы сбросов и грабенов с падением главного сместителя на СЗ под углами  $56\text{--}76^\circ$  вдоль всего уступа. Полные вертикальные амплитуды, включающие обе компоненты смещения, по данным георадиолокации на профилях, с ЮЗ на СВ составили 3,83; 9,59; 2,4; 4,27; 9,28; 6,6 и 1,81 м, что с разницей 0,03–0,47 м соответствует вертикальному смещению  $H1$ , определенному по геометрии разломного уступа с учетом падения главного сместителя. Разрывные компоненты деформации составили 2,32; 5,54; 1,93; 3,0; 6,07; 4,2 и 1,58 м. Вклад пластической компоненты в общее смещение варьирует от 13 до 42 %, видимая ширина зоны разрывов – от 2,55 до 20 м. Обоснование этих выводов изложено в [Lunina, Denisenko, 2020].

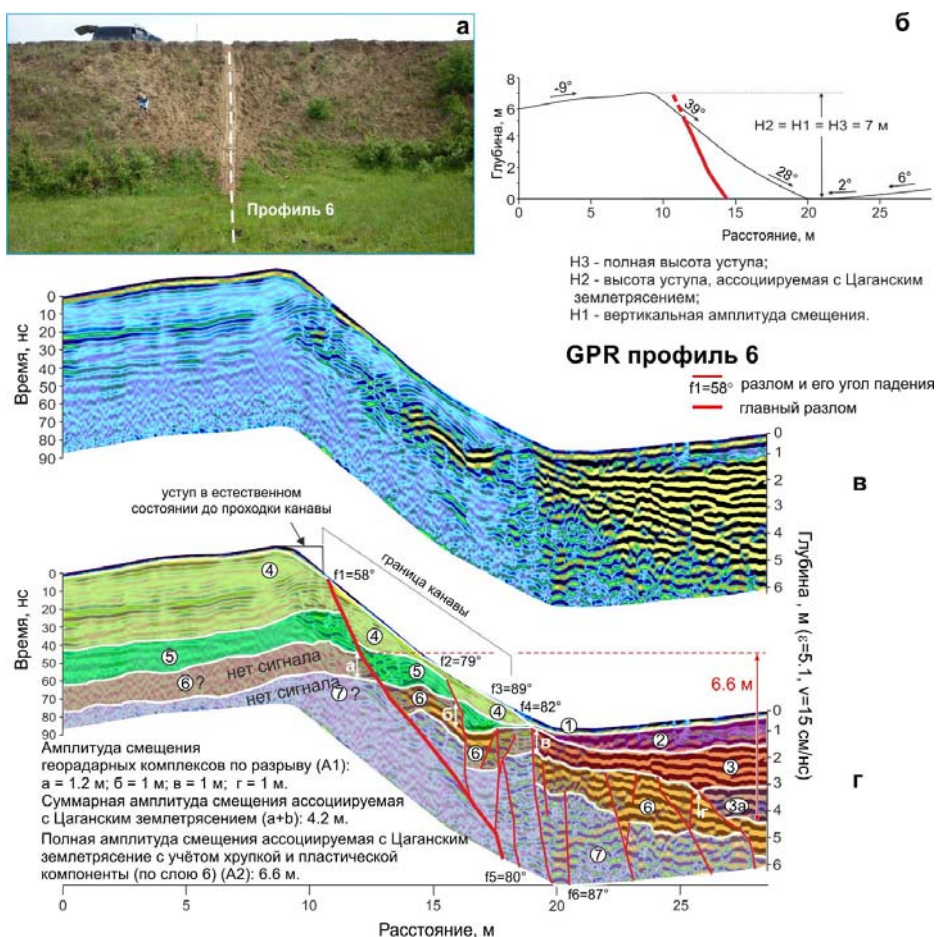


Рис. 2. Пример георадиолокационного профиля на суше в районе с. Дубинино, выполненного георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250М: *а* – положение профиля на участке исследования, *б* – гипсометрический профиль уступа, *в* – первичная радарограмма, *г* – радарограмма с интерпретацией. Цифрами на радарограмме указаны георадарные комплексы, соответствующие осадочным слоям с разными электрофизическими свойствами. Вертикальный и горизонтальный масштабы 1:1

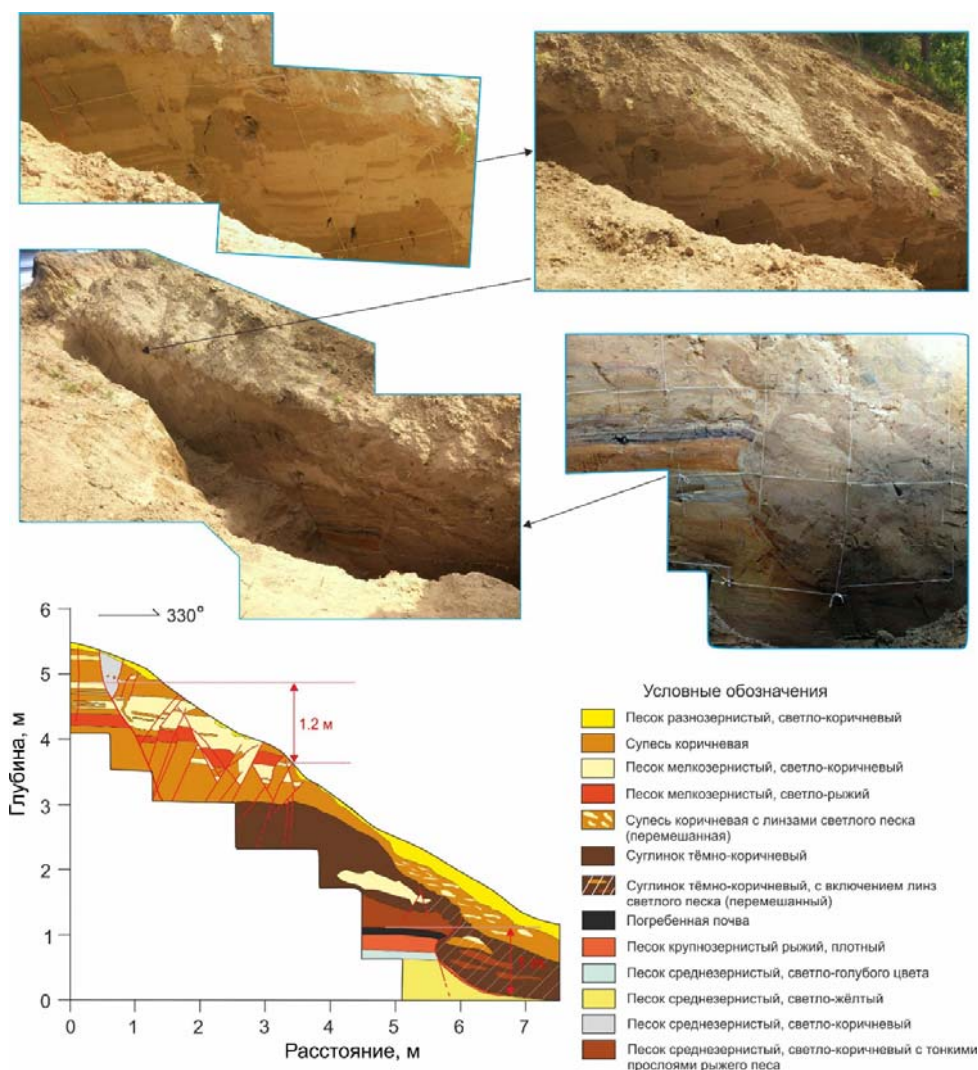


Рис. 3. Канва, вскрывающая сейсмогенный уступ в районе с. Дубинино на профиле б (положение профиля см. на рис. 2)

Пример определения разрывной и полной амплитуд вертикального смещения на удалении от разрыва показан на одном из георадарных профилей (см. рис. 2), интерпретированном с учетом строения разреза в канаве (см. рис. 3). Аналогичный подход к оценке смещения, но в естественном обнажении горных пород использован в работе [The brittle and ... , 2017].

**Смещения под водой.** На профилях, пройденных в прибрежной части акватории залива Провал, по волновой картине в осадочном наполнении выделяется 4 георадарных комплекса (рис. 4, обозначены на профилях 22 и 26). Бурение скважины L-2 со льда в ~ 50 м от берега в марте 2018 г. в 2,8 км юго-западнее профиля 26 (см. рис. 1) показывает, что отложения ниже льда и

льда с песком мощностью 0,45 м представлены мерзлым песком, серым илом, илистыми и тонко-, мелко-, среднезернистыми переслаивающимися песками, составляющими георадарные комплексы 1 и 2. На глубине 2,82–3,49 м в песке встречаются куски травянистой растительности, а на глубине 3,80–3,92 м – серая степная почва с зернами кварца и полевого шпата, погребенная вместе с ветками и травой при Цаганском землетрясении. Эти два слоя на радарограмме профиля 26 объединены в один комплекс 3, хотя внутри него можно было бы выделить две фации, так как в верхней части амплитуда сигнала чуть выше. На глубине 4,12–4,26 м появляется серый суглинок, который, очевидно, и гасит электромагнитный сигнал, что хорошо видно на радарограммах (рис. 4). Этот и ниже залегающий коричневый песок соответствует комплексу 4. В целом по составу отложений разрез согласуется с описанными ранее по бурению скважин в центральной части залива Провал [Natural microchronicle of ... , 2006; Sedimentation in Proval ... , 2010] и подтверждает подобранную диэлектрическую проницаемость, что важно при оценке смещения.

Георадарные разрезы по строению можно разделить на три группы. Профили 22 и 23, расположенные ближе к мысу Облом, очень подобны друг другу (1-я группа). Четкие смещения осей синфазности позволяют откартировать главный сейсмогенный разрыв в 27 и 19 м от начала профилей 22 и 23 соответственно. Разрывные смещения по ним составили 0,6 и 0,8 м, в то время как полное смещение на удалении от сместителя – 1,3 и 1,4 м. Профиль 24 (2-я группа) несколько отличается от предыдущих и ближе по структуре дна к профилям 25 и 26 (3-я группа). На нем также хорошо по смещению осей синфазности выделяется главный сместитель, разрывное смещение по которому составило 1,4, полное – 1,9 м.

На профиле 25 отчетливо видно погружение смещенного слоя в висячем крыле в сторону главного разрыва под углом 15–25°. На рис. 4 он смотрится круче из-за увеличения вертикального масштаба в 4 раза по отношению к горизонтальному. По этой же причине значительно круче выглядят и дизъюнктивы на всех разрезах, хотя их реальное падение, измеренное на радарограммах при одинаковом вертикальном и горизонтальном масштабах, на профиле 22 – 60°, 23 – 50°, 24 – 40°, 25 – 55°, 26 – 50°. Полное смещение по профилю 25 составило 2,4 м. Выделить отдельно пластическую и разрывную составляющие здесь не удалось.

По профилю 26 смещение по главному разрыву не определено, но видно, что накопилось не менее 1,5–2,2 м осадков. Ближе к дельте р. Селенги, в 2,8 км юго-западнее данного разреза, погребенный при Цаганском землетрясении слой в скважине L-2 перекрыт осадочным слоем мощностью 3,35 м, что в целом согласуется с данными в [Natural microchronicle of recent ... , 2006], с учетом того, что скорости современного осадконакопления в разных местах залива Провал резко отличаются и зависят от близости р. Селенги.

Исходя из полученных данных о разрывном и полном смещениях, вклад пластической компоненты в подвижку при Цаганском землетрясении составил от 26 % на профиле 24 до 43 % на профиле 23 и 54 % на профиле 22.

При этом мы не рассматривали вторичные разрывы, которые обеспечили грабенообразное строение сейсмогенной зоны Дельтового разлома под водой. Нет сомнений, и предшественники высказывались об этом, что большую роль при образовании залива Провал сыграли гравитационные силы, поэтому ширина зоны деформаций довольно широкая (более 100 м) и определить генезис вторичных разрывов не представляется возможным.

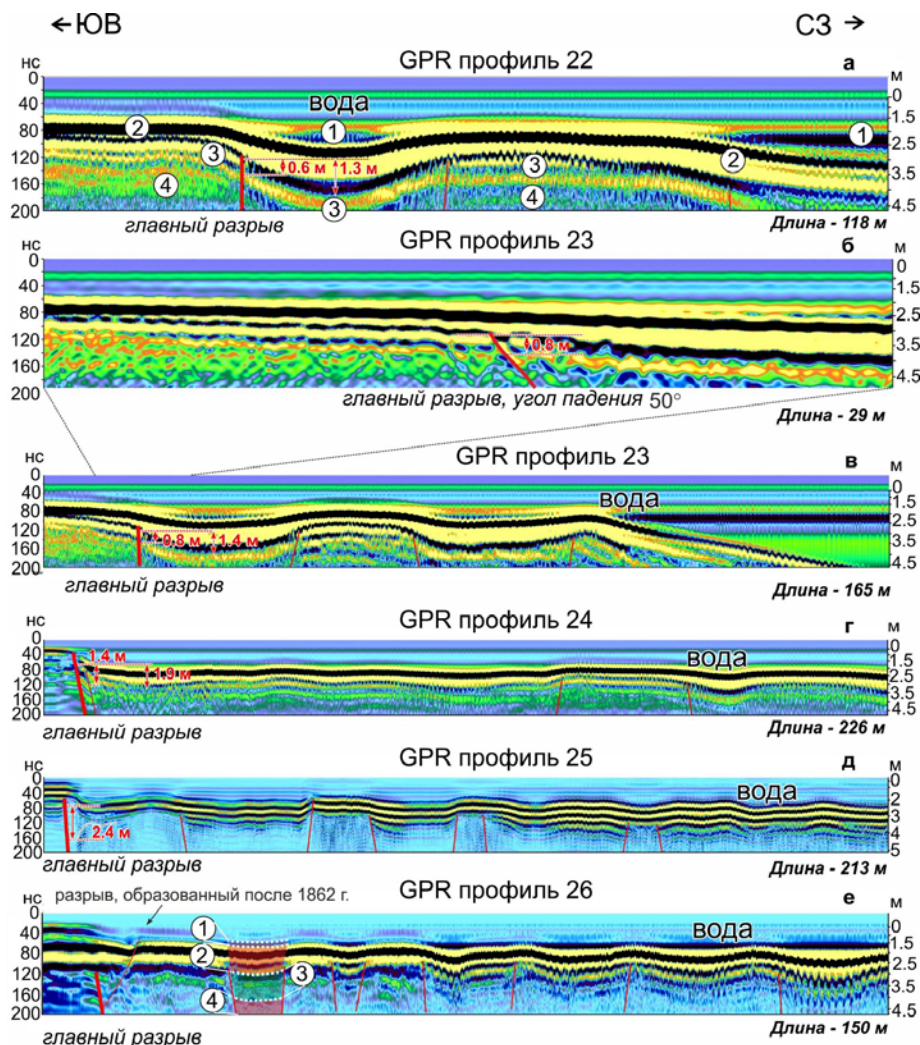


Рис. 4. Георадарные профили, выполненные георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон», вкрест простираения Дельтового разлома в прибрежной части акватории залива Провал. Цифрами в кружках на профилях 22 и 26 показаны георадарные комплексы, различающиеся по волновой картине. Аналогичные комплексы выделяются на профилях 23, 24, 25. На профиле 26 комплексы дополнительно выделены цветом (фрагмент). Вертикальный масштаб на рис. а, в, г, д, е в 4 раза больше горизонтального, на рис. б (фрагменте профиля 23) – масштаб 1:1



### Обсуждение результатов

Сравнивая особенности распределения смещений в зоне главного сейсмогенного разрыва на суше и под водой, можно отметить, что они неравномерные и в целом их амплитуды больше на сухопутном сегменте Дельтового разлома (рис. 5). Более того, имеется тенденция к уменьшению вертикального смещения слоев в сторону мыса Облом, хотя глубина залива при удалении от берега и СЗ окончания профилей 22 и 23, по данным съемки рельефа дна залива Провал в 1898 г. [Дриженко, 1908], больше, чем в других местах. Это связано с тем, что участки больших глубин близки к оз. Белое, которое существовало в Цаганской степи до землетрясения. Вблизи берега глубины сильно изменчивы и варьируют от 2 до 12 футов (0,61–3,66 м), а самая большая измерена в районе профиля 25, что коррелирует с наибольшим оцененным смещением, подтверждая, таким образом, правильность нашей интерпретации.

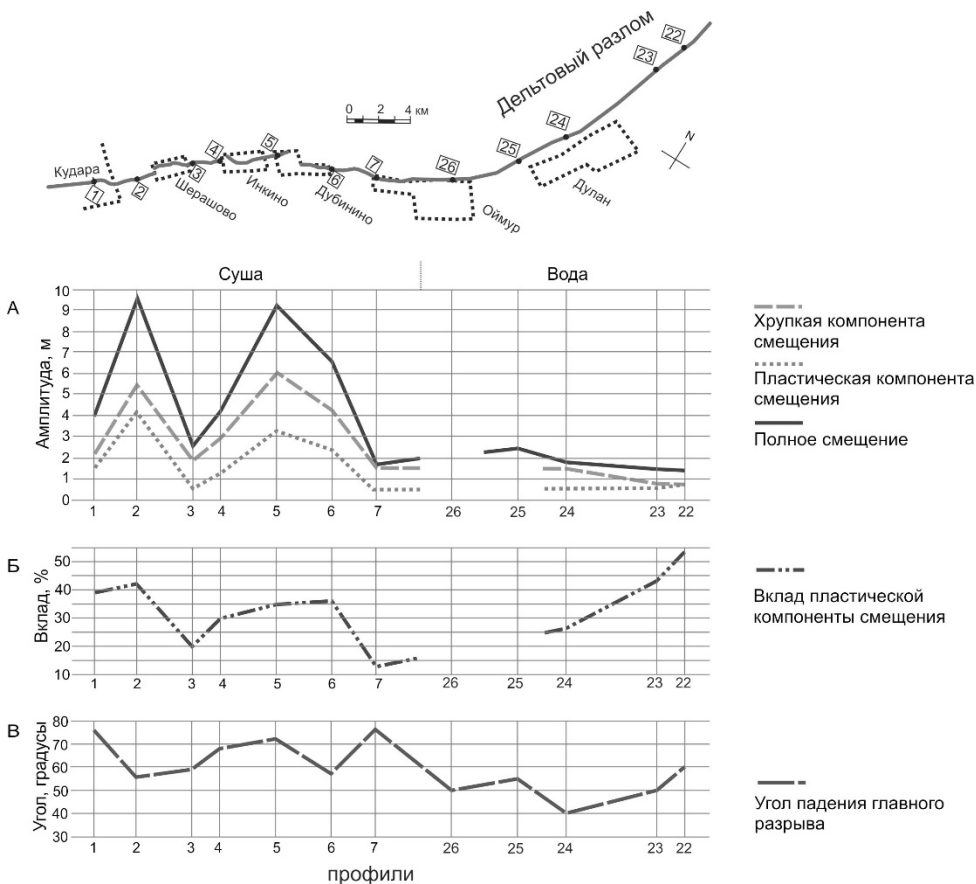


Рис. 5. Графики распределения параметров смещений при Цаганском землетрясении и угла падения главного сместителя Дельтового разлома

Тулохонов с соавторами [Natural microchronicle of recent ... , 2006] отметили, что глубина залива Провал существенно не изменилась с момента промеров в 1898 г. Это должно означать, что скорость накопления наносов примерно равна скорости проседания сейсмогенной структуры, хотя, если принять во внимание подъем уровня Байкала на 1,1 м в 1958–1964 гг. в результате строительства Иркутской ГЭС, мы должны признать, что скорость накопления осадков несколько выше, чем скорость опускания бухты. Таким образом, погружение Цаганской степи и ныне залива Провал, связанное с землетрясением 1862 г., является результатом как тектонических, так и гравитационных процессов, вызванных после события слабой и умеренной сейсмичностью в оз. Байкал, а также уплотнением отложений.

Исследуя особенности сейсмогенной деструкции вдоль сухопутного сегмента Дельтового разлома, мы установили тенденцию, что максимальные вклады пластической компоненты смещения соответствуют минимальным углам падения главного сместителя и наибольшим мощностям зон нарушений [Lunina, Denisenko, 2020]. В свою очередь ширина зон нарушений прямо пропорционально зависит от величины подвижки, которая оказывает влияние на угол откоса уступа. В местах наибольших амплитуд он круче, что при сходных условиях денудации закономерно. В местах наибольшего вклада пластической компоненты фиксируются наибольшие величины полного смещения и ширины зон разрывов, что необходимо учитывать при проведении работ по оценке сейсмической опасности в районах с неоднородным строением разрезов, содержащих толщи с прослоями некомпетентных пород.

На подводном сегменте Дельтового разлома ближе к мысу Облом увеличился вклад пластической компоненты в полное смещение, что закономерно связано с большей обводненностью отложений. Хотя в четырех местах этот вклад сопоставим со вкладом, измеренным на суше (см. рис. 5). Это объясняется значительным разжижением отложений во время землетрясения и, соответственно, их пластическим деформированием. На большинстве профилей угол падения главного разрыва меньше в подводной части разреза, чем в надводной. Учитывая наличие второстепенных разрывов, предполагаемых на радарограммах (см. рис. 4), и в целом масштаб опускания, следует признать, что и ширина зоны деформаций была больше в подводной части эпицентральной зоны Цаганского землетрясения, хотя очевидно, что при этом большую роль сыграли гравитационные силы, которые иногда сложно выделить при сбросообразовании в дальней зоне вдали от главного сместителя. Именно поэтому мы не анализировали ширину зоны разрывов в пределах подводного сегмента разлома. В целом следует понимать, что пластическая составляющая в нашем случае может отражать изменение формы слоя не только вследствие постепенного увеличения напряжений, когда пластическая деформация является промежуточной между упругой и разрывной, но и отчасти в результате действия сил гравитации, которые усиливаются после сейсмогенной подвижки в определенных типах горных пород. При этом, безусловно, явные обвалы и оползни не должны включаться в анализ смещений и ширины зон разрывов.

### Заключение

Георадиолокационные исследования в комплексе с данными малоглубинного бурения, тренчинга и морфоструктурного анализа разломного уступа Дельтового разлома на восточном побережье оз. Байкал позволили глубже понять особенности деформационного процесса в рыхлых и слабосцементированных отложениях, содержащих компетентные и некомпетентные осадочные слои. Амплитуда смещений, определяемая по морфологии уступа с учетом положения главного разрыва в разрезе, отражает полную величину подвижки, которая складывается из суммы разрывной и пластической компонент деформации. Наличие в геологическом разрезе водонасыщенных слаболифтифицированных отложений увеличивает вклад пластической составляющей. При этом возрастает ширина зоны разрывов. Углы падения главного разлома в целом меньше в подводной части разреза.

Несмотря на то что северо-восточный сегмент Дельтового разлома оказался под водой на территории залива Провал, наибольшие сейсмотектонические смещения, по данным георадиолокации с привлечением морфоструктурных и геологических данных, произошли в сухопутной юго-западной части структуры в районе профилей 2 и 5, где полное смещение составило 9,59 и 9,28 м соответственно. Таких глубин в заливе Провал ни летом 1862 г. экспедицией Русского географического общества [Орлов, 1872], ни в 1898 г. Гидрографической экспедицией [Дриженко, 1908] зафиксировано не было. Исходя из исторических описаний, вода в течение суток постепенно затапливала луговые и пахотные земли Цаганской степи [Демин, 2005]. Таким образом, вдоль Дельтового разлома под водой сейсмотектонические смещения были относительно небольшими с довольно значительным – от 26 до 53 % – вкладом пластической составляющей. Эта подвижка послужила триггером для сейсмогравитационного опускания залива и уплотнения осадков, которое продолжается и в настоящее время, судя по практически неизменной его глубине с 1862 г. и близости многочисленных сейсмических событий, в том числе последнего землетрясения около залива Провал (09.12.2020)  $M_s = 5,4$ , толчки которого хорошо ощущались в г. Иркутске.

*Авторы благодарны Е. В. Серебрякову, А. С. Гладкову и А. М. Афонькину за помощь при проведении полевых работ. Исследование выполнено в рамках базового бюджетного проекта НИР «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009.*

### Список литературы

Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие. М. : Изд-во МГУ, 2004. 153 с.

Дриженко Ф. К. Атлас озера Байкал / сост. гидрофиз. экспедицией под рук. полковника Ф. К. Дриженко. СПб. : Изд. Гл. гидрогр. упр., 1908, 31 л. (две сборные карты).

Демин Э. В. Антология Провала: Исторические материалы о катастрофическом Цаганском землетрясении 1862 г. – Провале на Байкале. Улан-Удэ : Администрация Кабанского р-на Респ. Бурятия, 2005. 296 с.

*Орлов А. П.* О землетрясениях вообще и о землетрясениях Южной Сибири и Туркестанской области в особенности. Казань : Лито- и тип. К. А. Тилли, 1872. В. 1. 78 с.

*Фитингоф А. Х.* Описание местности при устье реки Селенги, опустившейся от землетрясений 30 и 31 декабря 1861 года // Горный журнал. 1865. Т. 3, № 7. С. 95–101.

Эоловые и абразионные процессы побережий у залива Провал на Байкале / С. Вика, А. Б. Иметхенов, Г. И. Овчинников, В. А. Снытко, Т. Щипек. Иркутск ; Улан-Удэ : ИЗК СО РАН, ИГ им. В. Б. Сочавы СО РАН, БГУ, 2006. 56 с.

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>

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>

*Ferrill D. A., Morris A. P.* Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy, Balcones fault system, Texas // AAPG Bull. 2008. Vol. 92. P. 359–380. <https://doi.org/10.1306/10290707066>

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 // IEICE Technical Report. 2017. N SANE2017-43 (2017–10). P. 1–6.

Horizontal strain-rates and throw-rates across breached relay zones, central Italy: Implications for the preservation of throw deficits at points of normal fault linkage / J. P. F. Faure Walker, G. P. Roberts, P. A. Cowie, I. D. Papanikolaou, P. R. Sammonds, A. M. Michetti, R. J. Phillips // J. Struct. Geol. 2009. Vol. 31, N 10. P. 1145–1160. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.06.011>

*Lunina O. V., Andreev A. V., Gladkov A. S.* The Tsagan earthquake of 1862 on Lake Baikal revisited: a study of secondary coseismic soft-sediment deformation // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53. P. 571–587.

*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>

*Mats V. D., Perepelova T. I.* A new perspective on evolution of the Baikal Rift // Geoscience frontiers, 2011. Vol. 2, N 3. P. 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.06.002>

*McCalpin J. P.* Paleoseismology. 2<sup>nd</sup> 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>

*Morris A. P., Ferrill D. A., McGinnis R. N.* Mechanical stratigraphy and faulting in Cretaceous carbonates // AAPG Bull. 2009. Vol. 93. P. 1459–1470. <https://doi.org/10.1306/04080909011>

Natural microchronicle of recent events in the basin of Lake Baikal // A. K. Tulokhonov, S. G. Andreev, V. B. Batoev, O. V. Tsydenova, O. M. Khlystov // Russian Geology and Geophysics. 2006. Vol. 47, N 9. P. 1030–1034.

Occurrence of partial and total coseismic ruptures of segmented normal fault system: Insight from the Central Apennines, Italy / F. Iezzi, G. Roberts, J. F. Walker, I. Papanikolaou // J. Struct. Geol. 2019. Vol. 126. P. 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.05.003>

Reassessment of the 1892 Laguna Salada Earthquake: Fault Kinematics and Rupture Patterns / T. K. Rockwell, J. M. Fletcher, O. J. Teran, A. P. Hernandez, K. J. Mueller, J. B. Salisbury, S. O. Akciz, P. Štěpančíková // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105, N 6. P. 1–9. <https://doi.org/10.1785/0120140274>

*Roche V., Homberg C., Rocher M.* Architecture and growth of normal fault zones in multilayer systems: a 3D field analysis in the South-Eastern Basin, France // *J. Struct. Geol.*, 2012. Vol. 37. P. 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.02.005>

Sedimentation in Proval Bay (Lake Baikal) after earthquake-induced subsidence of part of the Selenga River delta / E. G. Vologina, I. A. Kalugin, Yu. N. Osukhovskaya, M. Sturm, N. V. Ignatova, Ya. B. Radziminovich, A. V. Dar'in, M. I. Kuz'min // *Russian Geology and Geophysics.* 2010. Vol. 51, N 12. P. 1275–1284.

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>

The brittle and ductile components of displacement along fault zones // C. Homberg, J. Schnyder, V. Roche, V. Leonardi, M. Benzaggagh // *Geol. Soc. Lond., Special Publications.* 2017. Vol. 439. P. 395–412. <https://doi.org/10.1144/SP439.21>

The formation of Proval Bay as an episode in the development of the Baikal rift basin: A case study / A. A. Shchetnikov, Ya. B. Radziminovich, E. G. Vologina, G. F. Ufimtsev // *Geomorphology.* 2012. Vol. 177–178, P. 1–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.023>

## Particularities of Vertical Displacements Along the Delta Fault During the 1862 Tsagan Earthquake on Lake Baikal

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

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

**Abstract.** Based on the ground penetrating radar, geological and morphostructural data, the particularities of single-event vertical displacements in Holocene sediments of various competencies along the land and underwater segments of the Delta fault activated on January 12, 1862 during the  $M \sim 7.5$  Tsagan earthquake (southeastern side of the Baikal rift). It is shown that the slip determined from the scarp morphology and the position of the main rupture in the section reflects the total displacement value, which is the sum of the brittle and plastic deformational components. The presence of water-saturated poorly consolidated sediments in the geological section increases the contribution of the plastic component. In this case, the width of the rupture zone increases. Despite the fact that the northeastern segment of the Delta Fault was submerged in the water of Proval Bay, the largest seismotectonic displacements occurred between the villages of Kudara and Sherashevo and on the outskirts of the village Dubinino in the land southwestern part of the structure, where the total displacement was 9,59 and 9,28 m, respectively. No such depths were recorded in Proval Bay after the earthquake. Along the Delta Fault under water, seismotectonic displacements were relatively small with a rather significant contribution of the plastic component from 26 to 53 %. This slip was a trigger for the seismic-gravity subsidence of the bay and sediment compaction, which continues to this day, judging by its almost unchanged depth since 1862 and the proximity of numerous seismic events, including the last  $M_s = 5.4$  09.12.2020 earthquake happened on December 9, 2020 and strongly felt in Irkutsk.

**Keywords:** ground penetrating radar, Delta Fault, Lake Baikal, Thagan earthquake, parameters, displacement.

**For citation:** Lunina O.V., Denisenko I.A., Gladkov A.A. Particularities of Vertical Displacements Along the Delta Fault During the 1862 Tsagan Earthquake on Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 37, pp. 70-85. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.70> (in Russian)

### References

Vladov M.L., Starovoitov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu. Uchebnoe posobie* [Fundamentals of GPR Surveys. A Manual]. Moscow, Moscow University Press, 2004, 153 p. (in Russian)

Drizhenko F.K. *Atlas ozepa Baikala. Sostavlenn gidrofizicheskoi ekspeditsiei pod rukovodstvom polkovnika F.K. Drizhenko* [Atlas of Lake Baikal. Compiled by Gydrophysical expedition under guidance of colonel F.K. Drizhenko]. St. Petersburg, Main hydrogr. administration press., 1908, 31 p. (in Russian)

Demin E.V. *Antologiya Provala: Istoricheskie materialy o katastroficheskom Tsaganskom zemletryaseni 1862 g. – Provale na Baikale* [Anthology of a Collapse: Historic Accounts of the Catastrophic Tsagan Earthquake of 1862 in Proval Bay, Lake Baikal]. Ulan-Ude, Administration of Kaban region of the Rep. Buryatia, 2005, 296 p. (in Russian)

Orlov A.P. *O zemletryaseniakh voobshche i o zemletryaseniakh Yuzhnoi Sibiri i Turkestanskoi oblasti v osobennosti* [About earthquakes in general and earthquakes in Southern Siberia and the Turkestan region in particular]. Kazan, Litho- and printing house of K.A. Tilly, 1872, B. 1, 78 p.

Fitingof A.Kh. *Opisanie mechnosti pri uct'e reki Selengi, opustivsheysya ot zemletryaceni 30 i 31 dekabrya 1861 goda* [Description of the area at the Selenga Mouth, collapsed by earthquakes of 30 and 31 December 1861]. *Gornyi Zhurnal*, 1865, vol. 3 (7), pp. 95-101. (in Russian)

Wika S., Imetkhenov A.B., Ovchinnikov G.I., Snytko V.A., Szczypek T. *Eolovye i abraziionnye protsessy poberezhii u zaliva Proval na Baikale* [Aeolian and abrasion processes of shore lines near Proval Bay (Lake Baikal)]. Irkutsk, Ulan-Ude, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., Institute of Earth Crust SB RAS Publ., Buryat State University Publ., 2006, 56 p. (in Russian)

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>

Meghraoui M., Camelbeeck 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. 13809-13841. <https://doi.org/10.1029/1999JB900236>

Ferrill D.A., Morris A.P. Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy, Balcones fault system, Texas. *AAPG Bull.*, 2008, vol. 92, pp. 359-380. <https://doi.org/10.1306/10290707066>

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.

Faure Walker J.P.F., Roberts G.P., Cowie P.A., Papanikolaou I.D., Sammonds P.R., Michetti A.M., Phillips R.J. Horizontal strain-rates and throw-rates across breached relay zones, central Italy: Implications for the preservation of throw deficits at points of normal fault linkage. *J. Struct. Geol.*, 2009, vol. 31, no. 10, pp. 1145-1160. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.06.011>

Lunina O.V., Andreev A.V., Gladkov A.S. The Tsagan earthquake of 1862 on Lake Baikal revisited: a study of secondary coseismic soft-sediment deformation. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, pp. 571-587.

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

Mats V.D., Perepelova T.I. A new perspective on evolution of the Baikal Rift, *Geoscience frontiers*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 349-365. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.06.002>

McCalpin J.P. *Paleoseismology*. 2<sup>nd</sup> 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>

Morris A.P., Ferrill D.A., McGinnis R.N. Mechanical stratigraphy and faulting in Cretaceous carbonates. *AAPG Bull.*, 2009, vol. 93, pp. 1459-1470. <https://doi.org/10.1306/04080909011>

Tulokhonov A.K., Andreev S.G., Batoev V.B., Tsydenova O.V., Khlystov O.M. Natural microchronicle of recent events in the basin of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics*. 2006, vol. 47, no. 9, pp. 1030-1034.

Iezzi F., Roberts G., Walker J.F., Papanikolaou I. Occurrence of partial and total coseismic ruptures of segmented normal fault system: Insight from the Central Apennines, Italy. *J. Struct. Geol.*, 2019, vol. 126, pp. 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.05.003>

Rockwell T.K., Fletcher J.M., Teran O.J., Hernandez A.P., Mueller K.J., Salisbury J.B., Akciz S.O., Štěpančíková P. Reassessment of the 1892 Laguna Salada Earthquake: Fault Kinematics and Rupture Patterns. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2015, vol. 105, no. 6, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1785/0120140274>

Roche V., Homberg C., Rocher M. Architecture and growth of normal fault zones in multilayer systems: a 3D field analysis in the South-Eastern Basin, France. *J. Struct. Geol.*, 2012, vol. 37, pp. 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.02.005>

Vologina E.G., Kalugin I.A., Osukhovskaya Yu.N., Sturm M., Ignatova N.V., Radziminovich Ya.B., Dar'in A.V., Kuz'min M.I. Sedimentation in Proval Bay (Lake Baikal) after earthquake-induced subsidence of part of the Selenga River delta. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 12, pp. 1275-1284.

Wilkinson M., Roberts G.P., McCaffrey K., Cowie P., Faure J.P., Walker, 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>

Homberg C., Schnyder J., Roche V., Leonardi V., Benzaggagh M. The brittle and ductile components of displacement along fault zones. *Geol. Soc. Lond., Special Publications*, 2017, vol. 439, pp. 395-412. <https://doi.org/10.1144/SP439.21>

Shchetnikov A.A., Radziminovich Ya.B., Vologina E.G., Ufimtsev G.F. The formation of Proval Bay as an episode in the development of the Baikal rift basin: A case study. *Geomorphology*, 2012, vol. 177-178. pp. 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.023>

**Лунина Оксана Викторовна**

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

**Lunina Oksana Viktorovna**

Doctor of Sciences (Geology and  
Mineralogy), Leader Researcher  
Institute of the Earth's Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
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

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

**Гладков Антон Андреевич**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 128  
e-mail: anton90ne@rambler.ru

**Gladkov Anton Andreevich**  
Candidate of Sciences (Geology and  
Mineralogy), Research Scientist  
Institute of the Earth's Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
e-mail: anton90ne@rambler.ru