

Г. А. ШМИДТ

УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ И ОБРАЗОВАНИЕ СЕЙСМОДИСЛОКАЦИЙ

Во время землетрясений интенсивностью более 7 баллов на поверхности Земли, как реакция на сейсмические колебания, часто образуются сейсмодислокации (остаточные деформации). Это разрывы в скальных и рыхлых породах, обвалы, оползни, срывы, провалы и другие формы, значительно изменяющие рельеф местности. В. П. Солоненко (1973), показавший большое рельефообразующее значение сейсмодислокаций, отмечает значительное распространение этих форм, приуроченных к сейсмическим поясам Земли. Изучение сейсмодислокаций, современных землетрясений и палеосейсмодислокаций необходимо для уточнения максимальной балльности при сейсмомикрорайонировании.

Е. В. Дедова (1966) различает несколько генетических типов сейсмодислокаций (сейсμοдеформаций) — сейсмотектонические, сейсмогравитационные, сейсмоденудационные и формы смешанного происхождения. Сейсмотектонические дислокации, проявляющиеся преимущественно в активизации существующих тектонических разрывов и локальных изгибах земной поверхности, менее всего зависят от условий рельефа. Наиболее связаны с устойчивостью склонов сейсмогравитационные формы (обвалы, оползни, осыпи, срывы). Сейсмоденудационные дислокации, представленные в основном трещинами в скальных и рыхлых породах и образующиеся при превышении сейсмическими колебаниями прочностных свойств пород, также зависят от геоморфологических условий. В связи с тем, что термин «сейсмоденудационные» явно неудачен, далее мы будем называть эту группу дислокаций сейсмотрещинными.

На тип, масштабы проявления и морфологический облик сейсмодислокаций влияют как магнитуда землетрясения, глубина очага и расстояние от эпицентра, так и угол выхода сейсмического луча на поверхность, свойства и состояние пород, тектонические и гидрогеологические условия (Медведев, 1952; Попов, 1960). Независимо от рельефа местности масштабы и количество сейсмодислокаций возрастают с увеличением магнитуды землетрясения и уменьшением глубины его очага. Геологические факторы, проявляясь в определенных условиях рельефа, влияют на устойчивость склонов и степень их сейсмической опасности.

Влияние устойчивости склонов на образование сейсмодислокаций в связи с локализацией эпицентров землетрясений в горных областях, характеризующихся большей глубиной расчленения, крутизной склонов, интенсивной складчатостью и раздробленностью пород, очень велико. В горных районах встречаются все типы сейсмодислокаций современных и древних землетрясений. Широкому развитию сейсмотрещинных и сейсмогравитационных дислокаций в горах Средней Азии способствует площадное развитие чехла лёссовых пород, чутко реагирующего на сейсмические сотрясения. Среди орографических факторов, влияющих на размещение и масштабы сейсмодислокаций, следует отметить расположение элементов и форм рельефа по отношению к эпицентру землетрясения и направлению сейсмического луча, глубину расчленения и крутизну склонов. Эти факторы в свою очередь зависят от тектонических условий, состава и состояния (литологии, выветрелости, трещиноватости) пород, гидрогеологической обстановки.

Влияние тектонических условий на устойчивость склонов и образование сейсмодислокаций может быть активным и пассивным. Активное воздействие тектонических условий на устойчивость склонов проявляется через новейшие и современные движения.

Пассивное влияние оказывает ориентировка пликативных и дизъюнктивных структур, дислоцированность пород. Для энергично поднимающихся высокогорных и среднегорных районов характерны глубокие (сотни м) узкие долины с выпуклыми или прямыми склонами крутизной более 25°. Как показали экспериментальные наблюдения, с увеличением высоты склонов, сложенных супесями и суглинками, на 15 м интенсивность сейсмических колебаний возрастает для продольной волны в 1,8, а для поперечной волны в 3,2 раза (Печков, Гарагозов, 1973). Сейсмический эффект возрастает и в связи с интерференцией сейсмических колебаний от бортов каньона (Бугаев, Харлов, 1975). Как показали исследования Г. А. Лямзиной и Г. Г. Ивановой (1973), с увеличением крутизны склона от 10 до 45° в 2,5 раза возрастает амплитуда горизонтальных колебаний.

Т. А. Пак и др. (1975) проведен многофакторный корреляционный анализ связи элементов рельефа (крутизны склонов, глубины и густоты расчленения) с интенсивностью сотрясения в пределах 5-балльной изосейсты Каратагского землетрясения 1907 г. Установлена тесная связь интенсивности землетрясения (по сейсмодислокациям) с глубиной расчленения и крутизной склона и незначительная зависимость от густоты расчленения рельефа.

Возрастание амплитуд сейсмических колебаний с высотой и крутизной склонов является одной из причин увеличения масштабов сейсмодислокаций. Другая причина — уменьшение устойчивости склонов в связи с ростом сил гравитации. На пологих (до 25°) склонах во время землетрясений силой 7—8 баллов сейсмодислокации возникают лишь при неблагоприятных грунтовых условиях — высоком увлажнении и заболоченности, налегании маломощного (до 2 м) чехла рыхлых грунтов на более плотные. Это системы кулисообразных трещин длиной от 10 до 200 м, шириной до 200 м и с вертикальным смещением до 15—20 см, опоясывающие склоны и часто представляющие собой «заколы» будущих обвалов и оползней. Такие трещины, как показали наши работы в эпицентральной зоне Жаланашско-Тюпского 8-балльного землетрясения 1978 г. в хр. Кунгей-Алатау, проникают на глубину 1,0—1,5 м и отделяют интенсивно раздробленные породы делювиального чехла от нераздробленных пород, залегающих выше по склону. На более крутых (25—30°) склонах при землетрясениях интенсивностью более 8 баллов по таким трещинам происходит отрыв и смещение рыхлого чехла на локальных участках (образование сейсмооползней, сейсмооплывин). На склонах крутизной около 40° во время 10-балльного Хаитского землетрясения 1949 г. наблюдались не только отдельные смещения, но и оползнения чехла делювиальных суглинков на участках площадью до 1,5—2,0 км². Для крутосклонного рельефа характерно образование обвалов и осыпей скальных и рыхлых пород. Отмечалась также концентрация сейсмотрещин на крутых перегибах склонов в эпицентральных зонах Кебинского землетрясения 1911 г. и Сарыкамышского землетрясения 1970 г.

Сейсмогенные подвижки как разновидность современных тектонических движений проявляются преимущественно в активизации отрезков уже существовавших разрывов с образованием протяженных (до десятков км) сбросов, сдвигов, надвигов. Сейсмотектонические разрывные и локальные складчатые деформации возникают и в чехле рыхлых отложений, перекрывающем сейсмогенерирующие разломы. Сейсмотектонические разрывные дислокации пересекают различные формы рельефа. Однако характер их и амплитуда могут меняться при пересечении скальных гряд и депрессий, перекрытых чехлом рыхлых отложений. Так, отмечено, что единый сейсморазрыв, образовавшийся во время 10-балльного Могодского землетрясения 1967 г. в МНР, в пределах депрессионных форм рельефа «расщеплялся» на систему диагональных мелких трещин, ширина которых возрастала с увеличением мощности чехла рыхлых от-

ложений (Несмеянов и др., 1976). Сейсмогенные локальные изгибы поверхности зафиксированы в основном на равнинных участках — террасах морей, озер, рек.

Пассивное влияние тектонических структур на морфологию и масштабы сейсмодислокаций проявляется в расположении или ориентировке поверхности, на которой развиваются сейсмодислокации, по отношению к углу выхода или подхода сейсмического луча. Максимальные нарушения фиксируются на поверхностях, расположенных под углом $38-42^\circ$ к направлению выхода сейсмической волны (Дедова, 1966). Наибольшее количество сейсмодислокаций концентрируется на склонах, ориентированных вкрест направления сейсмического луча. Например, сейсмодислокации Верненского землетрясения 1887 г., Кебинского землетрясения 1911 г., Жаланашско-Тюпского землетрясения 1978 г., по нашим наблюдениям, локализуются на склонах долин, обращенных к эпицентру.

На устойчивость склонов по отношению к сейсмическому воздействию влияют ориентировка тектонических разрывов и характер дислоцированности пород. Склоны разной морфологии проанализированы и оценены по степени сейсмоопасности В. В. Поповым (1960). В структурной классификации склонов, составленной Л. И. Пестовым (1970), приведены различные случаи соотношения общего структурного плана, углов падения пород и разрывных нарушений с ориентировкой склонов. Им же дана оценка устойчивости склонов в условных баллах по отношению к направлению выхода сейсмического луча. Оказалось, что склоны наименее устойчивы в тех случаях, когда их крутизна меньше углов падения пород, а разрывные нарушения с крутым сместителем ориентированы почти параллельно простиранию склонов. Так, во время 8-бального Дагестанского землетрясения 1970 г. по поверхности моноклинально падающих в сторону р. Сулак аргиллитов и мергелей сместились блоки объемом до $1,5$ млн. m^3 . Роль смазки играли выходы подземных вод (Попова, 1973). К сожалению, в классификации Л. И. Пестова не учтены гидрогеологическая обстановка, трещиноватость и выветрелость пород, влияющие на устойчивость склонов. Многофакторный анализ позволил бы более точно оценить устойчивость склонов к сейсмическому воздействию.

Влияние неоднородного состава, выветрелости и трещиноватости пород на устойчивость склонов и образование сейсмодислокаций. Очень часто породы, слагающие склоны, отличаются неоднородным составом и сложением. Чередование пород различного состава, неоднородный состав самой породы определяют изменение на границах раздела амплитуды сейсмических колебаний и приращение сейсмической интенсивности. Более всего разрушительный эффект усиливается на границах рыхлых и скальных, скальных и полускальных пород, что ведет к образованию сейсмотрещин значительной протяженности. Например, протяженные (до $1,5$ км) сейсмотрешины образовались во время Кебинского землетрясения 1911 г. на контакте глинистых пород и гранитов, известняков и изверженных пород.

Снижению устойчивости склонов к сейсмическому воздействию способствуют и процессы выветривания. При выветривании снижаются прочность, сопротивление сдвигу, увеличиваются пористость, трещиноватость и водопоглощение пород. Мощность зоны выветривания зависит от состава пород, степени их трещиноватости, условий залегания и характера рельефа. Мощность зоны выветривания возрастает на участках развития менее плотных крупнозернистых трещиноватых пород, слагающих выровненные формы рельефа. По интенсивности проявления зона выветривания расчленяется на два горизонта — верхний, сильно элювированный (мощностью до $1,5$ м), и нижний, отличающийся повышенной трещиноватостью и дезинтеграцией, мощностью в первые десятки м.

Сейсмодислокации локализуются преимущественно в верхнем горизонте, но на отдельных участках проникают и в нижний горизонт.

Скальные породы, слагающие склоны, как правило, разбиты сетью трещин (петрогенетических, тектонических, экзогенных), ослабляющих устойчивость к сейсмическому воздействию. По механизму образования это трещины отрыва и скальвания, проникающие на большую глубину (первые m — десятки m). Распределяясь неравномерно, они образуют сгущения на крыльях тектонических разрывов, и тогда коэффициент трещинной пустотности увеличивается до 5—10%, модуль трещиноватости — до 30—50. По плоскостям трещин снижаются коэффициент сцепления и угол внутреннего трения (на 12—13°) в связи с изменением минералогического состава, наличием глинки трения. В зонах интенсивной трещиноватости и выветривания резко (в 3—4 раза) падает скорость прохождения продольных сейсмических волн, что указывает на разуплотнение породы. По зонам приразрывной трещиноватости до глубины 200—300 m проникают линейные коры выветривания.

Ослаблению устойчивости благоприятствует увеличение глубины эрозийного вреза, вскрывающего зоны разных по направлению трещин и развитых по ним линейных кор выветривания. Пересечение разнонаправленных трещин, сочетание трещин с круто ($>60^\circ$) наклоненной плоскостью сместителя и зон выветривания, ориентированных в сторону падения склона, способствует уменьшению его устойчивости и обрушению пород при землетрясениях. К таким ослабленным участкам приурочены крупнейшие сейсмообвалы Кебинского землетрясения 1911 г. — Тегерментинский, Майбулакский, Джидашкарский и др.

Влияние гидрогеологических условий на устойчивость склонов и равнинных участков и образование сейсмодислокаций. Устойчивость к сейсмическому воздействию снижается, когда склоны несут грунтовый поток или подвержены инфильтрации атмосферных осадков. В таких случаях водонасыщенность способствует ослаблению структурных связей, изменению консистенции и соответственно прочностных показателей (угла внутреннего трения, сцепления, сопротивления сдвигу). У обводненных массивов скорость прохождения сейсмических волн выше на 30—50%. Это может сказаться на нарушении устойчивости подготовленных к смещению масс при землетрясении. Широкому развитию оползней, оплывин и селей во время Верненского землетрясения 1887 г. способствовало обильное промачивание атмосферными осадками лёссовидных пород, перекрывающих мощным чехлом предгорья хр. Заилийский Алатау. Было смещено 400 тыс. m^3 грунта. Наличие грунтовых вод на водупорных глинах неогена и морене благоприятствовало оползанию лёссовидных суглинков при Кебинском землетрясении 1911 г. и Сарыкамышском землетрясении 1970 г.

Особенно велико влияние гидрогеологической обстановки на образование сейсмодислокаций в равнинных условиях. На пляжах морей и озер, поймах, дельтах, низких террасах рек, обводненных с поверхности или с глубины 0,2—2,0 m , при сейсмических толчках интенсивностью 7—8 баллов могут возникать протяженные (десятки m) трещины с водо- и грунтоизвержениями, просадки и пучения грунтов. В эпицентральной зоне 10-балльного Цаганского землетрясения 1862 г. на восточном берегу оз. Байкал в дельте р. Селенги опустился на глубину до 10 m участок пльвуных грунтов площадью 260 $км^2$ и образовался зал. Провал. Морфологические его аналоги — заливы Истокский и Посольский Сор, располагающиеся в аналогичных условиях, видимо, возникли при голоценовых землетрясениях («Сеймотектоника...», 1968).

Приведенный выше краткий обзор факторов, влияющих на устойчивость склонов, свидетельствует об их тесной связи с образованием сейсмодислокаций. Ни один из факторов в отдельности — тектонические условия, состояние пород (неоднородный состав, выветрелость, трещи-

новатость), гидрогеологические условия — не определяют устойчивости склонов. Только при анализе комплекса факторов можно дать оценку устойчивости склонов по отношению к сейсмическому воздействию.

ЛИТЕРАТУРА

- Бугаев Е. Г., Харлов Э. М.* Особенности колебаний бортов каньонов. В сб. «Инженерно-геологическая основа сейсмического микрорайонирования». Ташкент, «Фан», 1975.
- Дедова Е. В.* К вопросу о характере остаточных деформаций, возникающих при землетрясениях в естественных и искусственных откосах. «Бюл. по инж. сейсмологии», № 5. Душанбе, 1966.
- Лямзина Г. А., Иванова Г. Г.* Зависимость интенсивности горизонтальных колебаний от крутизны склона. «Вопр. инж. сейсмологии», вып. 15, 1973.
- Медведев С. В.* Оценка сейсмической балльности в зависимости от грунтовых условий. «Тр. Геофизич. ин-та АН СССР», № 14 (141), 1952.
- Несмеянов С. А., Хайме Н. Б., Чернышев С. Н.* К геологии эпицентра Могодского землетрясения. Инженерные изыскания в строительстве. «Рефер. сб.», вып. 1 (42). М., 1976.
- Пак Т. А., Хамидов А., Мирзобаев Х.* Корреляция сейсмической балльности и рельефа. Тез. докл. совещ. «Инженерно-геологическая основа сейсмического микрорайонирования». Ташкент, 1975.
- Пестов Л. И.* К вопросу о классификации склонов в связи с оценкой их сейсмостойкости. В сб. «Сейсмическое микрорайонирование Махачкалы». Махачкала, 1970.
- Попов В. В.* Роль инженерно-геологических условий в детальном сейсмическом районировании. «Бюл. Совета по сейсмологии», № 8, 1960.
- Попова Е. В.* Оценка сейсмической опасности различных площадок с учетом возможности проявления остаточных деформаций грунтов. В сб. «Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний». «Вопр. инж. сейсмологии», вып. 15. М., «Наука», 1973.
- Пучков С. В., Гарагозов Д.* Исследования влияния холмистого рельефа местности на интенсивность сейсмических колебаний при землетрясениях. В сб. «Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний». «Вопр. инж. сейсмологии», вып. 15. М., «Наука», 1973.
- Сеймотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. М., «Наука», 1968.
- Солоненко В. П.* Землетрясения и рельеф. «Геоморфология», № 4, 1973.

ПНИИИС Госстроя СССР

Поступила в редакцию
19.IX.1978

SLOPE STABILITY AND SEISMIC DISLOCATIONS

G. A. SHMIDT

Summary

Various distortions of the Earth's surface can appear in the pleistocene area during earthquakes more than 7 intensity, i. e. fissures, scarps, rockfalls, landslides etc. Formation and size of the distortions are controlled by landforms and their elements position with view to seismic ray exit direction, depth of dissection and slope steepness. Slope stability is influenced by tectonic structure, composition and state of the rocks (lithology, weathering, fissures) as well as by hydrogeological conditions.