



УДК 551.243+550.349.4+1-925.16

Проявления сейсмически индуцированных геологических процессов в зонах разломов Прибайкалья (по геолого-структурным и георадиолокационным данным)

О. В. Лунина (lounina@crust.irk.ru)
А. С. Гладков (gladkov@crust.irk.ru)

Аннотация. На основе геолого-структурных и георадиолокационных методов изучены проявления геологических процессов, инициированных землетрясениями в зонах Дельтового и Мондинского активных разломов. В канавах и на радарограммах обнаружены следы разрывообразования, разжижения и проседания. Остаточные деформации часто взаимосвязаны между собой. Ведущую роль в этом играют разрывы, формирование которых при сейсмическом воздействии предшествует воронкам и инъекционным дайкам. Изучение сейсмогенных деформаций при помощи георадара ОКО-2 с антенными блоками АБ-250М и АБДЛ «Тритон» позволило выявить различия в строении зон дислокаций, возникших в четвертичных отложениях различного состава в условиях преимущественного сдвига на западном окончании Тункинской долины и растяжения в центральной части Байкальской впадины. Вблизи пос. Монды разрывные деформации, ассоциированные с одноименным разломом, представляют собой зоны сближенных субвертикальных трещин, а в зоне Дельтового разлома они образуют серию ступенчатых сбросов. На юго-западной окраине с. Инкино выявлены проявления разжижения на глубинах 2,5–2,7 м на одном профиле и 1,5–2,68 м на другом профиле. В зоне Мондинского разлома, напротив провальной воронки, проседание грунта происходит над системой субвертикальных разрывов до глубины -4 м, что совпадает с максимальной глубиной сезонного промерзания гравийно-галечных отложений Тункинской долины. В целом проведенные исследования показали высокую информативность метода георадиолокации в комплексе с геолого-структурными методами для выявления следов сейсмически индуцированных геологических процессов.

Ключевые слова: разрывообразование, разжижение, проседание, землетрясение, разлом, георадиолокация, Прибайкалье.

Введение

В Прибайкалье ежегодно происходят сотни землетрясений. Большинство из них мы не чувствуем, но некоторые могут достигать значительной энергии, вызывая ощутимые колебания земной поверхности. Сильные сейсмические события с магнитудой 5,5 и более в регионе (рис. 1) происходят сравнительно редко (раз в несколько лет), но именно они являются причи-

ной возникновения геологических процессов, которые могут быть опасны. По статистике, на юге Восточной Сибири во время инструментальных землетрясений больше всего проявляются разжижение, проседание, склоновые движения и разрывообразование [4]. Эти процессы в случае масштабного развития могут нанести существенный ущерб населению и экономике Иркутской области и Республики Бурятия. В связи с этим идентификация проявлений геологических опасностей, инициированных сейсмическими воздействиями в прошлом, крайне необходима для оценки вероятности их возникновения в будущем.

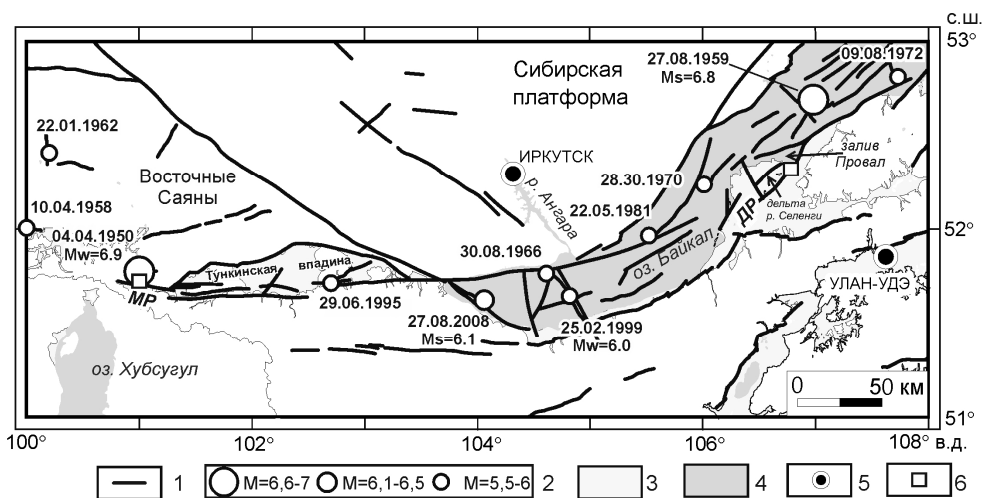


Рис. 1. Схема сейсмоактивных разломов Южного Прибайкалья и положение участков, в пределах которых изучались проявления геологических процессов, инициированных землетрясениями. ДР – Дельтовый разлом, МР – Мондинский разлом
 Условные обозначения: 1 – сейсмогенерирующие разломы; 2 – землетрясения с магнитудой 5,5 и более за период 1950–2014 гг., по данным Байкальского филиала геофизической службы СО РАН; 3 – суходольные впадины; 4 – озера; 5 – областной и республиканский центры; 6 – участки детальных исследований

Наиболее доступны для изучения сейсмогравитационные смещения, поскольку их проявления видны на поверхности, хотя и здесь возникают трудности, например, с установлением сейсмогенной природы обвала или оползня. Сложнее обстоит дело с обнаружением признаков разжижения или разрывных нарушений, особенно на равнинных, слабообнаженных территориях. Остаточные деформации, связанные с разрывообразованием или переходом водонасыщенных дисперсных грунтов в текучее состояние, зачастую скрыты под земной поверхностью. Просадки грунта при землетрясениях – более редкое явление, но их выявление важно для мониторинга их дальнейшего развития на промышленно освоенных и заселенных территориях. Цель настоящей статьи – показать эффективность комплексного использования геолого-структурных и георадиолокационного методов для обнаружения и

изучения следов проявления таких геологических процессов, как разрывообразование, разжижение и проседание. Их поиск проводился в зонах Дельтового и Мондинского разломов (см. рис. 1), с которыми связываются сильнейшие землетрясения Байкальской рифтовой зоны (Цаганское 12.01.1862, $M \sim 7,4-7,5$ и Мондинское 04.04.1950 г., $M_w = 6,9$). После ряда проведенных исследований [9; 21] эти активные структуры можно рассматривать эталонными для изучения геологических опасностей, ассоциированных с сейсмическими событиями, хотя они все еще нуждаются в детальном изучении.

Методы исследования

В разное время с 2010 по 2014 г. исследования в зонах разломов проводились с использованием геолого-структурных и георадиолокационного методов. Им предшествовало изучение ранее опубликованных материалов предварительного обследования эпицентральных зон, описывающих последствия Мондинского [11; 14] и Цаганского землетрясений [3].

В полевых условиях в зоне динамического влияния Дельтового разлома, простирающегося вдоль восточного берега оз. Байкал в районе дельты р. Селенги и залива Провал, нами изучались разрезы четвертичных отложений, содержащие различные типы сейсмиков и разрывных нарушений. Документация включала геологическое описание разрезов, их фотографирование и/или зарисовку, замеры элементов залегания и геометрических параметров трещин, их зон, складок, кластических даек и других встреченных структур [9].

Георадиолокационные исследования были проведены вкрест простирания песчаного увала на сегменте между селами Оймур и Кудара (рис. 2, А). Они основаны на излучении электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [1]. В деталях описание и главные принципы работы метода подповерхностного радиолокационного зондирования можно найти в ряде фундаментальных публикаций [1; 16; 17]. В наших работах использовался георадар ОКО-2 с антенным блоком АБ-250М, имеющим разрешающую способность 0,25 м. Условия среды в зоне Дельтового разлома позволили достичь глубины зондирования 7 м.

В пределах зоны динамического влияния Мондинского разлома, расположенного на западном окончании Тункинской долины, сначала были проведены маршруты с целью выявления поверхностных деформаций, среди которых разрывы и воронки проседания оказались особенно развиты. На трех участках, ближайших к пос. Монды, дислокации вскрывались канавами [21]. Впоследствии через ряд систем сейсмогенных деформаций также было проведено георадиолокационное профилирование геологической среды. Дополнительно использовался антенный блок АБДЛ «Тритон», который отличается от АБ-250М большей глубиной зондирования (до 20 м) и меньшей разрешающей способностью (от 0,5 до 1 м). Нами была достигнута максимальная глубина 16 м при среднем значении диэлектрической проницаемости 3,5, определенной по наклонным линиям помех в программе GeoScan 32.

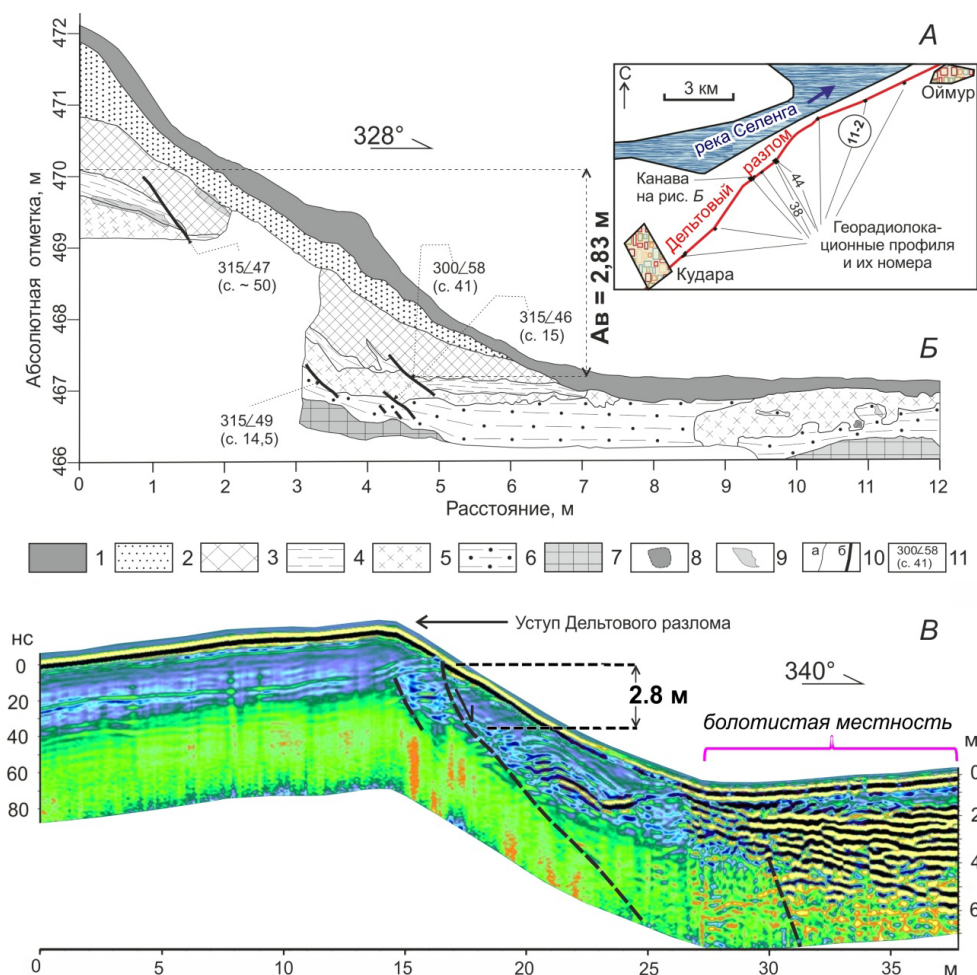


Рис. 2. Схема расположения георадарных профилей и канавы в зоне динамического влияния Дельтового разлома (А), геологический разрез, вскрытый канавой, (Б) и фрагмент радарограммы по профилю 11-2 вкрест простирания песчаного увала на северо-восточной окраине с. Дубинино на границе залива Провал и дельты р. Селенги (В)

Условные обозначения: 1 – современный почвенно-растительный слой; 2 – песок мелко-тонкозернистый светло-желтый; 3 – супесь буровато-серая, плотная, гумусированная; 4 – коричневатый суглинок; 5 – песок мелко-среднезернистый желтовато-серый, коричневатый суглинок, слоистый; 6 – переслаивание желтых мелкозернистых лимонитизированных и серых мелко-тонкозернистых плотных песков, местами наблюдается их перемешивание; 7 – гумусированный суглинок (погребенный почвенный слой (?)); 8 – гумусированные участки; 9 – крупные лимонитизированные участки; 10 – границы литологических разностей пород (а) и сколовые разрывы (б); 11 – азимут и угол падения разрывов в градусах, в скобках указаны кинематический тип (с. – сброс) и амплитуда смещения в см

Результаты и их обсуждение

Разрывообразование. Результатом данного процесса являются подновленные и новообразованные трещины в скальных и рыхлых грунтах, ледовом покрытии водоемов и техногенных отложениях, которые могут иметь как первичную, так и вторичную природу в соответствии с классификацией, приведенной в [19]. Наиболее важно выявление первичных сейсмогенных разрывов. Палеосейсмогеологические методы и подходы к их изучению и картированию подробно изложены в двухтомном переводе [7; 8], который, по сути, является хрестоматией как для начинающего, так и для опытного исследователя геологических эффектов землетрясений. В условиях слабой обнаженности юга Восточной Сибири и дороговизны повсеместного проведения траншейных работ все более привлекательным для обнаружения разрывных деформаций представляются георадарные исследования. На радарограммах они проявляются по-разному, что зависит от типа и состояния пород, кинематики смещений и обводненности разрыва. Так, в зоне Дельтового разлома при Цаганском землетрясении 1862 г. образовалась система разрывных дислокаций протяженностью 30 км [6]. В настоящее время на поверхности она проявляется лишь задернованным или осыпанным песчаным уступом, тектоническая природа которого, если бы не исторические сведения о сейсмическом событии, могла бы остаться под вопросом. Часть дислокаций осталась под водами оз. Байкал. В результате изучения 32 разрезов, вскрытых канавами и зачистками в эпицентральной зоне, в большинстве из них были обнаружены различные типы сейсмогенных деформаций, разделяемые на пластические, хрупкопластические и разрывные структуры [9].

Классический геологический разрез, содержащий систему сбросов, вскрыт между селами Инкино и Шерашево (рис. 2, Б). На георадарных разрезах во многих местах сейсмогенные разрывы проявились довольно четко благодаря выраженной вертикальной подвижке и отложениям, представленным разнозернистыми песками, суглинками и супесями разной цветовой гаммы. Смещение георадарных комплексов, выделяемых по разной волновой картине (рис. 2, В), происходило по вертикальным и наклонным разломным плоскостям. В районе с. Дубинино, по данным георадиолокации, зафиксировано наибольшее вертикальное смещение в 2,8 м (см. рис. 2, В), совпадающее с суммарной вертикальной амплитудой сбросовых нарушений в канаве (см. рис. 2, Б), расположенной в -6 км от георадарного профиля (см. рис. 2, А).

Иначе проявляются следы современного разрывообразования в грубообломочных, слабосцементированных отложениях в зоне преимущественного сдвига, к которому относится Мондинский разлом [15; 18; 21]. Вертикальная компонента смещений по нему до сих пор однозначно не установлена [21]. На поверхности в районе пос. Монды (Республика Бурятия) система сейсмогенных дислокаций Мондинского землетрясения 1950 г. выражена линейными понижениями и воронками проседания (рис. 3, А) северо-западного простирания. Георадарный профиль 4 пересекает две линейные структуры в зоне деформаций, помеченные на рис. 3 цифрами 1 и 2. На ра-

дарограмме, полученной с помощью незранированной антенны АБДЛ «Тритон» (рис. 3, Б), эти линейные нарушения проявляются интенсивными амплитудами сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды. Более того, участки с такой записью иногда смещаются друг относительно друга по вертикали, предполагая сбросовую компоненту смещений по нарушениям Мондинского разлома. Важно отметить, что структура 1 в зоне деформаций расположена прямо напротив воронки и прослеживается на всю 16-метровую глубину разреза.

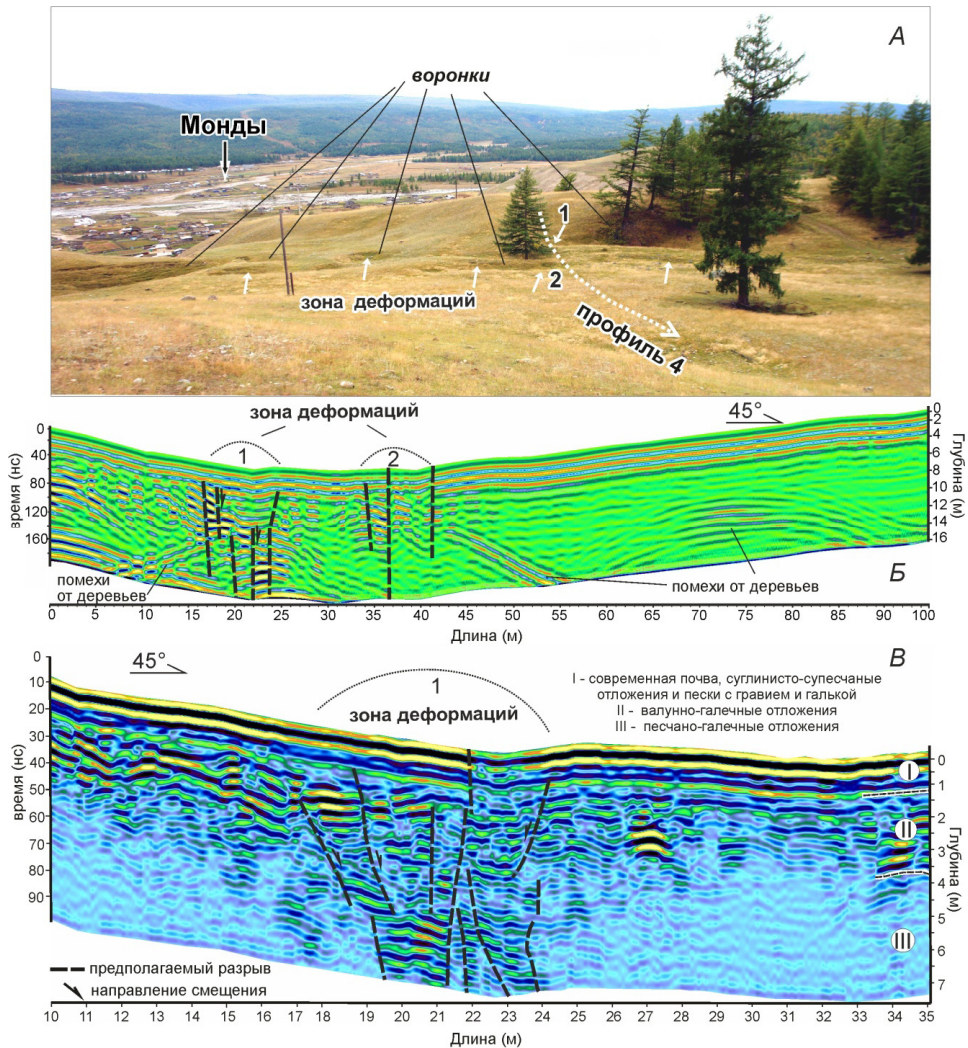


Рис. 3. Зона сейсмогенных деформаций Мондинского землетрясения 4.04.1950 г. за северо-западной окраиной пос. Монды (фото 2014 г., главная система сейсмодислокаций (по [11])) (А) и радарограммы профиля 4 с наложенной интерпретацией, полученные с помощью антенных блоков АБДЛ «Тритон» (Б) и АБ-250М (В)

Более детально строение линейной структуры рядом с воронкой можно видеть на фрагменте радарограммы, записанной антенным блоком АБ-250М по тому же профилю 4. На радарограмме по смене волновой картины выделяется как минимум 3 георадарных комплекса (рис. 3, В). Изучение геологических разрезов в канавах и близлежащих естественных выходах в оврагах позволяет предполагать, что первый слой от поверхности представлен современной почвой, суглинисто-супесчаными отложениями и песками с гравием и галькой. Второй слой сложен валунно-галечными отложениями с супесчаным цементом, а третий – песчано-галечными. Напротив воронки на глубине отмечается аномальная субвертикальная зона, в пределах которой обнаруживается проваливание отложений второго слоя, характеризующегося интенсивными амплитудами сигналов. Как и на предыдущем разрезе (рис. 3, Б), здесь интерпретируются разрывы, вдоль которых происходили близвертикальные смещения, обусловленные либо тектоническим действием, либо последующим гравитационным заполнением трещин. Вероятно, была и сдвиговая компонента, наблюдаемая на поверхности по смещению пней в описываемой зоне деформаций [21].

В целом, сравнивая радарограммы, полученные для зон разломов (см. рис. 2, В и 3, Б, В), следует отметить различия в углах падения разрывных нарушений и в строении разломных зон. Смещения по Дельтовому разлому выражены серией ступенчатых сбросов по наклонным и субвертикальным плоскостям, а деформации, связанные с Мондинским разломом, представляют собой зоны сближенных субвертикальных трещин. Кроме того, особенности состава отложений в зоне Мондинского разлома и воздействие на них тектонических, а затем и экзогенных процессов способствуют образованию в них пустот, над которыми интенсивно идет просадка грунта. Последнее отчетливо видно и на радарограмме (см. рис. 3, В), где оси синфазности второго слоя в верхней части зоны деформаций до глубины ~4 м полого погружаются с обеих ее сторон к центральной части. Глубже 4 м азимут падения зоны дислокаций и слоев в ней в изученном месте определяется как северо-восточный.

Проседание грунта. По сравнению с разрывообразованием этот процесс менее описан в эпицентральных зонах исторических и современных землетрясений. Провальные воронки в Прибайкалье образовывались при Муйском (1957 г., $M_s = 7,6$) [12], Среднебайкальском (1959 г., $M_s = 6,8$) [13] и Мондинском (1950 г., $M_s = 7,0$) [11] землетрясениях. Известно также, что сейсмические события 1967 г. в районе оз. Большое Леприндо (северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны) инициировали развитие термокарстового лога длиной 650 м, шириной 10–15 и глубиной до 6 м, а спустя 21 год после Муйского землетрясения сейсмогенные просадки увеличились в размере по внешним признакам [5].

Нами изучение просадок земной поверхности проводилось в зоне динамического влияния Мондинского разлома, в эпицентральной зоне одноименного землетрясения. Всего было зафиксировано 53 воронки. Для 36 из них измерены площадь и глубина, которые колеблются от 0,11 до 5100,69 м²

и от 0,1 до 8 м соответственно. Повсеместно в пространстве они сопряжены с разрывными нарушениями. Их связь с разрывами доказывается также изображениями на радарограммах, на которых видно, что проваливание осадков происходит над зонами сейсмогенных дислокаций (см. рис. 3).

Провальные воронки или их часть могли образоваться непосредственно в момент Мондинского землетрясения за счёт катастрофического сжатия рыхлого грунта. Позднее их развитие, вероятно, продолжилось за счёт суффозионных процессов и/или деградирования островной мерзлоты в сейсмогенных трещинах, которые послужили проводниками тепла, поступающего с поверхности в летнее время года. Отложения сезонноталого слоя, благодаря географо-климатическим условиям Мондинской впадины и ее окрестностей, также могли интенсивнее эродироваться в трещинах, и термокарст прогрессировал. Следует заметить, что глубина сезонного промерзания в гравийно-галечных грунтах Тункинской долины достигает 4 м [11], что совпадает с глубиной, до которой, судя по георадиолокационному разрезу, проваливаются осадки (см. рис. 3, В).

Другой причиной просадок по линии сейсмогенных разрывов является выдавливание разжиженного осадочного материала с глубины, в результате чего на поверхности образуется вал, а на сопряжении с ним – понижение (рис. 4). Такие просадки имеют значительно меньшие размеры по сравнению с термокарстовыми или суффозионными. Иногда они выстраиваются линейно, маркируя разрывы, слабо выраженные на поверхности.

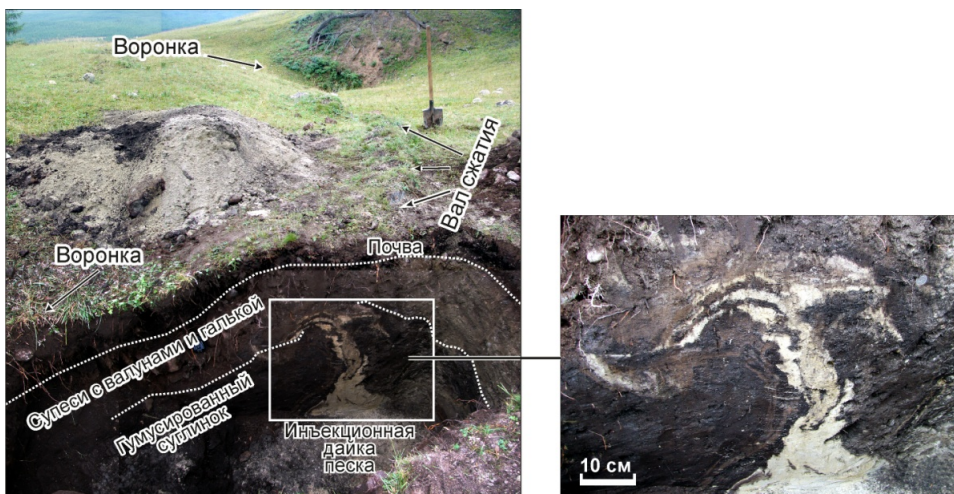


Рис. 4. Инъекционная дайка разжиженного мелкозернистого песка под валом сжатия и сопряженная с ней просадочная воронка в зоне динамического влияния Мондинского разлома. На заднем плане более глубокая воронка, напротив которой был выполнен профиль 4 (по [21] с изменениями)

Многочисленные просадки земной поверхности в совокупности с разрывными нарушениями, расположенными буквально над пос. Монды (см. рис. 3), вызывают определенные опасения, поскольку в случае сопоставимого по магнитуде землетрясения в ближней к населенному пункту зоне могут послужить благоприятным фактором для возникновения крупного сейсмогенного обвала.

Разжижение. Проявления сейсмического разжижения [10] были широко известны при Цаганском и Среднебайкальском землетрясениях [3; 13]. Как показывают наши находки инъекционных даек песка, они имели место также при Мондинском сейсмическом событии (см. рис. 4). Разжижение могло быть и при других исторических и современных событиях в подходящих для этого песчаных и песчано-гравийных отложениях, но многие землетрясения с $M \geq 5,2$ (пороговое значение магнитуды, при котором в регионе может начаться разжижение [4]) происходили в Байкале и охватывали слабозаселенные площади, оставаясь недостаточно обследованными.

Остаточными формами сейсмогенного разжижения в геологических разрезах являются некоторые типы сейсмиков, среди которых выделяют кластические дайки, образованные при флюидизации, и различные пластические структуры, выраженные грибообразными, пламенеобразными и другими формами [2; 9; 20]. Наиболее надежным индикатором в условиях Прибайкалья, для которого характерно развитие криогенных процессов, являются инъекционные дайки, указывающие по ряду внешних признаков на внедрение осадочного материала снизу вверх. Размеры и масштабы их распространения определенно указывают на близость первичного сейсмогенного разрыва, а формирование происходит в тесной взаимосвязи с разрывными нарушениями различных иерархических уровней [9].

Обнаружение следов разжижения просто на поверхности спустя десятки лет после землетрясения практически невозможно. Наиболее подходящее место для их поиска – это разрезы, например береговые обнажения рек и озер, а также разломные уступы. Результаты наших исследований в зоне влияния Дельтового разлома показывают, что признаки разжижения могут быть идентифицированы на георадиолокационных разрезах (рис. 5). Так в одном из мест аномалии представлены вертикальными «столбиками», начинающимися на глубине $-2-2,5$ м от поверхности и уходящими ниже на $1,5-2$ м. Они выделяются среди слоев по цветовой гамме на отображениях радарограмм методом переменной плотности и в канавах соответствуют отдельным инъекционным дайкам мощностью до 10 см (см. рис. 5). Примечательно, что аномалии, соответствующие дайкам, проявляются на расстоянии не более 60 м от разломного уступа при общей длине профиля 130 м.

В другом месте подобные аномалии выражены более широкими зонами мощностью до 3 м (рис. 6). Вскрытие одной из них не далее 50 м от места перехода уступа к днищу заболоченного участка, прилегающего к дельте р. Селенги, показало, что в верхней части на глубинах $1,4-2,68$ м аномалия соответствует участку интенсивного проявления микродаек белесого песка в лимонитизированном слое. В нижней части микродайки, по-видимому, переходят в зону трещиноватости либо участок, подвергшийся общему хаотическому разжижению.

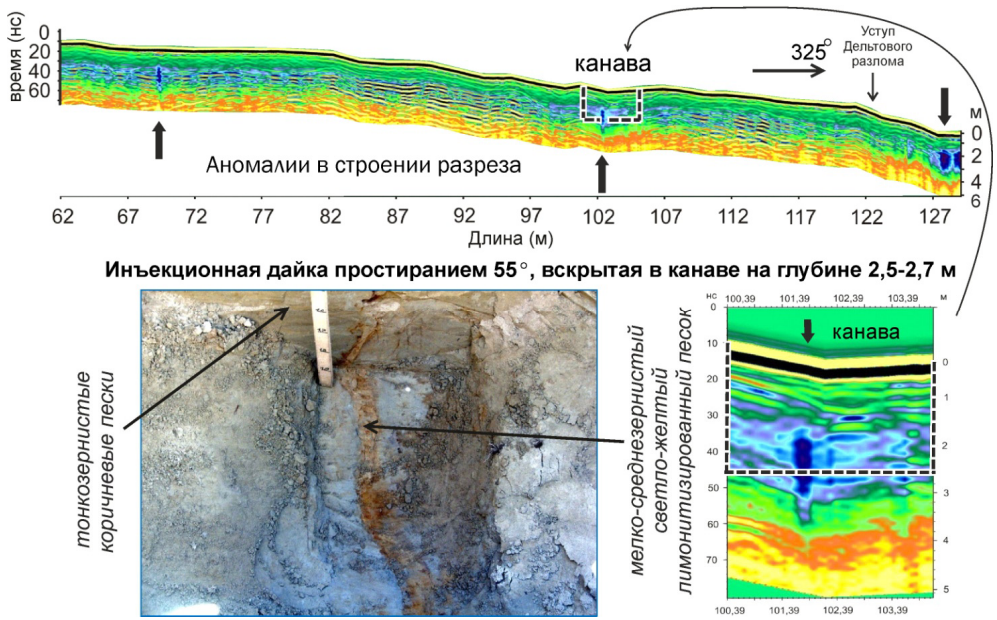


Рис. 5. Фрагмент радарограммы по профилю 44 вкост простираения песчаного уступа Дельтового разлома на юго-западной окраине с. Инкино и инъекционная дайка, вскрытая канавой

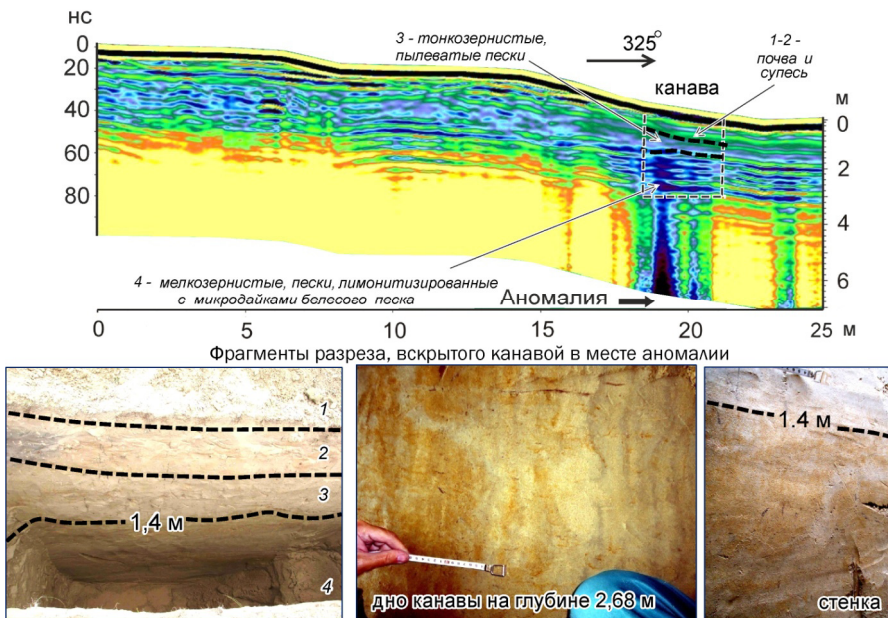


Рис. 6. Фрагмент радарограммы по профилю 38 вкост простираения песчаного уступа Дельтового разлома на юго-западной окраине с. Инкино и разрезы, вскрытые канавой

Следует отметить, что не все аномалии на радарограммах отвечают участкам разжижения, но заверка одной-двух аномалий позволяет с учетом геологического строения площади с большой вероятностью идентифицировать его следы. Факт обнаружения тех или иных проявлений этого процесса очень важен, так как осадки, подвергшись однажды сейсмическому разжижению, при последующих сильных сейсмических событиях будут вновь переходить в текучее состояние и создавать опасность для освоенных территорий. В Прибайкалье потенциально опасными для возникновения разжижения осадков являются внутренние части суходольных впадин Байкальской рифтовой зоны вблизи крупных рек, таких как, например, Иркут, Баргузин, Верхняя Ангара, и преимущественно песчаные побережья оз. Байкал. Кроме того, как было показано ранее, 69 % случаев проявления этого процесса происходит не далее 1 км от разломов [4].

Заключение

В целом проведенные исследования показали высокую информативность метода георадиолокации в комплексе с геолого-структурными методами для выявления следов сейсмически индуцированных геологических процессов, таких как разрывы, воронки и просадки, структуры разжижения. Их проявления часто взаимосвязаны между собой и ведущую роль в этом играет разрывообразование, которое при сейсмическом воздействии предшествует формированию провальных воронок и инъекционных даек. Над местами выбросов разжиженного материала и трещинами могут образовываться просадки грунта, что во многом зависит от состава отложений и географо-климатических условий развития района исследований.

Изучение сейсмогенных деформаций с помощью георадара позволило выявить различия в строении зон дислокаций, возникших в четвертичных отложениях различного состава в условиях преимущественного сдвига на западном окончании Тункинской долины и растяжения в центральной части Байкальской впадины. Разрывные деформации, связанные с Мондинским разломом вблизи одноименного поселка, представляют собой зоны сближенных субвертикальных трещин, а в зоне Дельтового разлома они образуют серию ступенчатых сбросов. По георадарному профилю в районе с. Дубинино определено суммарное вертикальное смещение 2,8 м, произошедшее при Цаганском землетрясении 1862 г., что совпадает с ранее установленной подвижкой в траншее между селами Шерашево и Инкино.

В результате интерпретации радарограмм в зоне Дельтового разлома на юго-западной окраине с. Инкино выявлены проявления разжижения на глубинах 2,5–2,7 м на профиле 44 и 1,5–2,68 м на профиле 38. В зоне Мондинского разлома напротив одной из провальных воронок зафиксировано, что проседание грунта происходит над системой субвертикальных разрывов до глубины ~4 м, что совпадает с максимальной глубиной сезонного промерзания гравийно-галечных отложений Тункинской долины.

Эффективность использования метода георадиолокации в совокупности с геолого-структурными наблюдениями показывает, что возможно его более широкое применение для решения научно-практических задач, связанных с изучением разломных зон и следов проявлений опасных геологических процессов.

Работа выполнена в Институте земной коры СО РАН при частичной поддержке Российским научным фондом, проект № 14-17-00007.

Список литературы

1. Владов М. Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
2. Гладков А. С. Сейсмичность юга Восточной Сибири: проблемы и перспективы изучения / А. С. Гладков, О. В. Лунина // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1, № 3. – С. 249–272.
3. Демин Э. В. Антология Провала: Исторические материалы о катастрофическом Цаганском землетрясении 1862 г. – Провале на Байкале / Э. В. Демин. – Улан-Удэ : Администрация Кабан. р-на Респ. Бурятия, 2005. – 296 с.
4. Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии / О. В. Лунина [и др.] // Геология и геофизика. – 2014. – № 8. – С. 1294–1313.
5. Лапердин В. К. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири / В. К. Лапердин, Р. А. Качура. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2010. – 312 с.
6. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М. : Наука, 1977. – 535 с.
7. Палеосейсмогеология : в 2 т. : пер. с англ. / под ред. Д. П. Мак-Калпина ; под ред. А. Л. Строма. – М. : Науч. мир, 2011. – Т. 1 (гл. 1–5). – 560 с.
8. Палеосейсмогеология : в 2 т. : пер. с англ. / под ред. Д. П. Мак-Калпина ; под ред. А. Л. Строма. – М. : Науч. мир, 2011. – Т. 2 (гл. 6–9). – 400 с.
9. По следам Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале: результаты исследования вторичных косейсмических деформаций в рыхлых осадках / О. В. Лунина [и др.] // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 6. – С. 775–796.
10. Сейсмическое разжижение грунтов: механизм, последствия и инженерная оценка для целей сейсмического микрорайонирования территории / Е. А. Вознесенский [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 12. – С. 61–65.
11. Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / под ред. В. П. Солоненко. – Новосибирск : Наука, 1981. – 168 с.
12. Солоненко В. П. Живая тектоника в плейстоценовой области Муйского землетрясения / В. П. Солоненко // Изв. Акад. наук СССР. Сер. геол. – 1965. – № 4. – С. 58–70.
13. Солоненко В. П. Среднебайкальское землетрясение 29 августа 1959 года / В. П. Солоненко, А. А. Тресков. – Иркутск : Иркут. кн. изд-во, 1960. – 36 с.
14. Тресков А. А. Мондинское землетрясение (отчет о результатах предварительного изучения землетрясения 4 (5) апреля 1950 г.) / А. А. Тресков, Н. А. Флоренсов // Андрей Алексеевич Тресков. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2006. – С. 166–188.
15. A reappraisal of the 1950 (Mw 6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone / B. Delouis [et al.] // Terra Nova. – 2002. – Vol. 14, N 6. – P. 491–500.
16. Daniels D. J. Surface-Penetrating Radar / D. J. Daniels. – London, UK : The Institution of Electrical Engineers, 1996. – 734 p.
17. Davis J. L. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and stratigraphy / J. L. Davis, A. P. Annan // Geophysical Prospecting. – 1989. – Vol. 37. – P. 531–551.
18. Geometry and kinematics of recent deformation in the Mondy–Tunka area (south-westernmost Baikal rift zone, Mongolia–Siberia) / A. Arjannikova [et al.] // Terra Nova. – 2004. – Vol. 16. – P. 265–272.

19. Paleoseismology / ed. J. P. McCalpin. – San Diego : Academic press, 1996. – 585 p.
20. Seismites: An attempt at critical analysis and classification / C. Montenat [et al.] // Sedimentary Geology. – Vol. 196. – P. 5–30.
21. The 1950 $M_w = 6,9$ Mondy earthquake in southern East Siberia and associated deformations: facts and uncertainties / O. V. Lunina [et al.] // Journal of Seismology. – 2015. – Vol. 19, N 1. – P. 171–189.

Features of Seismically-Induced Geological Processes in Fault Zones of Pribaikal'e (based on structural and GPR data)

O. V. Lunina, A. S. Gladkov

Abstract. Based on geological, structural and GPR data, features of seismically-induced geological processes in the Delta and Mondy active fault zones have been investigated. Traces of rupturing, liquefaction and subsidence have been found in trenches and radar-grams. The deformations are often interrelated and the ruptures preceding the sinkholes and injection dikes under seismic impact play a key role in that. Using the OKO-2 GPR equipment with AB-250M and ABDL «Triton» antennas, we revealed the differences in the pattern of seismogenic dislocation zones formed in Quaternary lithologies under dominating transcurrent regime in the western termination of the Tunka valley and tension regime in the central part of the Baikal basin. The rupture deformations associated with the Mondy fault in vicinity of the village of Mondy constitute the zones of contiguous near-vertical fractures. In the Delta fault, they form a stepped system of normal faults. Liquefaction features have been revealed in the southwestern outskirts of the village of Inkino at a depth of 2,5–2,7 m in one GPR profile and 1,5–2,68 m in another GPR profile. In the Mondy fault zone, in front of a sinkhole, subsidence takes place over the system of the near-vertical fractures up to depth of ~4 m that coincides with maximum depth of seasonable frost of gravel-pebble sediments of the Tunka valley. In whole, the performed studies have showed a high informative value of GPR method in combination with geological and structural observations for detection of traces of seismically-induced geological processes.

Keywords: rupturing, liquafaction, subsidence, earthquake, fault, ground penetrating radar, Pribaikal'e.

Лунина Оксана Викторовна
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)42-47-59

Lunina Oksana Viktorovna
Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: 8(3952)42-47-59

Гладков Андрей Станиславович
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)42-47-59

Gladkov Andrey Stanislavovich
Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: 8(3952)42-47-59