

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24 + 550.34+550.348

ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА ПРИ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ НА ГЛАВНОМ САЯНСКОМ РАЗЛОМЕ  
(юг Восточной Сибири)

И.А. Денисенко<sup>1,2</sup>, О.В. Лунина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

На основании имеющихся данных о возможном землетрясении в зоне Главного Саянского разлома построены прогнозные модели локализации процесса разжижения грунта для сейсмических событий с магнитудами  $M_S = 7.5$  и  $8.0$ . Установлено, что для магнитуды  $7.5$  расстояние, на котором относительно вскрывшегося сейсмогенного разрыва проявится разжижение, равно  $40$  км. Для  $M_S = 8.0$  предельное расстояние от активизированного сегмента Главного Саянского разлома будет  $112$  км. В расчетных моделях учтено влияние разломов на проявление прогнозируемого процесса, что дало возможность более точно выделить области с разной вероятностью проявления события. В зоны возможного распространения разжижения при магнитуде  $7.5$  попадают населенные пункты Култук, Слюдянка, Байкальск, Аршан, Подкаменная. При  $M_S = 8.0$  процесс распространится на большие территории, захватив города Усолье-Сибирское, Ангарск, Иркутск, особенно те районы, которые расположены вблизи р. Ангара и ее крупных притоков. Подобная оценка может быть проведена для других природных ситуаций, когда известен сейсмогенерирующий разлом, разломно-блоковая делимость земной коры для плиоцен-четвертичного этапа активизации, магнитуда землетрясения и потенциально разжижаемые грунты в пределах моделируемой площади.

*Разжижение, землетрясение, разломы, прогнозирование.*

PREDICTIVE MODELS FOR THE LOCALIZATION OF SOIL LIQUEFACTION  
IN EARTHQUAKES ON THE MAIN SAYAN FAULT (*southern East Siberia*)

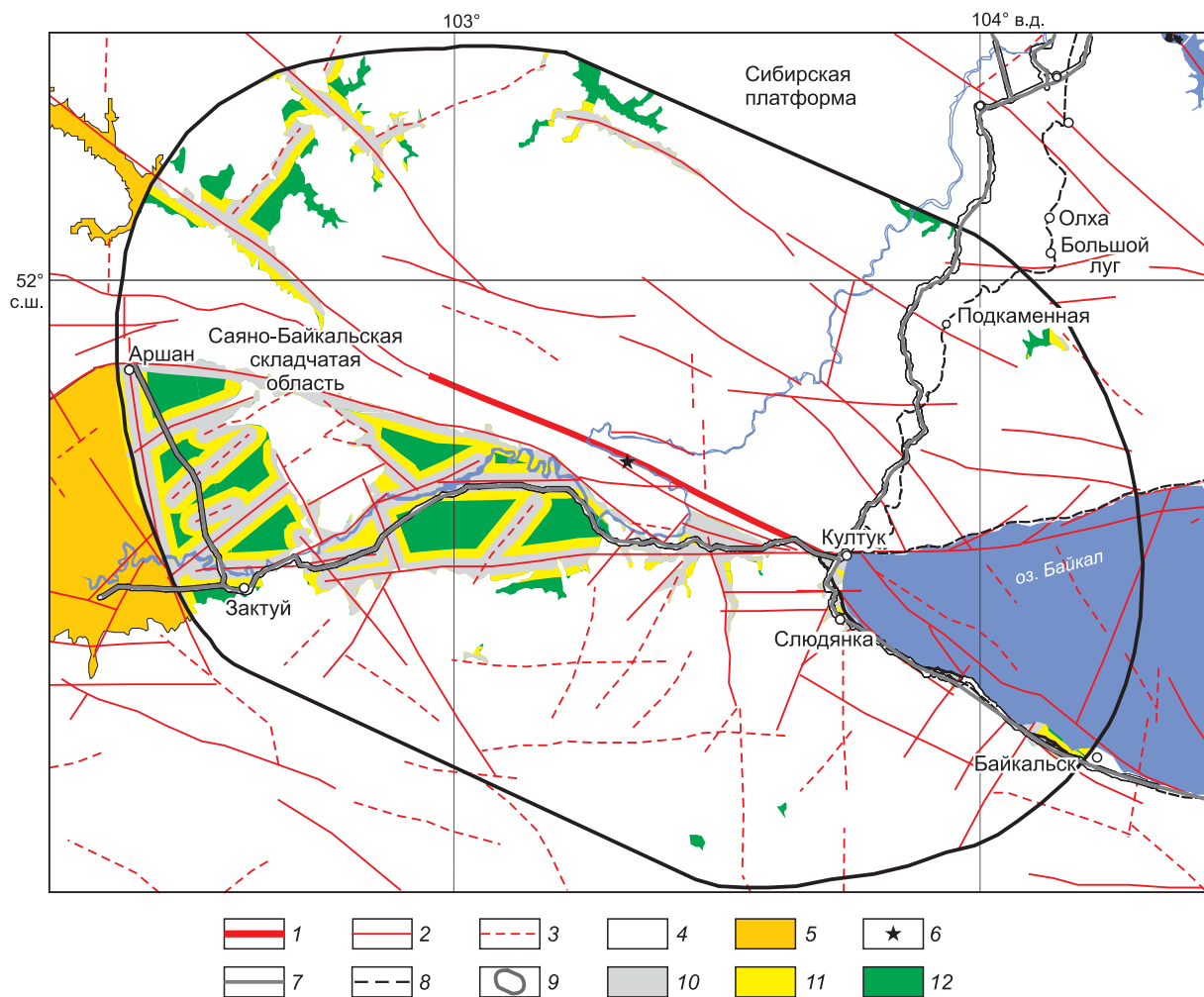
I.A. Denisenko and O.V. Lunina

Predictive models for the localization of soil liquefaction for seismic events with magnitudes  $M_S = 7.5$  and  $8.0$  were constructed based on available data on a possible earthquake in the zone of the Main Sayan Fault. It has been established that for  $M_S = 7.5$ , liquefaction will extend over a distance of  $40$  km from the causative seismogenic fault. For  $M_S = 8.0$ , the limiting distance from the activated segment of the Main Sayan Fault will be  $112$  km. The calculation models take into account the effect of faults on the predicted process, which allows a more accurate identification of areas with different probabilities of this event. Zones of possible liquefaction at  $M_S = 7.5$  include the towns of Kultuk, Sludyanka, Baikal'sk, Arshan, and Podkamennaya. At  $M_S = 8.0$ , the liquefaction process will spread over a large area including the cities of Usol'e-Sibirskoe, Angarsk, and Irkutsk, especially localities near the Angara River and its major tributaries. Similar evaluation can also be made for other natural situations with known seismogenic faults, fault-block divisibility of the Earth's crust for the Pliocene–Quaternary stage of tectonism, earthquake magnitude, and potentially liquefiable soils within the model area.

*Liquefaction, earthquake, faults, prediction*

ВВЕДЕНИЕ

Главный Саянский разлом (ГСР) прослеживается в северо-западном направлении от южной оконечности оз. Байкал до бассейна р. Мана и является крупнейшей структурной границей между кристаллическим выступом фундамента Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой областью (рис. 1, 2). Протяженность разлома составляет почти  $1000$  км. Строение выражено зонами субпарал-



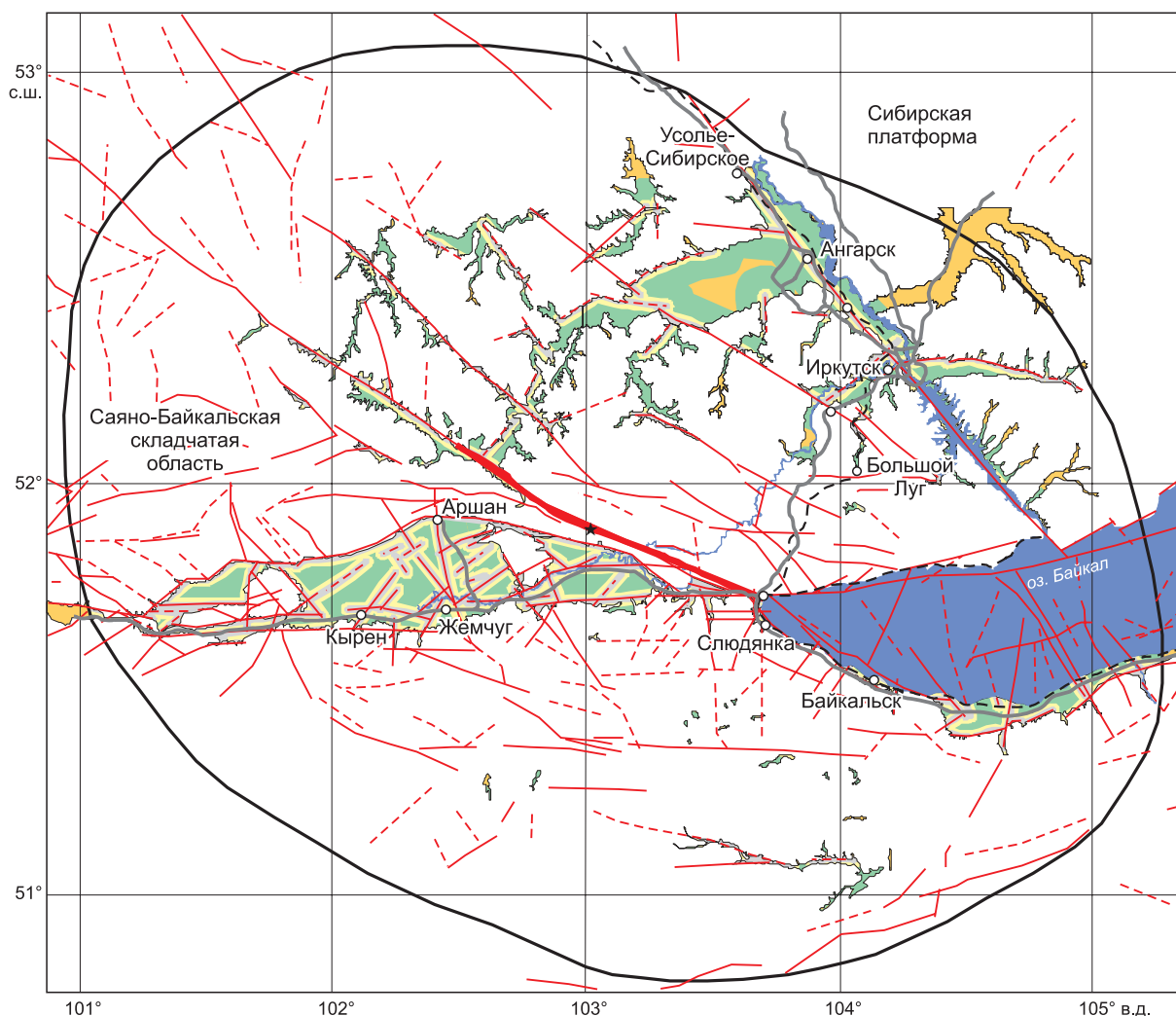
**Рис. 1. Модель локализации процесса разжижения при землетрясении с магнитудой 7.5.**

1 — сегмент сейсмогенерирующего разлома, используемый для моделирования; 2 — достоверные разломы; 3 — предполагаемые разломы; 4 — коренные породы; 5 — четвертичные отложения, неподвергшиеся разжижению; 6 — центр Восточно-Саянской палеосейсмодислокации [Чипизубов и др., 1999]; 7 — автодороги; 8 — железнодорожные пути; 9 — граница, в пределах которой возможно проявление разжижения; 10 — область проявления процесса разжижения на расстоянии 1 км от осевой части разлома с вероятностью возникновения 0.68; 11 — область проявления процесса разжижения на расстоянии 2 км от осевой части разлома с вероятностью возникновения 0.18; 12 — область проявления процесса разжижения на расстоянии 8 км от осевой части разлома с вероятностью возникновения 0.14.

лельных разрывов, сопровождающихся дроблением, трещиноватостью и милонитизацией. Заложившись в докембрии, глубинный разлом активно влиял на тектоническую обстановку пограничной зоны Сибирской платформы и складчатой области. В настоящее время сейсмический потенциал его юго-восточного сегмента соответствует магнитуде 8 [Имаев и др., 2015].

С помощью методов сейсмологии и GPS-геодезии было установлено, что в данный момент времени ГСР находится в запертом состоянии, в зоне его динамического влияния происходит накопление упругих напряжений, разрядка которых будет сопровождаться сильным землетрясением [Саньков и др., 2004]. Также было рассчитано, что при вероятности периодичности 95 % Главный Саянский разлом может представлять опасность начиная примерно с 2120 г. При снижении порога вероятности до 72 % время начала периода потенциальной опасности снижается примерно до 2030 г. [Иванов и др., 2009]. Учитывая, что ГСР находится вблизи крупных населенных пунктов и даже пересекает транспортные магистрали федерального значения, встает вопрос о необходимости изучения закономерности распределения опасных геологических процессов вблизи Главного Саянского разлома.

Как известно, при сильных землетрясениях может происходить разжижение водонасыщенных дисперсных грунтов под действием сейсмических волн, которое сопровождается почти полной потерей их несущей способности. Считается, что сейсмическое разжижение происходит из-за резкого снижения



**Рис. 2. Модель локализации процесса разжижения при землетрясении с магнитудой 8.0.**

Усл. обозн. см. на рис. 1.

прочности связного грунта в результате разрушения структурных связей при прохождении через него сейсмических волн [Вознесенский и др., 2005]. В результате развиваются деформации, проявляющиеся течением грунтовой массы. Последствия таких событий могут быть катастрофическими. В связи с этим оценка разжижения водонасыщенных дисперсных грунтов при ожидаемых землетрясениях и его последствий является важнейшей и комплексной инженерной задачей для проектирования и строительства сооружений в сейсмических районах, а также для предотвращения чрезвычайных ситуаций в населенных пунктах, находящихся в области сейсмической опасности.

Во многих странах проблеме изучения восприимчивости грунта к разжижению при сейсмических событиях уделяется очень большое внимание. Так, например, Геологической службой США были проведены исследования территории Северо-Западного округа Аламеда и составлена карта разжижаемости грунтов при магнитуде 7.1 [Holzer et al., 2010]. Также ученые США движутся к созданию нового типа карт реакции грунтов на землетрясения «LiqueMap», которые будут отражать опасные геологические процессы в реальном времени в течение 20 мин после землетрясения [Holzer et al., 2006a,b]. После катастрофы возможно будет за относительно короткое время в режиме онлайн предсказать повреждения уязвимых объектов инфраструктуры и незамедлительно отправить на место спасательный отряд. В России же таких карт нет, по крайней мере, в открытом доступе, и исследования на восприимчивость грунтов к разжижению практически не проводятся.

Целью настоящей работы является построение прогнозных моделей локализации процесса разжижения грунта для возможных землетрясений в зоне ГСР.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ

Для построения прогнозных моделей мы использовали закономерности, которые свидетельствуют, что при наличии грунтов, способных к разжижаемости, проявления разжижения распространяются в зависимости от магнитуды на определенное расстояние от сейсмогенерирующего эпицентра, и ближайших разломов [Лунина и др., 2014]. При оценке потенциально опасных площадей, в первую очередь, учитывался тип и состав грунта. На исследованной территории (см. рис. 1, 2) грунты, способные к разжижению, в основном представлены песками разной зернистости, галечником и супесью, имеющими четвертичный возраст. Также немаловажным фактором является наличие грунтовых вод. В пределах данной территории в зависимости от выделенных водоносных горизонтов глубина залегания подземных вод в среднем варьируется от 0.3 до 25 м [Лапердин и др., 2016], что является благоприятным условием для возникновения разжижения в случае землетрясения [Seed, 1979; Obermeier et al., 2005]. Сам процесс начинает активизироваться при землетрясениях с  $M_S \geq 5.2$  [Андреев, Лунина, 2012]. В рассматриваемом случае предполагается, что в юго-восточной части ГСР готовится сильное землетрясение  $M > 7$  [Саньков и др., 2004].

В качестве основополагающего элемента для построения прогнозных моделей послужила Восточно-Саянская палеосейсмодислокация, приуроченная к ГСР. Палеосейсмодислокация фиксируется на протяжении 60 км. Повторные периоды землетрясений в среднем составляют 2300 лет. Максимальная магнитуда составляет 7.6—8.0 [Чипизубов и др., 1999]. В отсутствии иных данных ее центр принимается за эпицентр землетрясения (см. рис. 1). Проанализировав вышеупомянутые работы, местоположение и структуру ГСР было принято решение, что для построения моделей целесообразно использовать магнитуды 7.5 и 8.0.

От центра Восточно-Саянской палеосейсмодислокации с помощью уравнения регрессий для сдвигов [Лунина, 2001]:

$$\lg L = -1.95 + 0.49 \cdot M_S,$$

где  $M_S$  — магнитуда землетрясений, определенная по поверхностным волнам,  $L$  — длина сейсмогенного разрыва (км), были вычислены длины прогнозируемых сейсмогенных разрывов при разных  $M_S$ . Для магнитуды 7.5 общая протяженность сегмента сейсмогенерирующего разрыва равна 53 км, т. е. по 26.5 км в обе стороны от центра палеосейсмодислокации (см. рис. 1). Для магнитуды 8.0 протяженность сейсмогенерирующего разрыва 94 км. При отложении этого расстояния было принято решение сместить центр палеосейсмодислокации в северо-западном направлении вдоль разлома, тем самым достигнуть распределения равного расстояния по обе стороны от палеосейсмодислокации, не затрагивая акватории озера Байкал.

Следующим этапом в построении модели был расчет предельного расстояния, на котором могут проявиться процессы разжижения при магнитуде 7.5 и 8.0 с помощью уравнения граничной кривой из работы [Лунина и др., 2014]

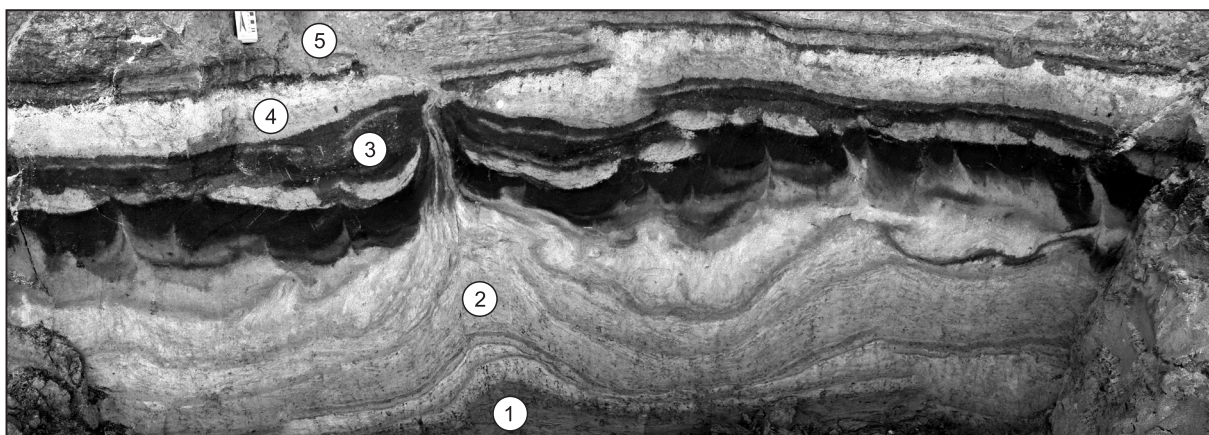
$$R_f = 109.2 \cdot M_S^2 - 1549.5 \cdot M_S + 5519.3,$$

где  $R_f$  — расстояние от сейсмогенерирующего разлома,  $M_S$  — магнитуда землетрясений, определенная по поверхностным волнам. Вычисленное предельное расстояние от сейсмогенерирующего разлома, на котором могут проявиться процессы при магнитуде 7.5, равно 40 км, и, соответственно, при магнитуде 8.0—112 км.

Согласно гистограммам распределения геологических опасностей [Лунина и др., 2014], количество случаев их возникновения зависит от близости к разломам земной коры. Следуя этой закономерности, на расстоянии в 1 км от осевой части ближайшего разлома, сосредоточенно 68 % возможных проявлений процессов разжижения. На расстоянии в 2 км от осевой части разлома 18 % и на расстоянии 8 км 14 %.

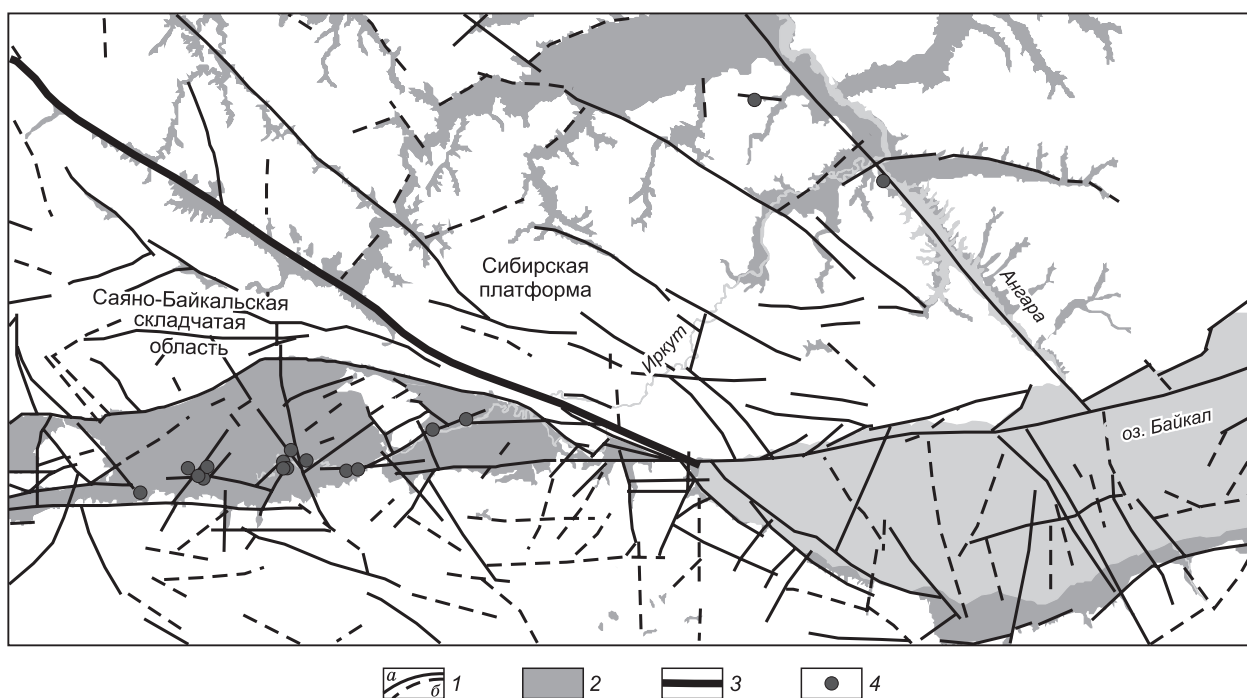
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным расчетным данным были построены модели локализации процесса разжижения для магнитуд 7.5 и 8.0 (см. рис. 1, 2). Полученные результаты показывают возможные места локализации процесса разжижения в рыхлых грунтах с учетом разломно-блокового строения земной коры. Для более точных результатов нужно проводить лабораторные исследования грунтов, знать, как различный грунт реагирует к сейсмическому воздействию, проводить лабораторную оценку разжижаемости грунтов. Тем не менее разломы, как правило, трассируются вдоль речных долин, где уровень грунтовых вод расположен в пределах первых метров — десятков метров, и чаще всего рыхлые четвертичные отложения находятся в водонасыщенном состоянии. При удалении от разлома степень водонасыщения грунтов уменьшается и, как следствие, уменьшается вероятность возникновения разжижения при землетрясении.



**Рис. 3.** Разрез голоценовых отложений со следами разжижения грунта в зоне Гужирского разлома (51.785° с.ш., 102.891° в.д.) в левом борту р. Иркут у с. Гужирь.

Следы разжижения представлены инъекционной дайкой и пламенивидными структурами. Радиоуглеродный возраст погребенных почв (слой № 3) равен 2970±55 лет (пр. СОАН-7209). 1 — глины; 2 — тонкозернистые пески с прослоями суглинки; 3 — деформированные погребенные почвы с линзами супесей и суглинков; 4 — светло-коричневые мелкозернистые пески; 5 — переслаивающиеся супеси и суглинки разных оттенков коричневатого цвета.



**Рис. 4.** Карта проявлений палеоразжижения на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны.

1 — сейсмоактивные разломы: достоверные (а), предполагаемые (б); 2 — четвертичные отложения; 3 — Главный Саянский разлом; 4 — следы разжижения грунта в голоценовых отложениях, задокументированные при изучении палеоземлетрясений.

Построенные модели хорошо согласуются с конкретными природными случаями проявлений процесса разжижения, зафиксированными в разрезах в виде особых структурных форм (рис. 3) на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории Сибирской платформы. Большинство точек наблюдений, в которых задокументированы следы данного процесса, непосредственно находятся вблизи разломов (рис. 4).

Что касается расчетов максимально возможных расстояний, на которые может распространиться процесс при магнитудах 7.5 и 8.0, то они вполне удовлетворяют конкретным природным ситуациям.

Для подтверждения этого рассмотрим землетрясения, для которых были зафиксированы случаи разжижения на различных удалениях от эпицентра.

При Нефтегорском событии 27.05.1995 г. произошло сильное землетрясение с  $M = 7.5$ . На территории Нефтегорска грунты представлены в основном мелкозернистыми и пылеватыми песками мало-влажными, влажными и обводненными мощностью более 10 м. Грунтовые воды находятся в пределах города, вскрыты на отметках от 1.5 м до 6.0 м. Разжижение грунтов было наиболее проявлено на Пильтунской косе, удаленной от эпицентра на 25—30 км. В местах излияния обводненных песчано-глинистых масс на земной поверхности образовались многочисленные кратеры диаметром до 25—30 м и осадки грунта. Олюторское землетрясение произошло 21.04.2006 г. ( $M_S = 7.7$ ). Отложения представлены песками разной зернистости, гравийными и галечниковыми грунтами с песчаным заполнителем. Расстояние, на котором максимально проявился процесс, равно 105 км от эпицентра. Произошло практически повсеместное разжижение грунтов, сопровождавшееся фонтанированием и излиянием из трещин песка, мелкой гальки, щебня и кусков угля [Константинова, 2013]. В нашем случае, потенциально разжижаемые грунты представлены песками разной зернистости, галечником и супесью, а максимальное расстояние, на котором проявится процесс при магнитуде 7.5 равно 40 км, при 8.0—112 км, что вполне удовлетворяет конкретным природным ситуациям.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проделанной работы нам удалось с помощью установленных ранее закономерностей построить прогнозные модели разжижения грунта в зоне ГСР с магнитудами 7.5 и 8.0. Для  $M_S = 7.5$  расстояние, на котором проявится процесс разжижения относительно вскрывшегося сейсмогенного разрыва длиной 53 км, равно 40 км. Для  $M_S = 8.0$  предельное расстояние проявления разжижения фиксируется на расстоянии 112 км относительно сейсмогенного разрыва, длина которого составит 94 км. В расчетных моделях учтено влияние разломов на проявление прогнозируемого процесса, что дало возможность более точно выделить области с разной вероятностью проявления события. В зоны возможного распространения разжижения при магнитуде 7.5 попадают населенные пункты Култук, Слюдянка, Байкальск, Аршан, Подкаменная. При  $M_S = 8.0$  процесс распространится на большие территории, захватив города Усолье-Сибирское, Ангарск, Иркутск, особенно районы, расположенные вблизи р. Ангара и ее крупных притоков, вдоль которых трассируются разломы.

Разработанные модели могут быть использованы для проектирования и строительства сооружений в сейсмических районах, а также для предотвращения чрезвычайных ситуаций в населенных пунктах, находящихся в области сейсмической опасности. При детальном исследовании свойств грунтов возможно внесение изменений в прогнозные модели с целью их уточнения.

Подобное моделирование может быть проведено для других природных ситуаций, когда известны сейсмогенерирующий разлом, разломно-блоковая делимость земной коры для плиоцен-четвертичного этапа активизации, магнитуда землетрясения и потенциально разжижаемые грунты в пределах исследуемой площади.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-17-00007).

### ЛИТЕРАТУРА

**Андреев А.В., Лунина О.В.** Параметры землетрясений и пространственное распределение косейсмических эффектов на юге Сибири и в Монголии // Вопросы инженерной сейсмологии, 2012, т. 39, № 2, с. 37—68.

**Вознесенский Е.А., Фуникова В.В., Кушкарева Е.С., Коваленко В.Л.** Сейсмическое разжижение грунтов: механизм, последствия и инженерная оценка для целей сейсмического микрорайонирования // Разведка и охрана недр, 2005, № 12, с. 61—65.

**Гладков А.С., Лунина О.В.** Сейсмита юга Восточной Сибири: проблемы и перспективы изучения // Геодинамика и тектонофизика, 2010, № 3, с. 249—272.

**Иванов А.В., Саньков В.А., Смекалин О.П., Чипизубов А.В.** Оценка периода повторяемости сильных землетрясений в зонах Главного Саянского и Тункинского разломов по данным радиоуглеродного датирования и статистического анализа // Вопросы инженерной сейсмологии, 2009, т. 36, № 2, с. 70—80.

**Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В.** Карта сейсмоструктоники Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, с. 275—287.

**Константинова Т.Г.** Разжижение грунтов и макросейсмические последствия сильных землетрясений Северной Евразии // Инновации в науке, 2013, №17, с. 167—175.

**Лапердин В.К., Леви К.Г., Имаев В.С., Молочный В.Г.** Опасные геологические процессы в Юго-Западном Прибайкалье. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2016, 199 с.

**Лунина О.В.** Влияние напряженного состояния литосферы на соотношения параметров сейсмогенных разрывов и магнитуд землетрясений // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (9), с. 1389—1398.

**Лунина О.В., Андреев А.С., Гладков А.А.** Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (8), с. 1294—1313.

**Саньков В.А., Чипизубов А.В., Лухнев А.В., Смекалин О.П., Мирошниченко А.И., Кале Э., Девершер Ж.** Подход к оценке опасности сильного землетрясения в зоне Главного Саянского разлома по данным GPS-геодезии и палеосейсмологии // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (11), с. 1369—1376.

**Чипизубов А.В., Смекалин О.П.** Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (6), с. 936—947.

**Holzer T.L., Bennett M.J., Noce T.E., Padovani A.C., Tinsley J.C.** Liquefaction hazard mapping with LPI in the greater Oakland, California, area // Earthquake Spectra, 2006a, v. 22, № 3, p. 693—708.

**Holzer T.L., Blair J.L., Noce T.E., Bennett M.J.** LiqueMap: A real-time postearthquake map of liquefaction probability in National Conference on Earthquake Engineering // 8th, San Francisco, 2006b, Proceedings, Paper 89, p. 10.

**Holzer T.L., Noce T.E., Bennett M.J.** // Predicted liquefaction in the Greater Oakland area and Northern Santa Clara Valley during a repeat of the 1868 Hayward Fault (M6.7–7.0) earthquake // 3rd Conference on earthquake hazards in the eastern San Francisco Bay Area: Hayward, CA, California Geological Survey Special Report 219, 2010, p. 147—163.

**Obermeier S.F., Olson S.M., Green R.A.** Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking // Engin. Geol., 2005, v. 76. p. 209—234.

**Seed H.B.** Soil liquefaction and cyclic mobility for level ground during earthquakes // ASCE J. Geotech. Engin., 1979, v. 105, № 2, p. 201—255.

*Рекомендована к печати 28 января 2017 г.  
И.С. Новиковым*

*Поступила в редакцию 2 ноября 2016 г.,  
после доработки — 13 января 2017 г.*