

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТОВ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Т.Г. Константинова¹, И.Ф. Делемень²

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail:lrg334@kscnet.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail:delemen@kscnet.ru

Известно, что при сильных землетрясениях повреждения зданий и сооружений вызывается не только и не столько сейсмическими колебаниями, но также различными процессами, сопровождающими землетрясения [Сейсмический..., 1981; Эйби, 1982]. Эти процессы принято называть вторичными сейсмическими опасностями. При этом разрушения сооружений нередко обусловлены неблагоприятным поведением рыхлых грунтов основания, и одним из наиболее значимых факторов такого поведения является разжижение грунтов, сопровождающееся частичной или полной потерей их прочности [Вознесенский, 1998]. Примеры катастрофических разрушений зданий и сооружений, а также человеческих жертв при сильных землетрясениях многочисленны.

В настоящее время накоплен достаточно большой объём сведений о проявлении процессов разжижения грунтов при землетрясениях, происходящих в различных тектонических обстановках. Однако, сведения об особенностях проявления таких процессов в вулканических областях пока немногочисленны. В значительной степени это связано с тем, что предполагается отсутствие каких-либо специфических особенностей разжижения в таких районах, по сравнению с территориями, удалёнными от регионов вулканической активности. Полученные авторами данные о макросейсмических последствиях сильных землетрясений в вулканических областях Камчатки и Армении свидетельствуют о том, что грунты вулканического происхождения отличаются по своим несущим свойствам от грунтов невулканических, в том числе при проявлении процессов разжижения.

Для того чтобы лучше понять эти особенности, рассмотрим поведение грунтов невулканического происхождения при их разжижении. Отмечают, что при достаточно сильном сейсмическом воздействии разжижению подвержены преимущественно водонасыщенные грунты [Вознесенский, 1998]. Такое поведение особенно характерно для рыхлых обводнённых песков, а механизм разжижения сводится к исчезновению непосредственного контакта между песчаными зёрнами. Эти частицы оказываются взвешенными во вмещающей их воде. Из-за того, что даже разжижённая порода характеризуется конечными значениями водопроницаемости, то высвобождение воды происходит в течение некоторого времени после начала сейсмических колебаний, и в итоге сейсмическое разжижение грунтов часто сопровождается разрушением зданий (независимо от их конструктивных решений), коммуникаций и транспортных сетей.

Грунты вулканического происхождения отличаются от аналогичных отложений, образовавшихся вдали от вулканов, несколькими важными особенностями. Перечислим главные из них.

1. В таких отложениях содержится большое количество частиц стекла, которое склонно к значительному изменению под воздействием воды и воздуха. Это приводит к увеличению пористости, водосодержания и других параметров, определяющих склонность грунтов к разжижению. Кроме того, наличие большого количества стекловатых частиц приводит к повышению значений коэффициента внутреннего сцепления и угла внутреннего трения. Поэтому такие грунты в сухом состоянии хорошо держат угол естественного откоса, однако при вибрациях и сейсмических колебаниях они теряют устойчивость. Так, например, подверженные разжижению пеплосодержащие водонасыщенные пески (от пылеватых до дресвянистых), слагающие делювиально-пролювиальные отложения в г. Петропавловске-Камчатском, были испытаны на вибростенде. Результаты испытаний показали, что удельное сцепление уменьшилось в 4 раза, угол внутреннего трения уменьшился с 38° до 30°. В течение 30 секунд после начала вибрации произошла осадка, которая сопровождалась оттоком воды. Амплитуды колебаний грунта на частотах 5 и 10 Гц возросли в 30 раз [Константинова, 2000]. Эти испытания подтвердили ухудшение прочностных свойств при разжижении грунтов.

2. Повсеместно вся территория вокруг четвертичных вулканов покрыта почвенно-пирокластическим чехлом, мощность которого может достигать (даже на удалении от них) нескольких метров. Грунты, представленные отложениями чехла, практически полностью сложены пеплами, и при малейшем увлажнении становятся пластичными и приобретают текучую консистенцию.

3. Вулканические сооружения в пределах островных дуг, в том числе на Камчатке, располагаются на прибрежных территориях. В этом случае формируются специфические лагунные, озёрные и пойменные литолого-фациальные обстановки, благоприятствующие образованию отложений, склонных к тиксотропности из-за большого содержания тонких частиц, высокой пористости и обводнённости пород. Так, например, при землетрясении 24.11.1971 г. при макросейсмическом обследовании последствий этого события было установлено, что наиболее значительные повреждения зданий наблюдались на участках, сложенных тонкозернистыми супесями лагунного происхождения. При землетрясении 1792 года на первой надпойменной террасе реки Паратунка (Камчатка) во многих местах образовались трещины, из которых извергалась на значительную величину вода и песок [Мушкетов, Орлов, 1893]. В последующем, при сейсмогеологическом изучении грунтов на территории пункта электротеллурических наблюдений «Верхняя Паратунка» нами было установлено наличие нептунических даек, сложенных супесями пойменной фации, и прорывающих вышележащие отложения надпойменной террасы. Такого же рода образования были обнаружены в долине р. Тойонка и некоторых других водотоков, а также в пределах ареалов развития отложений озёрного происхождения. В ночь с 4 на 5 февраля 1923 г. в Петропавловске-Камчатском произошло сильное и продолжительное колебание почвы, длившееся около 2 минут, при котором из малого Халактырского озера выпучило много земли и ила¹.

Кроме того, известны описания явлений, сопровождающих разжижение лагунных отложений при землетрясениях на Камчатке. Так, во время землетрясения 4 мая 1959 г. на Култушном озере (восточное побережье Авачинской бухты) в течение минуты наблюдалось около 30 гейзеробразных выбросов высотой до 3 м [Черемных, 1960]. При этом землетрясении из-за разжижения грунтов произошли наиболее сильные повреждения зданий на территории областной больницы, которая сложена отложениями лагунного происхождения. Култушное озеро представляет собой остаточный бассейн более крупной лагуны, занимающей территорию от Авачинской бухты до этой больницы.

Для всех этих отложений характерно то, что осадконакопление происходило в условиях размыва вулканических пород со значительным содержанием стекловатых частиц, а также периодическим поступлением в водные бассейны частиц пепла с тефрой, выпадающей при извержениях близлежащих вулканов.

4. Отличительной особенностью вулканических районов, в том числе и Камчатки, является развитие мощных толщ пемзовых песков и пемзовых туфов, обязанных своим происхождением гигантским кальдерообразующим извержениям. С ними было связано возникновение в плейстоцене Гореловской, Паужетской, Узон-Гейзерной и других кальдерных депрессий. Важной особенностью таких образований является то, что их поведение в какой-то степени подобно лёссам. В сухом состоянии они также хорошо держат угол естественного откоса и обладают хорошими несущими свойствами. Однако при сейсмических колебаниях происходит резкое снижение несущих свойств этих грунтов. Примечательно, что при полевых наблюдениях на территориях развития таких отложений наблюдаются многочисленные нептунические дайки, свидетельствующие о внедрении тонкозернистого материала как бы перемолотых пемз, в вышележащие и более молодые отложения иного генезиса. Такого рода дайки были описаны нами в пемзах, отложившихся в верхнем плейстоцене-голоцене в лимнических условиях в бассейне р. Паужетка (Паужетская кальдерная депрессия), а также в междуречье рек Фальшивая и Жирова (восточный борт кальдеры вулкана Горелого). Если разжижение пемзовых отложений в бассейне р. Паратунка могло быть связано с водонасыщенностью пемзовых песков и алевроитов, то тонкие пемзовые пески кальдеры Горелого относятся к так называемым «перевальным пемзам» [Леонов, 1986], имеющим эоловое происхождение, а расположение их на водоразделе не благоприятствует созданию условий обводнённости. Поэтому следует предположить, что в данном случае были реализованы

¹ Газета «Полярная звезда», № 14, от 5 февраля 1923 г.

механизмы разжижения, не связанные с высвобождением воды в обводнённых породах (разжижение, как результат взвешивания частиц сыпучей среды при вибрации, реологическое разжижение и т.д.).

5. Нередко происходит разжижение вулканических отложений не вследствие взвешивания частиц при вибрации или колебаниях, а из-за превышения критического уровня обводнённости породы при поступлении избыточного количества воды извне. Так, например, при закладке оснований под строительство Верхнее-Мутновской ГеоЭС произошло разжижение грунтов вследствие формирования направленного потока талых вод, устремившихся в горный массив под стройплощадкой по разломной зоне, сложенной гидротермально-изменёнными породами. При этом произошло разжижение монтмориллонитовых глин, слагающих приповерхностную часть разрывных нарушений на участке строительства. Известно, что в условиях полного водонасыщения возможно разрушение глинистых мостиков, связывающих пылеватые зерна таких грунтов, с разжижением всей породы [Осипов и др., 1989]. Более того, воздействие даже довольно слабой вибрации может ускорить этот процесс [Соколов, 1996].

6. В последнее время авторы обратили внимание на возможность влияния процессов разжижения грунтов при землетрясениях на триггеринг гигантских обрушений склонов вулканических построек, сопровождающихся сходом катастрофических сухих обломочных лавин [Аносов и др., 2003]. Чаще всего ослабление вулканической постройки является следствием нарастания давления в её недрах из-за роста магматического криптокупола, либо же ослабления несущих свойств слагающих её пород из-за гидротермальной проработки фумаролами. Однако исследования ряда авторов показали, что известные обрушения вулканов произошли вследствие изменения гидрогеологических условий из-за сильных ливней, или же из-за нарушения устойчивости при сильном землетрясении [Myers, Brantley, 1995; Wright, Pierson, 1992]. Последнее должно было вызвать обрушение вершинных частей постройки, т.к. амплитуда колебаний вулканического конуса максимальна у вершины, обрушиваются же, как правило, фланги постройки. Необходимо выявить механизмы, ответственные за снижение её равновесия. Следует учесть, что для вулканических построек Камчатки характерно то, что склонность к гравитационному обрушению проявляли те секторы построек, которые обращены к прилегающим грабенам [Леонов, 1994]. Такие грабены выполняются достаточно мощными (100 м и более) толщами аллювиальных и водно-ледниковых рыхлых отложений. Следует отметить, что при сильных землетрясениях, сопровождающихся разжижением грунтов, эти процессы завершаются интенсивными просадками. Так, например, во время землетрясения 16.06.1964 в городе Ниигата (Япония), разжижение водонасыщенных песков (мощностью около 150 м) сопровождалось просадками, менявшими высоту поверхности до 1 метра. Ещё более крупные просадки (до двух метров), в водонасыщенных песках большей мощности (до 800 м) происходили при сильных землетрясениях в Индии. В том случае, если основание флангов постройки расположено на рыхлых грунтах, то при сильном землетрясении произойдёт их разжижение, что приведёт к уменьшению объёма грунтов. Такие объёмные деформации не повлияют на устойчивость вулканической постройки, если её фланги не ослаблены, а при ослабленном склоне (особенно если он ослаблен в том секторе вулканического конуса, где происходит разжижение), то описанные процессы могут сыграть роль спускового крючка и вызвать катастрофическое обрушение постройки. При таком обрушении устремляющаяся вниз сухая обломочная лавина уничтожает всё на своём пути. Так, например, г. Петропавловск-Камчатский построен на холмисто-западинной территории, сложенной отложениями лавины, сошедшей в позднем плейстоцене при обрушении древнего Авачинского вулкана. Мощность их на территории города составляет от первых десятков до первых сотен метров.

Учитывая особенности описанных процессов, самое пристальное внимание следует обратить на возможность проявления разжижения грунтов при ожидающемся сильном землетрясении в городе Петропавловске-Камчатском. Следует учесть, что:

- в краевом центре Камчатки мощность макропористых грунтов, слагающих почвенно-пирокластический чехол, колеблется от 1 м на водоразделах до 2-4 м в понижениях рельефа. При строительстве они должны полностью удаляться из котлованов под фундаменты.

- в долинах рек и ручьёв, впадающих в Авачинскую бухту, склонные к разжижению тонкозернистые пески и супеси лагунного происхождения залегают на глубинах от первых метров до 10-15 м, причём ареалы их развития протягиваются к верховьям на 1-2 км от побережья бухты. При неглубоком залегании такие грунты подлежат выемке при

строительстве, а при глубоком (глубже первых метров) целесообразна их цементация или реализация иных способов снижения способности грунтов к разжижению.

- мероприятия по сейсмическому усилению зданий и сооружений не снижают рисков, связанных с разжижением, т.к. при разжижении происходит нарушение устойчивости самого грунтового основания, и полностью усиленное здание может получить неприемлемый для дальнейшей эксплуатации крен или даже опрокинуться. Поэтому мероприятия по сейсмическому усилению зданий должны сопровождаться усилением грунтовых оснований.

- в разрезе плейстоценовых отложений палеодолины р. Авача принимают участие лагунные отложения, склонные к тиксотропности. Поэтому крайне важно изучение степени гравитационной ослабленности склонов вулканов Авачинско-Корякской группы, обращенных в сторону Петропавловска-Камчатского и его окрестностей. Без этого невозможна оценка степени реальной опасности гравитационного обрушения этих вулканов при сильном землетрясении.

Список литературы

Аносов Г.И., Делемень И.Ф., Константинова Т.Г. Склоновые и оползневые процессы на территории г. Петропавловска-Камчатского // Материалы II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, 9-12 сентября 2003 г., г. Екатеринбург. 2003. С. 916-921.

Вознесенский Е.А. Динамические свойства грунтов и их учет при анализе вибраций фундаментов разного типа // Геоэкология, 1993. № 5. С. 37-65.

Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 2. С. 101-108.

Константинова Т. Г. Особенности грунтов, обладающих свойствами тиксотропии (на примере Петропавловска-Камчатского, Кировакана, Нефтегорска) // Память и уроки Нефтегорского землетрясения. Южно-Сахалинск. 2000. С. 133-136.

Леонов В.Л. Методика и результаты крупномасштабного геокартирования // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. С. 41-62.

Леонов В.Л. Линеаменты, трещиноватость и устойчивость склонов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология, 1994. № 6. С. 44-63.

Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи // Записки Русского Географического Общества. Т. XXVI, СПб., 1893. 580 с.

Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.

Сейсмический риск и инженерные решения: Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломнитца, Э. Розенблюта. М.: Недра, 1981. 375 с.

Соколов В.Н. Микромир глинистых пород // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 3. С. 56-64.

Черемных Г.П. Землетрясение у берегов Камчатки 4 мая 1959 года // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. М. 1960. № 11. С. 6-17.

Эйби Дж.А. Землетрясения: Пер. с англ. М.: Недра, 1982. 263 с.

Myers B., Brantley S.R. Hazardous Phenomena at Volcanoes // USGS Open-File Report 95-231. 1995.

Wright T.L. and Pierson T.C. Living With Volcanoes: The U.S. Geological Survey's Volcano Hazards Program // USGS Circular 1073. 1992. 57 p.