



УДК 551.243+528.7(571.53)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.35.57>

Признаки крипа в зоне влияния Зундукского разлома на северо-западном побережье озера Байкал

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

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Представлены результаты высокоточной аэрофотосъемки на избранных полигонах в зоне Зундукского разлома, простирающегося на северо-восток вдоль береговой линии пролива Малое Море оз. Байкал от м. Ядыртуй. Составлены ортофотопланы и цифровые модели местности участков, дешифрирование которых позволило выявить современные разрывы в конусах выноса водотоков. Наибольшее их количество сосредоточено на м. Ото-Хушун, где развитие нарушений как оперяющих структур происходит в узле пересечения северо-восточного Зундукского и предполагаемого в акватории оз. Байкал север-северо-западного разломов, чем объясняется блочное строение сети разрывов в юго-западной части мыса. Георадиолокационное профилирование показало, что поверхностные нарушения проникают на глубину как минимум нескольких метров. Поскольку последнее разрывообразующее землетрясение в зоне Зундукского разлома, как предполагается, имело место 12000–14000 лет назад, выявленные в современных отложениях разрывы являются результатом криповых смещений. Механизм их образования связывается с периодическим воздействием слабых сейсмических нагрузок на гранулированную среду, в результате чего происходят микросмещения и последующий рост разрывов. Учитывая высокие скорости эрозии и седиментации в пределах горных конусов выноса, а также сохранность нарушений в современных отложениях, можно предполагать, что этот процесс относительно постоянный. Выявление подобных разрывных деформаций и мониторинг их развития в дельтах рек и конусах выноса водотоков позволят прогнозировать возможные места обрушения прибрежных участков оз. Байкал при умеренных и сильных землетрясениях, а также изучать динамику развития берегов – важного компонента биотической части экосистемы озера.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, Зундукский разлом, современные разрывы, смещение, конус выноса.

Для цитирования: Лунина О. В., Гладков А. А., Денисенко И. А. Признаки крипа в зоне влияния Зундукского разлома на северо-западном побережье озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 57–70. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.35.57>

Введение

Традиционно под крипом понимается медленное перемещение материала, которое происходит под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения. В тектонике крип ассоциируется с медленными подвижками по разломам, причины которых разнообразны. Среди них инициированные разными источниками возвратно-поступательные смещения [Об управлении режимами ... , 2020], неупругие вязкопластические деформа-

ции, обусловленные действием ряда физических и химических процессов (сопротивление трению конкретных типов пород, химические реакции, увеличение температуры и порового давления, дилатансия) [Avouac, 2015; Hargis, 2017], а также триггерный эффект от удаленных землетрясений [Refining the spatial ... , 2020]. Показателем крипа могут быть слабые землетрясения в зоне разлома.

Наличие медленных смещений в зоне дизъюнктива устанавливается с помощью инструментальных измерений. Однако такие исследования в мире для природных объектов достаточно редки [Hargis, 2017], а для Байкальского региона наблюдения проводились лишь на единичных разломах [Об управлении режимами ... , 2020]. В настоящее время деформационный мониторинг земной коры продолжается в нескольких пунктах, но без привязки к конкретным структурам [Влияние землетрясений ... , 2019], что связано с определенными техническими сложностями.

В отличие от предыдущих исследований, мы не занимались регистрацией смещений во времени, но выявили разрывы земной поверхности, которые рассматриваем как следствие криповых смещений рыхлых отложений в зоне динамического влияния Зундукского разлома. Данный дизъюнктив считается сейсмоактивным, поэтому наряду с другими разломами северо-западного побережья оз. Байкал попал в область наших научных интересов. Обнаруженные молодые нарушения рельефа в конусах выноса являются редкой находкой, в связи с чем цель настоящей работы – представить результаты этих исследований, выполненных на основе высокоточной цифровой аэрофотосъемки. Выявление участков локализации таких деформаций имеет важное значение, так как позволяет определить места, потенциальные для мониторинга развития смещений и прогнозирования областей катастрофических разрушений в земной коре под действием циклически изменяющихся напряжений.

Объект и методы исследований

Зундукский разлом протягивается на 73 км вдоль береговой линии пролива Малое Море оз. Байкал от м. Ядыртуй до пос. Зама на суше и далее уходит в акваторию озера [Database of Pliocene-Quaternary Faults ... , 2020] (рис. 1). В структурном отношении он является северо-восточным ответвлением генерального Приморского разлома.

Морфологически структура выражена уступами, а в отдельных местах тектоническими рвами, погребенными под аллювиальными и делювиально-пролювиальными отложениями. На основании анализа рельефа высказывалось мнение о сдвиго-взбросовых подвижках по этим дислокациям [Чипизубов, Смекалин, Имаев, 2015]. Однако наши георадиолокационные и морфоструктурные исследования свидетельствуют о сбросах в позднечетвертичное время [Денисенко, Лунина, 2020], что согласуется с общей геодинамической обстановкой в Байкальском рифте [Logatchev, 1993]. Сейсмический потенциал Зундукского разлома, оцененный по максимальному вертикальному смещению, соответствует магнитуде $M_w = 7,3$ и $M_s = 7,5$ [Денисенко, Лунина, 2020].

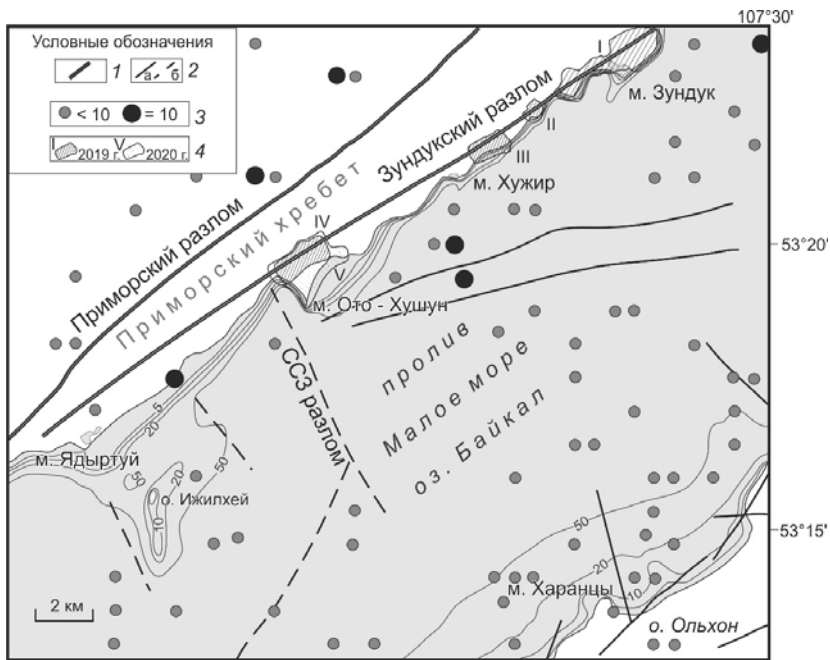


Рис. 1. Расположение участков высокоточной цифровой аэрофотосъемки с помощью БПЛА вдоль Зундукского разлома на северо-западном побережье оз. Байкал. 1 – сейсмоактивные разломы; 2 – достоверные (а) и предполагаемые (б) плиоцен-четвертичные разломы; 3 – эпицентры землетрясений и их энергетические классы по данным [Байкальский филиал геофизической ... , 2020] за 1950–2019 гг.; 4 – участки аэрофотосъемки и их номера

Исследования в зоне описываемого дизъюнктива проводились в рамках проблемы изучения сеймотектоники побережий оз. Байкал с целью детального картирования молодых нарушений рельефа на основе данных высокоточной аэрофотосъемки, которой предшествовал анализ космических снимков, представленных в открытых источниках. Однако пространственное разрешение доступных спутниковых данных, которые, безусловно, являются мощным инструментом для масштабного изучения земной поверхности, не позволяет увидеть многих деталей ее строения. В связи с этим первая рекогносцировочная аэрофотосъемка была проведена нами в июне 2019 г. на четырех участках вдоль разлома (см. рис. 1). Для этого использовался беспилотный летательный аппарат (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro V 2.0. В результате фотограмметрической обработки в программе Agisoft Metashape [‘Structure-from-Motion’ ... , 2012; Agisoft Metashape User ... , 2020] составлены ортофотопланы (рис. 2) и цифровые модели местности (ЦММ) с пространственным разрешением 5,5 и 10–11 см/пиксель соответственно.

После предварительного структурного дешифрирования материалов, помимо палеосейсмогенных уступов, в районе м. Ото-Хушун были обнаружены разрывы земной поверхности в виде едва заметных резких линий, перпендикулярно секущих многочисленными сухие русла. 18 сентября 2020 г.

выполнены повторная аэрофотосъемка всего мыса и заверка ранее замеченных разрывов, в том числе методом георадиолокации, принципы которого подробно изложены в специализированных публикациях [Daniels, 1996; Finding the buried ... , 2012; Lunina, Denisenko, 2020]. По результатам аэрофотосъемки 2020 г. на основе 2337 фотографий были также построены ортофотоплан (рис. 3) и ЦММ с пространственным разрешением 3,5–4 и 7–8 см/пиксель соответственно. В итоге вся имеющаяся информация была проанализирована на предмет выявления современных нарушений земной поверхности.

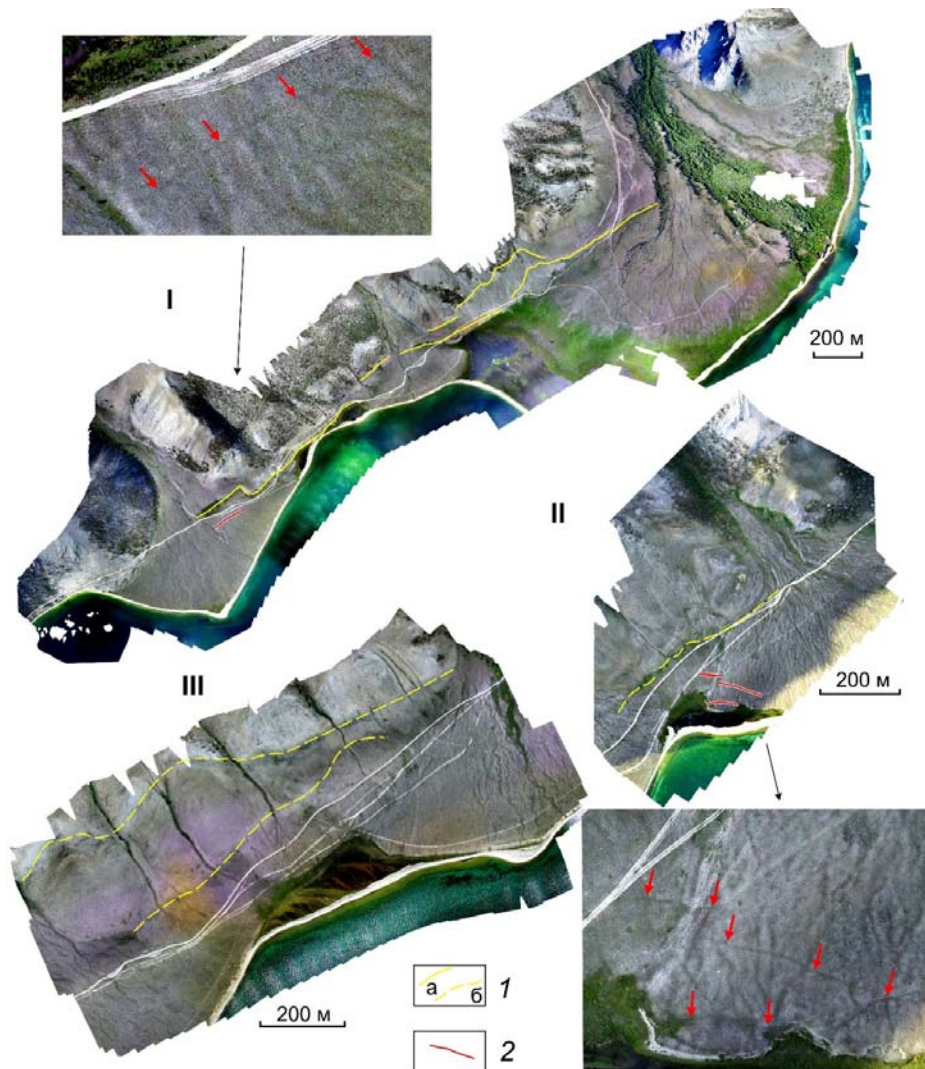


Рис. 2. Ортофотопланы участков I, II и III и их увеличенные фрагменты. Красными стрелками показаны выявленные разрывы. Положение участков см. на рис. 1. 1 – палеосейсмогенные уступы, выраженные в рельефе отчетливо (а) и слабо (б); 2 – современные разрывы

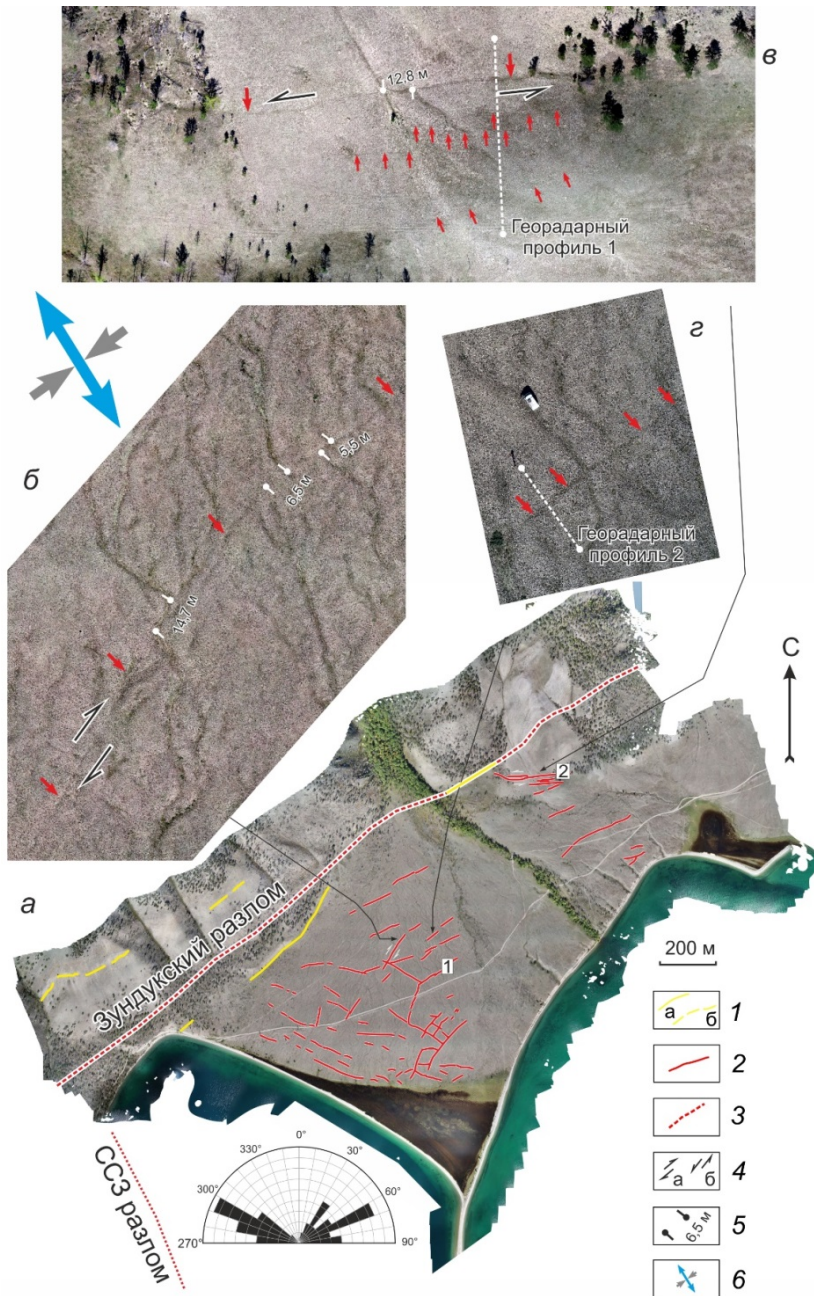


Рис. 3. Ортофотоплан м. Ото-Хушун на участке V (а) и его увеличенные фрагменты (б, в, з) с положением выявленных современных разрывов (показаны красными стрелками). Положение участка см. на рис. 1. Внизу роза-диаграмма простирания современных разрывов. 1 – палеосейсмогенные уступы, выраженные в рельефе отчетливо (а) и слабо (б); 2 – современные разрывы; 3 – плиоцен-четвертичные разломы; 4 – правые (а) и левые сдвиги (б); 5 – маркеры и амплитуда сдвига; 6 – направления осей растяжения (черная стрелка) и сжатия (серая стрелка), действующие при образовании сдвигов, показанных на рис. б и в

Результаты исследований

В результате структурного дешифрирования материалов высокоточной аэрофотосъемки в зоне Зундукского разлома откартировано две группы разрывов. К первой относятся палеосейсмогенные уступы, часть которых была выявлена ранее по космическим снимкам [Чипизубов, Смекалин, Имаев, 2015] и ревизована с учетом новых данных (см. рис. 2–3). Вторую группу составляют нарушения, отнесенные по возрасту формирования к современным, так как они, согласно геологическим картам первого поколения масштаба 1:200 000 (листы N-48-XXX и N-48-XXIV), нарушают в основном современные отложения, представленные аллювиальными, аллювиально-озерными и пролювиально-озерными галечниками, песками, суглинками, глинами, валунами и реже неразделенными четвертичными пролювиальными валунно-галечными отложениями. Эти дислокации, которым и посвящена данная работа, сильно отличаются от первой группы разрывов своей прямолинейностью, малыми высотами уступов в первые десятки сантиметров, наличием в некоторых случаях следов сдвиговых смещений и особенностями распространения. Всего одно нарушение простиранием 57° и длиной 131 м картируется в конусе выноса временного водотока на м. Хоже-Нахотуй. Четыре других широтного и запад-северо-западного простирания длиной 37–93 м расположены на следующем за ним на юго-запад мысе. Перечисленные едва заметные с высоты линеаменты не были бы приняты во внимание, если бы мы не обнаружили их в большом количестве на м. Ото-Хушун, по форме напоминающем коготь (см. рис. 3). Основной вклад в формирование этого мыса внес конус выноса ручья, часть которого, судя по его морфологии в устье водотока, могла быть обрушена в оз. Байкал.

В ходе наземных исследований на м. Ото-Хушун в сентябре 2020 г. мы убедились, что выявленные на поверхности нарушения не являются тропами, фрагментами дорог или противопожарными рвами. Их морфологическая выраженность на ортофотоплане и ЦММ существенно отличается от антропогенного рельефа и звериных стезек своей прямолинейностью и заверяется анализом гипсометрических профилей или сдвиговыми смещениями сухих русел. На месте разрывы практически невозможно диагностировать из-за незначительной высоты уступов в первые десятки сантиметров при наличии грубообломочных отложений на поверхности. По этой же причине не все разрывы различимы на ЦММ, но при этом четко прослеживаются на аэрофотоснимках. Сдвиговые смещения проток по отдельным разрывам достигают 14,7 м (см. рис. 3, а), длина варьирует от 6 до 290 м.

Через серию субширотных разрывов, один из которых демонстрирует левостороннее сдвиговое смещение 12,8 м вблизи главного сместителя Зундукского разлома, выполнен георадарный профиль (см. рис. 3, в; 4). На местности сдвиг выражен едва заметными рвом и уступом высотой, достигающей в отдельных точках 0,6 м. На радарограмме проявлены все пять разрывов, выраженных наклонными линиями, секущими горизонтальные оси синфазности. В совокупности они представляют собой зону, проникающую до глубины как минимум 15–20 м, которая ограничивается техническими возможностями примененного антенного блока АБДЛ «Тритон» георадара «ОКО-2».

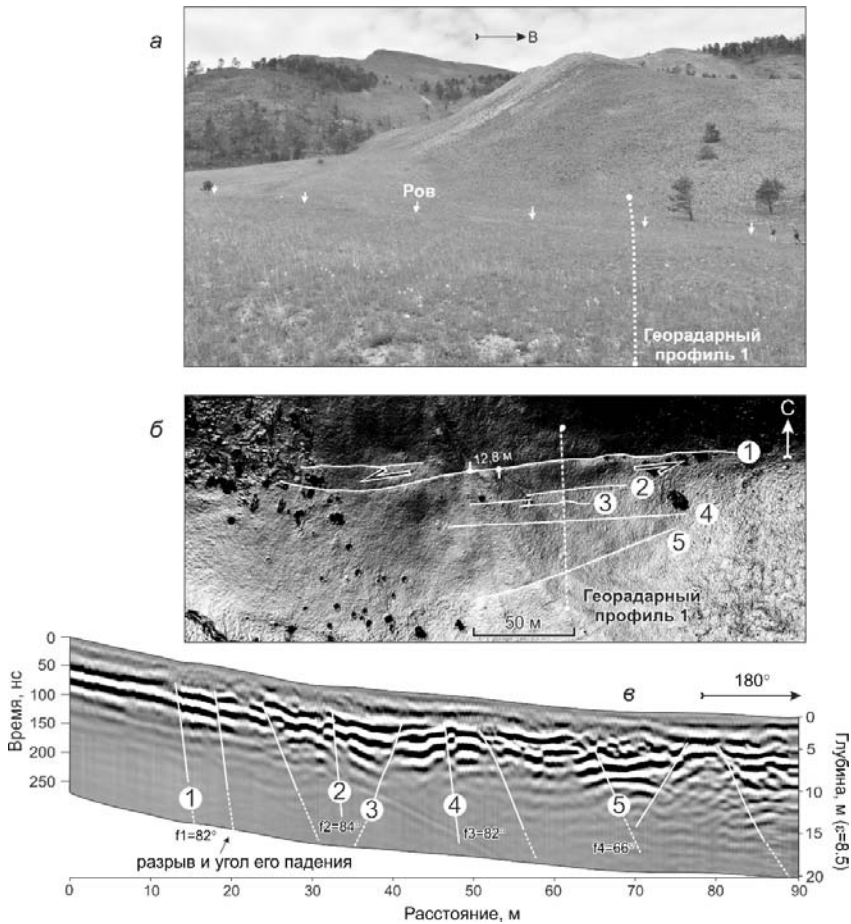


Рис. 4. Георадарный профиль 1 через левый сдвиг и серию других разрывов на м. Ото-Хушун: а – положение профиля и левого сдвига (показан стрелками) на фото; б – положение профиля и других разрывов на фрагменте ЦММ (оттенки серого цвета от белого до черного показывают уклон поверхности от 0 до 15° соответственно); в – радарограмма с интерпретацией, полученная георадаром «ОКО-2» с антенной АБДЛ «Тритон», ε – диэлектрическая проницаемость. Пронумерованы разрывы, различные на ортофотоплане и ЦММ

Другой георадарный профиль через разрыв простираем 50° выполнен в центре м. Ото-Хушун с помощью антенного блока АБ-250М (рис. 5). Наибольшая высота уступа 0,68 м зафиксирована в 8,8 м от профиля. На радарограмме разрыв выражен серией нарушений, сливающихся на глубине, предположительно, в одну структуру прямо над линией на поверхности. В этой части мыса отраженные электромагнитные сигналы быстро затухают уже на отметке 3 м, хотя потенциал использованной антенны АБ-250М в благоприятных условиях 8 м. Быстрое затухание свидетельствует о том, что в разрезе присутствует больше глинистых отложений, чем вблизи склона хребта.

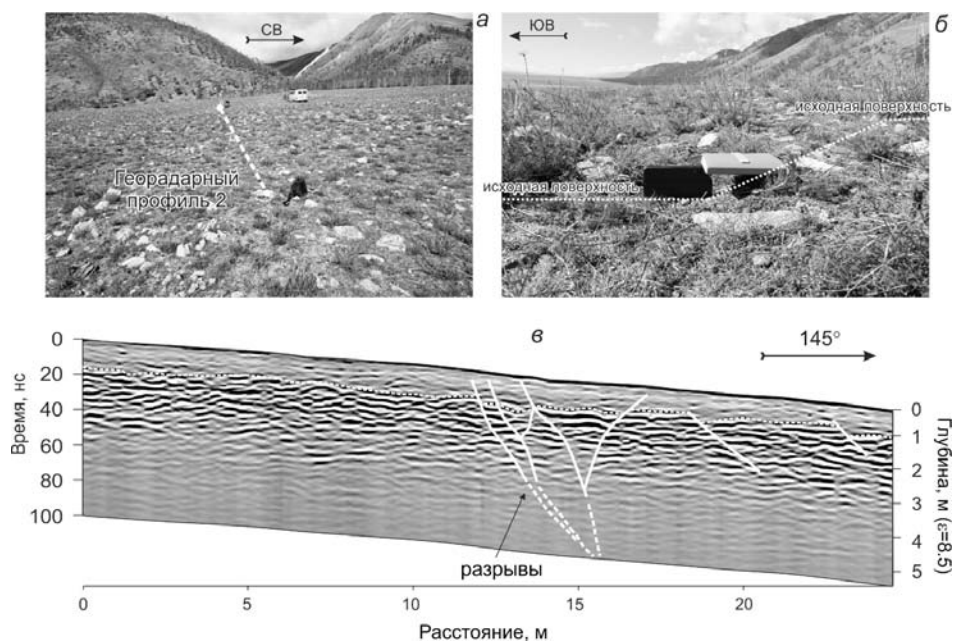


Рис. 5. Георадарный профиль 2 через разрыв в современных отложениях на м. Ото-Хушун: *а* – положение профиля на фото; *б* – вид на разрыв, определенный по координатам на ортофотоplane и диагностируемый на местности по слабо заметному перепаду высот исходной земной поверхности; *в* – радарограмма с интерпретацией, полученная георадаром «ОКО-2» с антенной АБ-250М, *ε* – диэлектрическая проницаемость

В целом разрывы на м. Ото-Хушун образуют доминирующие системы СВ, ВСВ, СЗ и ЗСЗ простираний (см. рис. 3). Характерно, что большая часть нарушений сосредоточена в юго-западной части мыса и образует блочную структуру, а в северо-восточной наблюдаются только широтные и ВСВ разрывы. Качество аэрофотоснимков июня 1958 г. м. Ото-Хушун не позволяет увидеть на них откартированные дизъюнктивы, за исключением ВСВ нарушения в центре мыса (разрыв 1 на рис. 3), в 30–70 м на ССЗ от главной дороги и широтного левого сдвига, пересекающего временный водоток из соседнего распадка слева от долины ручья на м. Ото-Хушун (разрыв 2 на рис. 3). Таким образом, либо вся разрывная сеть, либо отдельные нарушения к лету 1958 г. уже существовали. По имеющимся данным нет оснований связать образование нарушений с конкретным землетрясением. Малое Море и его прибрежная часть согласно сейсмологическому каталогу [Байкальский филиал геофизической ... , 2020] характеризуется слабой сейсмической активностью. В районе м. Ото-Хушун вдоль Приморского и Зундукского разломов зарегистрировано несколько событий с энергетическим классом 10.

Обсуждение результатов

Рассматривая структурное положение обнаруженной сети разрывов, мы пришли к выводу, что ВСВ и СВ нарушения являются опережающими к главному сместителю Зундукского разлома. ЗСВ и СЗ разломы, в свою очередь, связаны с развитием предполагаемого по батиметрическим данным ССЗ разлома, который откартирован по подводному уступу на дне оз. Байкал (см. рис. 1) [Database of Pliocene-Quaternary Faults ... , 2020]. Из этого следует, что оба дизъюнктива активны в едином поле напряжений с ведущим СЗ–ЮВ растяжением, характерным для Байкальского рифта в настоящее время. Находит свое объяснение и развитие блочной структуры в юго-западной части м. Ото-Хушун, а предполагаемый ранее ССЗ разлом может быть продолжен до побережья озера.

Самый сложный вопрос заключается в механизме образования выявленных молодых разрывов в рыхлых отложениях. Последние представляют собой гранулированную среду, и, соответственно, их поведение должно подчиняться законам механики гранулированных сред и мезомеханики [Тектоника разрыхления: геологические ... , 2020]. Логично предположить, что слабые сейсмические события в проливе Малое Море, а возможно, и другие землетрясения в оз. Байкал, могут вызывать появление деформаций, связанных с периодическим воздействием пульсирующих нагрузок на гранулированную среду. При превышении предельного угла сдвига образуются поверхности скольжения, вдоль которых отдельные слои зерен (блоков) смещаются как единое целое [Садовский, 1989]. Эти деформации, очевидно, концентрируются локально вдоль зон крупных разломов и в узлах их пересечения, как это происходит на м. Ото-Хушун. Реологически в гранулированных средах они описываются как пластическое или вязкое течение, возникающее через контакты зерен (гранул, блоков), при котором формируется сетка напряжений или стрессовые цепочки [Cambell, 1990; Predictability and Granular ... , 1999]. По существу, в терминологии «активной тектоники» эти следы смещений, в результате которых происходит рост разрывов, относятся к крипу. В зоне разлома Сан-Андреас, на сегменте Коачелла, часть таких подвижек, выявленных на основе высокоточной аэрофотосъемки с БПЛА, обоснованно относят к криповым. В большинстве случаев их связывают с эпизодическими малоамплитудными триггерными смещениями от удаленных землетрясений в межсейсмический период, равный ~300 лет [Refining the spatial ... , 2020].

В нашем случае проблема отнесения сдвиговых смещений к криповым может быть, на первый взгляд, связана с большой накопленной амплитудой. Однако, если принять во внимание предполагаемый возраст зундукских палеосейсмогенных уступов 12000–14000 лет, который был оценен в результате их сопоставления с датированными деформациями ближайшей Сарминской структуры, приуроченной к Приморскому разлому [Чипизубов, Смекалин, Имаев, 2015], то можно констатировать, что в голоцене в зоне Зундукского разлома не было разрывообразующих землетрясений. В этом случае, исходя из наибольшей установленной амплитуды ближайшего к главному

смещителю широтного левого сдвига в 12,8 м, скорость крипа будет 0,9–1,07 мм/год, что согласуется с максимальной скоростью вертикального смещения 0,9 мм/год за последние 2500 лет, установленной для Приморского разлома на сегменте между селами Бугульдейка и Попова [Arzhannikova, Arzhannikov, 2019].

Важно отметить, что уверенно диагностируемые право- и левосторонние сдвиговые смещения по выявленным разрывам хорошо укладываются в современное действующее поле напряжений в Байкальском рифте с северо-западным направлением оси растяжения (см. рис. 3). Таким образом, имеющиеся данные и их анализ показывают, что на протяжении длительного времени разрядка напряжений в зоне Зундукского разлома происходит избирательно за счет медленных смещений по опережающим разрывам. Очевидно, крип имеет место и в горизонтальном, и вертикальном направлениях, но последнее проявлено в меньшей степени из-за значительного эродирования земной поверхности конуса выноса.

Заключение

Впервые после аэросъемочных работ, проведенных в середине прошлого века, на избранных четырех участках в зоне Зундукского разлома выполнена высокоточная цифровая аэрофотосъемка с БПЛА. В результате получены ортофотопланы и цифровые модели местности, которые могут быть использованы для мониторинга изменения земной поверхности при повторном проведении подобных работ, а также в качестве детальной графической основы для различных видов научных исследований в пределах изученных полигонов Прибайкальского национального парка.

Структурное дешифрирование полученных материалов позволило обнаружить современные разрывы, формирующиеся в зоне динамического влияния Зундукского разлома в результате длительно развивающегося крипа, причиной которого, вероятнее всего, являются периодически возникающие вибрации от землетрясений в Байкальском рифте. Характерно, что поверхностные нарушения распространены не повсеместно вдоль разлома, а в основном в месте его пересечения с ССЗ дизъюнктивом на м. Ото-Хушун, что предполагает максимальную концентрацию тектонических напряжений в разломных узлах, где происходит их реализация, вызывающая микросмещения и последующий рост разрывов. Учитывая высокие скорости эрозии и седиментации в пределах горных конусов выноса, а также сохранность нарушений в современных осадках, можно предполагать, что этот процесс относительно постоянный. Такая разгрузка напряжений может объяснять отсутствие сильных разрывообразующих землетрясений в зоне Зундукского разлома на протяжении всего голоцена.

Выявление подобных разрывных деформаций и мониторинг их развития в дельтах рек и конусах выноса временных водотоков позволят прогнозировать в будущем возможные места обрушения прибрежных участков оз. Байкал при умеренных и сильных землетрясениях в регионе и, таким образом, изучать динамику развития берегов – важного компонента абиотической части экосистемы озера.

Авторы благодарны ФГБУ «Заповедное Прибайкалье» за возможность проведения научно-исследовательских работ на территории Прибайкальского национального парка в рамках договора о сотрудничестве № 43 от 30.05.2019 г. В фотограмметрической обработке данных аэрофотосъемки принимал участие школьник Н. А. Михалев, учащийся детского технопарка «Кванториум Байкал» ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-385001.

Список литературы

Байкальский филиал геофизической службы. 2020. URL: <http://seis-bykl.ru> (дата обращения: 09.11.2020).

Влияние землетрясений на активизацию разлома и его демпфирующий эффект для деформационных и сейсмических волн / С. А. Борняков, А. И. Мирошниченко, Д. В. Салко, А. Н. Шагун, А. А. Добрынина, Л. А. Усынин // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 30. С. 3–12. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.3>.

Денисенко И. А., Лунина О. В. Сейсмогенные смещения в зоне Зундукского разлома по данным георадиолокации (Байкальский регион) // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов : материалы XXII Всерос. с междунар. участием науч.-практ. Щукин. конф. / под ред. Л. И. Надежка, Т. Б. Силкиной. Воронеж : Издат. дом ВГУ, 2020. С. 120–123.

Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины / В. В. Ружич, А. Г. Вахромеев, Е. А. Левина, С. А. Сверкунов, Е. В. Шилько // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23, № 3. С. 54–59.

Садовский М. А. О значении и смысле дискретности в геофизике // Дискретные свойства геофизической среды. М. : Наука, 1989. С. 5–14.

Тектоника разрывления: геологические данные и физика процесса / М. Г. Леонов, Г. Г. Кочарян, А. Ф. Ревуженко, С. В. Лавриков // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 492–521. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0488>.

Чупизубов А. В., Смекалин О. П., Имаев В. С. Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения зоны Приморского разлома (оз. Байкал) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 2. С. 63–77.

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6. Available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf/ (date of access: 07.11.2020).

Arzhannikova A., Arzhannikov S. Morphotectonic and paleoseismological studies of Late Holocene deformation along the Primorsky Fault, Baikal Rift // Geomorphology. 2019. Vol. 342. P. 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.016>.

Avouac J. P. From geodetic imaging of seismic and aseismic fault slip to dynamic modeling of the seismic cycle // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2015. Vol. 43. P. 233–271. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105302>.

Cambell C. S. Rapid Granular Flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 1990. Vol. 22. P. 57–92. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000421>.

Daniels D. J. Surface-Penetrating Radar. London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 1996. 734 p.

Database of Pliocene-Quaternary Faults in the Southern East Siberia. Available at: <http://activetectonics.ru/indexeng.html> (date of access: 16.11.2020).

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>.

Harris R. A. Large earthquakes and creeping faults // *Rev. Geophys.* 2017. Vol. 55. P. 169–198. <https://doi.org/10.1002/2016RG000539>.

Logatchev N. A. History and geodynamics of the Lake Baikal Rift in the context of the Eastern Siberia rift system: a review // *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine.* 1993. Vol. 17, N 2. P. 353–370.

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 (104209). P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104209>.

Predictability and Granular Materials / R. P. Behringer, D. Howell, L. Kondic, S. Tennakoon, Ch. Veje // *Physica D.* 1999. Vol. 133. P. 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(99\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(99)00094-9).

Refining the spatial and temporal signatures of creep and co-seismic slip along the southern San Andreas Fault using very high resolution UAS imagery and SfM-derived topography, Coachella Valley, California / C. M. Blanton, T. K. Rockwell, A. Contz, J. T. Kelly // *Geomorphology.* 2020. Vol. 357. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107064>.

Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience application / M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey J. M. Reynolds // *Geomorphology.* 2012. Vol. 179. P. 300–314.

Signatures of Creep in the Zunduk Fault Damage Zone on the Northwestern Coast of Lake Baikal

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

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

Abstract. The results of a high-resolution aerial survey at selected areas in the Zunduk fault damage zone trending northeast along the coastline of the Maloe sea of Lake Baikal from Cape Yadyrtuj are presented. The research was carried out within the framework of the problem of studying the seismotectonics of the shores of Lake Baikal to map the youngest surface ruptures. Based on the images obtained using DJI «Phantom 4 Pro V 2.0» unmanned aerial systems (UAS), we generated orthomosaics and digital terrain models, interpretation of which allowed us to reveal recent ruptures in alluvial fans. The largest number of them is concentrated on the Oto-Khushun Cape, where the development of disturbances as feathering structures occurs at the intersection of the Zunduk fault trending NE–SW and a proposed fault trending NNW–SSE in the water area of Lake Baikal. It explains the block structure of the rupture network in the southwestern part of the cape. Ground penetrating radar profiling showed that the surface ruptures penetrate to a depth of at least several meters. Since the last rupturing earthquake in the Zunduk fault zone is supposed to have occurred 12000–14000 years ago, the ruptures mapped in recent sediments are the result of creep events. The mechanism of their formation is associated with the periodic effect of weak seismic loads on the granular medium, as a result of which micro-slip and subsequent growth of ruptures occur. Taking into account the high rates of erosion and sedimentation within the mountain alluvial fan, as well as the persistence of disturbances in recent sediments, it can be assumed that this process is relatively constant. Identification of such brittle deformations and monitoring of their development in river deltas and outflow cones of watercourses will make it possible to predict possible places of the collapse of the coastal areas of Lake Baikal during moderate and strong earthquakes, as well as

to study the dynamics of coastal development – an important component of the abiotic part of the lake ecosystem.

Keywords: aerial survey, Zunduk fault, recent ruptures, displacement, alluvial fan.

For citation: Lunina O.V., Gladkov A.A., Denisenko I.A. Signatures of Creep in the Zunduk Fault Damage Zone on the Northwestern Coast of Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 35, pp. 57-70. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.35.57> (in Russian)

References

Baikalskii filial geofizicheskoi sluzhby [Baikal branch of geophysical service]. Available at: <http://seis-bykl.ru/Main> event directory (date of access: 09.11.2020) (in Russian)

Bornyakov S.A., Miroshnuchenko A.I., Salko D.V., Shagun A.N., Dobrynina A.A., Usynin L. A. Vliyaniye zemletryaseniya na aktivizatsiyu razloma i ego dempfirovaniye: effekty dlya deformatsionnykh i seismicheskikh voln [The Effect of Earthquakes on the Activation of the Fault and Its Damping Effect for Deformation and Seismic Waves]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2019, vol. 30, pp. 3-12. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.3> (in Russian)

Denisenko I.A., Lunina O.V. Seismogennyye smeshcheniya v zone Zundukskogo razloma po dannym georadiolokatsii (Baikalskii region) [Seismogenic displacements in the Zunduk fault zone from ground penetrating radar (Baikal region)]. *Struktura, veshchestvennyi sostav, svoystva, sovremennaya geodinamika i seismichnost platformennykh territorii i sopredelnykh regionov* [Structure, material composition, properties, recent geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions: Proceedings of the XXII All-Russian Scientific and Practical Shchukin Conference with international participation]. Eds. L.I. Nadezhka, T.B. Silkina. Voronezh, Voronezh State University Publishing House, 2020, pp. 120-123. (in Russian)

Ruzhich V.V., Vahromeev A.G., Levina E.A., Sverkunov S.A., Shilko E.V. Ob upravlenii rezhimami seismicheskoi aktivnosti v segmentakh tektonicheskikh razlomov s primeneniem vibratsionnykh vozdeystviy i zakachki rastvorov cherez skvazhiny [Seismic activity control in tectonic fault zones using vibrations and deep well fluid injection]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2020, vol. 23, no. 3, pp. 54-59. (in Russian)

Sadovsky M.A. O znachenii i smysle diskretnosti v geofizike [On the Meaning and Sense of Discreteness in Geophysics]. *Diskretnyye svoystva geofizicheskoi sredy* [Discrete Properties of Geophysical Environment]. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 5-14. (in Russian)

Leonov M.G., Kocharyan G.G., Revuzhenko A.F., Lavrikov S.V. Tektonika razrykhleniya: geologicheskie dannye i fizika protsessa [Tectonics of rock loosening: geological data and physics of the process]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and tectonophysics], 2020, vol. 11, no. 3, pp. 492-521. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0488>. (in Russian)

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Imaev V.S. Paleoseismodislotsatsii i paleozemletrasyeniya zony Primorskogo razloma (oz. Baikal) [Paleoseismological dislocations and paleoearthquakes in the area of Primorsky Fault (Baikal Lake)]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 2015, vol. 42, no. 2, pp. 63-77. (in Russian)

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6. Available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf/ (data of access: 07.11.2020).

Arzhannikova A., Arzhannikov S. Morphotectonic and paleoseismological studies of Late Holocene deformation along the Primorsky Fault, Baikal Rift. *Geomorphology*, 2019, vol. 342, pp. 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.016>.

Avouac J.P. From geodetic imaging of seismic and aseismic fault slip to dynamic modeling of the seismic cycle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2015, vol. 43, pp. 233-271. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105302>

Cambell C.S. Rapid Granular Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1990, vol. 22, pp. 57–92. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000421>

Daniels D.J. *Surface-Penetrating Radar*. London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 1996, 734 p.

Database of Pliocene-Quaternary Faults in the Southern East Siberia. Available at: <http://activetectonics.ru/indexeng.html> (date of access: 16.11.2020).

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>.

Harris R.A. Large earthquakes and creeping faults. *Rev. Geophys.*, 2017, vol. 55, pp. 169-198. <https://doi.org/10.1002/2016RG000539>.

Logatchev N.A. History and geodynamics of the Lake Baikal Rift in the context of the Eastern Siberia rift system: a review. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine*, 1993, vol. 17, no. 2, pp. 353-370.

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 (104209), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104209>.

Behringer R.P., Howell D., Kondic L., Tennakoon S., Veje Ch. Predictability and Granular Materials. *Physica D*, 1999, vol. 133, pp. 1-17. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(99\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(99)00094-9).

Blanton C.M., Rockwell T.K., Contz A., Kelly J.T. Refining the spatial and temporal signatures of creep and co-seismic slip along the southern San Andreas Fault using very high resolution UAS imagery and SfM-derived topography, Coachella Valley, California. *Geomorphology*, 2020, vol. 357, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107064>.

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience application. *Geomorphology*, 2012, vol. 179, pp. 300-314.

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

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), Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: anton90ne@rambler.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
Russian Federation
e-mail: denisenkoivan.1994@mail.ru

Код научной специальности: 25.00.03

Дата поступления: 10.12.2020