

## ФАЦИАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЙСМИТОВ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ КАМЧАТКИ

*Константинова Т.Г., Делемень И.Ф.*<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: [lrg334@emsd.ru](mailto:lrg334@emsd.ru)*

<sup>2</sup>*ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

<sup>3</sup>*Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: [delemen@kscnet.ru](mailto:delemen@kscnet.ru)*

### **Введение**

Известно, что при сильных землетрясениях повреждения зданий и сооружений вызываются не только сейсмическими колебаниями, но и другими сопровождающими их процессами и явлениями [12, 15]. Их принято называть вторичными сейсмическими опасностями или косейсмическими эффектами. Наибольшую опасность представляют косейсмические деформации рыхлых грунтов в основании зданий и сооружений. Одним из наиболее значимых факторов такого поведения является разжижение грунтов, сопровождающееся частичной или полной потерей прочности основания [4]. Остаточные деформации в грунтах, сами деформированные грунты, а также вновь сформировавшиеся при этом осадочные отложения принято называть сейсмитами (seismites) [17]. Для каждого из них характерны определённые сочетания слагающих их слоев, соотношения первичных текстур и сейсмогенных деформаций, а также литологический тип отложений (в том числе осадков, отложившихся при сейсмическом событии). Такие сочетания (структурно-вещественные парагенезисы) позволяют различать типы сейсмиков, а также отличать их от других деформаций и отложений несейсмогенной природы.

Следует отметить, что сейсмитами рассматривают в основном микродислокации [6] и косейсмические дислокации [7]. Во многих случаях при описании косейсмических дислокаций термин «сейсмитами» не используется вовсе, хотя по сути описываются те же процессы и структуры (например, [11, 3]). В настоящей работе основное внимание уделено различным аспектам фациальных условий формирования сейсмиков разжижения на примере Камчатки и смежных регионов.

### **Типы сейсмиков и механизмы формирования сейсмиков разжижения**

Анализ литературных данных показывает, что типизация сейсмиков находится ещё на стадии разработки. В качестве сейсмиков могут рассматриваться сейсмообвалы, сейсмооползнии сейсмоосыпи [3, 8, 16]. Эти образования следует относить к сейсмогравитационным телам (*гравитационные сейсмитами*).

При землетрясениях нередко возникают такие дислокации, которые принято обычно относить к тектоническим или сеймотектоническим – надвиги, сдвиги, сбросы и отрывы (сейсмогенные рвы). Примерами могут служить сейсмогенные рвы, косейсмичные Алтайскому (Чуйскому) землетрясению 27.09.2003 года с магнитудой  $M = 7,3$ , Олюторскому 21.04.2006,  $M = 7,8$  и др. В случаях, когда такие деформации являются остаточными, то при определённых условиях их можно рассматривать как *тектогенные сейсмитами*.

Генетическая природа *сейсмиков разжижения* отражена уже в их названии. В соответствии с ГОСТ 25100–2011, под разжижением грунтов понимается «переход водонасыщенного дисперсного грунта в текучее (пльвунное) состояние под внешним воздействием (статическим, динамическим, фильтрационным), причем процесс разжижения включает в себя стадии разрушения структурных связей, течения и последующего уплотнения грунта» (п.3.35, с. 8 [5]). Такое поведение особенно характерно для рыхлых обводнённых песков, вследствие исчезновения непосредственного контакта между частицами песка. При вибрации они оказываются взвешенными во вмещающей их воде, под действием силы тяжести изменение состояния слоя приводит к перемещению вещества слоя вниз по склону. Крайне редко процесс ограничивается только деформациями самого слоя, его кровли, перекрывающих пород (кепрока) и земной поверхности. На поверхность выбрасывается смесь воды и отложений, слагающих слой, а в кепроке этой смесью заполняются открывающиеся трещины, открытые поры, каверны и другие полости.

### **Фациальные условия формирования грунтов, склонных к разжижению**

Известно, что при описанном выше механизме при достаточно сильном сейсмическом воздействии разжижению подвержены преимущественно водонасыщенные грунты [4]. По этим причинам одни и те же пески, склонные к разжижению, не разжижаются, если уровень грунтовых вод ниже их подошвы, и наоборот. Именно поэтому ареалы залегания таких грунтов приурочены преимущественно к прибрежным фациальным обстановкам (лагуны и заливы), а на суше – к грабенам, озёрным депрессиям, поймам рек, кальдерам и т.д. Естественно, каждая из них относится к определённому типу фациальных обстановок – лагунных и прибрежно-морских, тектонического рельефа и вулканогенных, флювиогляциальных и ледниковых, аллювиальных, озёрных и т.д. На поверхности процессы интенсивного выброса песка и воды с образованием грязевых вулканов и деформации поверхности тяготеют, как правило, к понижениям рельефа (например, при Бурунском землетрясении 1984 г. с  $M = 6,3$  [2], при Нефтегорском землетрясении 27.05.1995,  $M = 7,5$  и т.д.).

Способность грунтов отдавать свободную воду и разжижаться при механических воздействиях присуща рыхлым пескам, илам, суглинкам и супесям, причём не все эти отложения склонны к разжижению – например, при Нефтегорском землетрясении 27.05.1995,  $M = 7,5$ , разжижению подверглись лишь пески, обладающие свойствами пльвунов [13].

### **Структурно-вещественные парагенезисы сейсмиков разжижения**

При разжижении грунтов можно наблюдать различные сочетания процессов, изменяющих и деформирующих земную поверхность и слои рыхлых отложений, которые приводят к отложению новых осадков. Так, например, при Нефтегорском землетрясении 27.05.1995,  $M = 7,5$  отложение песков происходило посредством двух процессов – выдавливания на поверхность в частично разжиженном состоянии, и излияния из образовавшихся грифонов в полностью разжиженном состоянии. Впрочем, выдавливание и выпучивание вещества слоя происходит редко, преимущественно в пределах дизъюнктивных зон, в том числе тех, раскрытие которых индуцировано сейсмическим событием, а также в основании склонов, в строении которых принимает участие разжижающийся склон.

Наиболее часто наблюдаются выбросы воды и твёрдой составляющей, сопровождаясь образованием небольших песчаных и грязевых вулканов диаметром до первых метров. На таких участках происходит образование кратеров, грифонов и воронок (нередко до пятидесяти метров в диаметре), из которых происходят выбросы. В кепроке вокруг них закладывается система радиальных и/или концентрических трещин. Под участками выбросов в кепроке формируются подводящие каналы, как правило трещинного типа. Один такой канал может служить источником питания для выбросов, располагающихся по прямой или по дуге. При вскрытии эрозией в кровле разжижающегося слоя видно валлообразное вздутие кровли, тогда как питающая трещина представлена дайкой, выполненной материалом подстилающих слоёв.

У подножия склона располагаются зоны оседания грунтов и сейсмогенные рвы, которые в последующем выполняются материалом из вышележащих слоёв. В общем случае можно выделить три зоны с развитием различных форм парагенезисов: фронтальная зона, где происходит аккумуляция перемещающегося вниз материала разжиженного слоя, зона транзита, где происходит перемещение слоя, и также тыловая зона, расположенная непосредственно у подножия склона.

### **Физико-географические условия формирования сеймиков разжижения на Камчатке**

Камчатка отличается от других регионов России и мира рядом физико-географических особенностей, важнейшими из которых является современная вулканическая активность и большое количество осадков.

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.

В таких отложениях содержится большое количество частиц стекла, которое быстро преобразуется в минералы глины 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 изменению значений коэффициента внутреннего сцепления и угла внутреннего трения.

Обычно почвенно-пирокластический чехол удаляется при строительстве, однако в

нижележащих грунтах, служащих основанием для строительства, процент пеплового материала может быть достаточно высок. Поэтому на Камчатке склонными к разжижению могут быть и другие фациальные типы отложений – лахаров, грязевых потоков, тефровых и пирокластических, обвально-взрывных, а также переотложенных делювиально-пролювиальных.

Такие грунты в сухом состоянии хорошо держат угол естественного откоса, однако при вибрациях и сейсмических колебаниях они теряют устойчивость. Так, например, результаты испытаний на вибростенде подверженных разжижению пеплосодержащих водонасыщенных песков делювиально-пролювиального генезиса в г. Петропавловске-Камчатском, показали, что удельное сцепление их уменьшилось в 4 раза, угол внутреннего трения уменьшился с  $38^\circ$  до  $30^\circ$ . 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 [9].

Изрезанность восточного побережья Камчатки и близость к нему сейсмофокальной зоны обусловили широкое развитие в прибрежной зоне замкнутых и полузамкнутых заливов и лагун. В них накапливается пелитовый и алевритовый материал, а также пески от пылеватых до гравелистых с большим содержанием алевропелитовой составляющей. Это предопределяет практически повсеместное распространение таких грунтов в подобных обстановках. При сильных извержениях на мелководье при разжижении лагунных отложений могут наблюдаться гейзероподобные выбросы воды. Так, во время Петропавловского землетрясения 4 мая 1959 г. в лагунном Култушном озере в течение минуты наблюдалось около 30 гейзерообразных выбросов высотой до 3 м [14].

### **Геологические и сейсмогеологические условия формирования сейсмиков разжижения на Камчатке**

Грунты вулканического происхождения отличаются от аналогичных отложений, образовавшихся вдали от вулканов, несколькими важными особенностями. Перечислим главные из них. В отличие от других районов мира, на Камчатке в меньшей степени проявлена связь ареалов разжижения с сейсмоактивными разрывами. Причины этого пока не совсем ясны, возможно, это как то связано с тем, что сейсмофокальная зона расположена в океане, на удалении от территорий проявления разжижения грунтов. Разрывные нарушения и трещины, наблюдаемые здесь при землетрясениях, связаны либо с отседаниями склонов, либо с гидрогеомеханическими процессами в кепроке при разжижении. В последнем случае пространственная приуроченность и простириание трещинных зон определяется простирианием подножий склонов и наличием уже существовавших ранее литологических и дислокационных неоднородностей.

Анализ макросейсмических последствий землетрясений показывает, что наиболее чувствительными к знакопеременным нагрузкам при сейсмических колебаниях являются пески пылеватые, а также малоплотные супесчаные грунты и тонкозернистые пески разжижаются уже при интенсивности землетрясения в 7 баллов. Более интенсивные колебания приводят к разжижению мелкозернистых грунтов средней плотности, а при дальнейшем усилении интенсивности – и более плотных, вплоть до гравелистых песков, в том числе с включениями гальки и щебня.

Определённую роль играет глубина залегания кровли склонных к разжижению грунтов. При глубине до 3 – 3,5 м склонные к разжижению грунты проявляют свои свойства при 7 баллах, а при залегании таких грунтов на больших глубинах, разжижение наступает либо в случае более интенсивных колебаний, либо в случае значительной мощности лагунных или озёрных отложений.

Специфика гидрогеологических условий территории Камчатки определяется значительными сезонными колебаниями уровней грунтовых вод в приповерхностных частях разрезов рыхлых отложений, поэтому при изысканиях следует учитывать возможность разжижения грунтов, находящихся при бурении скважин в сухом состоянии. Кроме того, застроенные территории характеризуются нарушенным состоянием гидрогеологических условий. Так, для г. Петропавловска-Камчатского характерно техногенное подтопление части территории.

Отличительной особенностью вулканических районов, в том числе и Камчатки, является развитие мощных толщ пемзовых песков и пемзовых туфов, обязанных своим происхождением гигантским кальдерообразующим извержениям. 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 их несущих свойств. Поведение таких грунтов при землетрясении двоякое. Сухие, необводнённые уступы, сложенные пемзами, обрушиваются при сейсмических колебаниях, тогда как при сильном увлажнении возможно образование обвалов, оползней и осыпей даже в периоды между сейсмическими событиями. В итоге

вдоль сложенных пемзами протяжённых кальдерных уступов и в основании высоких террас водотоков, дренирующих пемзовые плато, формируются мощные шлейфы колловиальных отложений. Тем не менее, разжижения грунтов в таких обстановках не происходит.

Ситуация меняется, когда пемзы подвергаются переотложению в водных условиях. В таких случаях (особенно в лимнических условиях) формируются толщи пелитовых и алевропелитовых пемзовых песков, склонных к разжижению. При полевых наблюдениях на территориях развития этих 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 условиях палеозера) в бассейне р. Паужетка (Паужетская кальдерная депрессия). В близких по физико-механическим свойствам необводнённых переотложенных пемзах золотого происхождения, разжижения не происходит, хотя образуются сейсмогенные рвы – например, на перевале в междуречье рек Фальшивая и Жировая (восточный борт кальдеры вулкана Горелого).

### **Заключение**

Изучение сейсмогеологических условий имеет большое значение для оценок сейсмической опасности и риска. Одним из факторов таких условий является разжижение грунтов и другие дислокации, возникающие при сейсмических воздействиях на грунты (сейсмиты).

В отличие от общепринятой точки зрения, мы полагаем, что к сейсмитам следует относить не только сейсмически обусловленные дислокации и текстуры осадочных пород и сформировавшиеся косейсмически отложения. Дислокации, текстуры и отложения представляют собой единый структурно-вещественный паргенезис сейсмитов.

Одним из наиболее опасных и происходящих при сильных землетрясениях во всех регионах мира, являются процессы разжижения грунтов. Образующиеся при этом структурно-вещественные паргенезисы сейсмогенных дислокаций в рыхлых грунтах, новообразованных текстур, отложений и следует относить к сейсмитами разжижения.

Роль сейсмитами разжижения определяется тем, что они могут служить индикаторами сейсмических событий прошлого, причем сейсмогенная природа сейсмитами разжижения устанавливается более уверенно, чем гравитационных сейсмитами. Между тем, при составлении карт общего сейсмического районирования именно гравитационные сейсмитами используются для уточнения графиков повторяемости доисторических землетрясений. Такой подход может приводить к ошибкам в определении интенсивности землетрясений для средних по сейсмическим свойствам грунтов.

Например, нет чётких признаков отличия обвалов и оползней, сошедших при исторических землетрясениях в г. Петропавловске-Камчатском, от подобных им гравитационных тел несейсмогенной природы. Так, спусковым механизмом схода в 1995 году крупнейшего из известных здесь скального Рябиковского оползня стало обводнение оползнеопасного склона из-за обильного выпадения осадков. Ослабление же склона произошло из-за постоянных утечек воды из систем водоснабжения и канализации. Вода накапливалась в местах обратной засыпки в грунтовых основаниях жилых зданий, построенных на склоне, где в позднем плейстоцене уже происходила активизация оползневых процессов.

Можно выделить несколько нерешённых проблем в изучении процессов разжижения и образующихся при этом сейсмитами разжижения:

- терминологическая проблема. Одни и те же понятия обозначаются различными терминами. Например, каково соотношение между терминами «нептуническая» и «песчаная дайка»?

- проблема конвергенции признаков. Сейсмитами разжижения нередко описываются как сеймотектонические дислокации либо как криотурбации. С другой стороны, если не установлена чёткая генетическая связь сейсмитами разжижения с конкретными историческими землетрясениями, то происхождение таких отложений не всегда может быть связано с разжижением грунтов. Необходима разработка признаков отличия этого типа сейсмитами от иных сходных с ними сейсмогенных и несейсмогенных образований.

- При современных землетрясениях процессы разжижения можно наблюдать. При изучении более древних образований стоит вопрос о том, являются ли они сейсмитами разжижения, или же эти образования возникли в пльвунах и других грунтах с тиксотропными свойствами без сейсмического воздействия.

- Одной из важнейших проблем дальнейшего изучения сейсмитами и процессов разжижения

являются выявления закономерностей и соотношений между параметрами сейсмических событий и параметрами процессов и сейсмиков разжижения.

- Недостаточно изучен вопрос о возможности и соотношении классических механизмов разжижения грунтов, и их «реологического разжижения» при землетрясениях [1].

- На Камчатке и в других вулканических районах грунты, склонные к разжижению, нередко слагают приповерхностные части разрезов грабенов, кальдер и вулканотектонических депрессий. В тех случаях, когда молодая вулканическая постройка сформировалась на таком основании, то разжижение грунтов будет способствовать отседанию того сегмента постройки, который обращён к этой депрессии. Прогрессирующее ослабление сегмента отседания может привести к развитию гигантского обрушения постройки со сходом катастрофической сухой обломочной лавины.

Исследования выполнены по бюджетной тематике КФ ГС РАН, а также по теме 1 Программы ФНИ государственных академий наук на 2014-2016 гг. по направлению исследований в части 67 «Фундаментальные проблемы развития литогенетических, магматических, метаморфических и минералообразующих систем» (ИВиС ДВО РАН) и при финансовой поддержке Минобрнауки России, в рамках программы стратегического развития ФГБУ ВПО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга» на 2012 – 2016 г.

### Список литературы

1. Аносов Г.И., Константинова Т.Г., Делемень И.Ф. Разжижение грунтов, оползневые процессы и сейсмическая опасность в вулканических районах // Стратегия развития Дальнего Востока: возможности и перспективы. Т.4. Экология. Хабаровск: Дальневост. гос. науч. б-ка, 2003. С. 33-41.
2. Борисов Б.А. О неприемлемой тенденции к завышению магнитуд исторических землетрясений на примере Красноводского землетрясения // Вопр. инж. сейсм. Вып. 33. М.: Наука, 1992. С. 28-39.
3. Важенин Б.П. Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. 205 с.
4. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 2. С. 101-108.
5. ГОСТ 25100–2011 – Грунты. Классификация. 2011. М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2011. 63 с. П. 3.34
6. Деев Е.В., Гибшер А.С., Чигвинцева Л.А. и др. Микросейсмодислокации (сейсмиды) в плейстоценовых осадках Горного Алтая // Докл. РАН, 2005. Т. 403. № 1. С. 71–74.
7. Деев Е.В., Зольников И.Д., Гольцова С.В. и др. Следы древних землетрясений в четвертичных отложениях межгорных впадин центральной части Горного Алтая // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 3. С. 410 – 423.
8. Деев Е.В., Зольников И.Д., Староверов В.Н. Отражение быстрых геологических процессов в отложениях и текстурах (на примере разновозрастных комплексов Северной Евразии) // Литосфера. 2012. № 6. С. 14–35.
9. Константинова Т. Г. Особенности грунтов, обладающих свойствами тиксотропии (на примере Петропавловска-Камчатского, Кировавана, Нефтегорска) // Память и уроки Нефтегорского землетрясения. Южно-Сахалинск, 2000. С. 133-136.
10. Константинова Т.Г., Делемень И.Ф. Особенности проявления процессов разжижения грунтов в вулканических районах // Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. 2014. Т. 2. С/ 604-607.
11. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Активная тектоника и геоморфология побережья Камчатского залива (Камчатка) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 1. С.75-88.
12. Сейсмический риск и инженерные решения: Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. М.: Недра, 1981. 375 с.
13. Стрельцов М.И. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года на Сахалине. М.: Янус-К, 2005. 177 с.
14. Черемных Г.П. Землетрясение у берегов Камчатки 4 мая 1959 года // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. М. 1960. № 11. С. 6-17.
15. Эйби Дж.А. Землетрясения: Пер. с англ. М.: Недра, 1982. 263с.
16. Keefer D.K. Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review // Surv. Geophys. 2002. V. 23. P. 473–510.
17. Seilacher A. Fault-graded bends interpreted as seismites // Sedimentology. 1969. V. 13. P. 155–159.