

О. В. ПАВЛОВ, В. И. БУНЭ, В. А. ПАВЛЕНОВ, В. Г. ШАРАПОВ

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ МИКРОРАЙОНИРОВАНИИ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Строительство промышленных и гражданских сооружений в районах распространения вечной мерзлоты сопряжено с большими трудностями, которые еще больше увеличиваются, если строительство ведется в сейсмоактивных районах.

В 1967—1968 гг. Институтом земной коры СО АН СССР, совместно с Восточно-Сибирским трестом инженерно-строительных изысканий (ВСТИСИЗ) были проведены экспериментальные исследования по сейсмическому микрорайонированию на трех строительных площадках в хребте Удокан. Район исследований расположен в зоне вечной мерзлоты с сейсмичностью 8—10 баллов по карте сейсмического районирования СССР [7]. Подробная характеристика сейсмичности приведена в работе [3].

Площадка №1 расположена в пределах тектонического грабена, выполненного с поверхности 12—15-метровой толщей валунных и грубообломочных ледниковых отложений, ниже которых лежит 14-метровый слой базальтов и аллювиальные песчано-галечные отложения переменной мощности. Борта грабена сложены скальными породами—песчаниками и гранитами протерозоя.

Площадка №2 расположена в средней части эрозионной долины р. Нирунгнакан, борта которой сложены протерозойскими осадочнометаморфическими и интрузивными породами, а днище и прибортовые части—крупнообломочными аллювиальными и аллювиально-пролювиальными отложениями. Реже встречаются тонкозернистые илистые пески старичных и озерных фаций. Если скальные грунты, за исключением некоторых участков, могут считаться однородными для всей территории площадки, то рыхлые грунты весьма неоднородны и изменчивы как в вертикальном разрезе, так и по площади. Мощность их меняется от одного-двух до нескольких сотен метров.

Площадка №3 находится в верховьях р. Нирунгнакан в эрозионно-ледниковой впадине, выполненной мощной толщей сравнительно однородных грубообломочных ледниковых образований (конечные морены). Борта долины сложены кристаллическими скальными породами, прикрытыми мощным чехлом крупноглыбовых россыпей.

На всех площадках грунты, как скальные, так и рыхлые, находятся в мерзлом состоянии, за исключением пойменных частей долины р. Нирунгнакан, где местами обнаруживаются довольно мощные талики, возникновение которых, по-видимому, связано с отепляющим воздействием тектонических разломов. Мощность толщи на площадках изменяется от 0 до 375 м.

Температура мерзлоты, по наблюдениям ВСТИСИЗа, колеблется от $-0,8^{\circ}$ до $-1,2^{\circ}$ на глубинах 15—30 м. Часто в толще мерзлых пород встре-

чаются погребенные льды в виде линз, гнездовидных включений корочек, обволакивающих обломочный материал, и жил, заполняющих трещины в выветрелой зоне скальных грунтов.

Талики пространственно связаны с пойменными частями долины и имеют мощность до 100 м. Иногда встречаются погребенные талики, перекрытые 10—12-метровым слоем мерзлых грунтов.

На всех площадках ВСТИСИЗОм был проведен большой объем сейсмозаземных работ со станцией ПСЛ-1 в 30-канальном варианте, что позволило получить обширный материал по скоростям распространения сейсмических волн.

Скорости распространения волн в верхней части разреза определялись методами КМПВ и МПВ

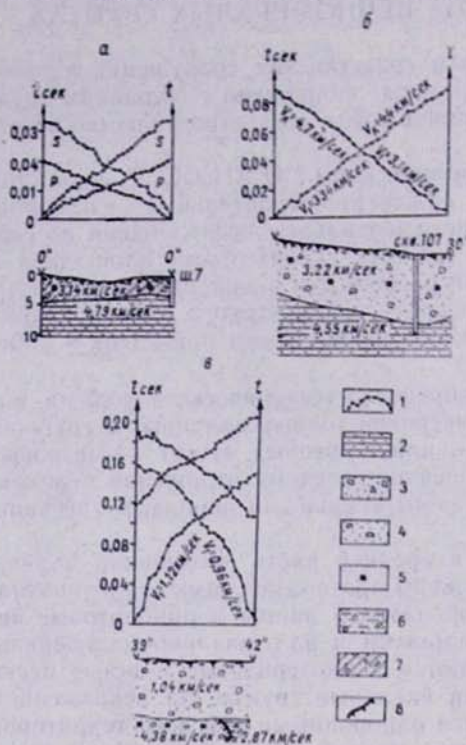


Рис. 1. Сейсмогеологические разрезы и годографы для шурфа 7 и скважины 107 и 38. 1—годографы; 2—скала (метаморфизованный песчаник); 3—песок пылеватый; 4—гравийно-галечные отложения; 5—мерзлота; 6—гравийно-галечные отложения обводненные; 7—гравий и щебень; 8—граница таликовой зоны

ках, находящихся в мерзлом состоянии, составляет 4790 м/сек, а головных поперечных—2970 м/сек.

Скважина 107 (рис. 1,б) находится в местном переуглублении, сложенном пылеватым песком до глубины 12 м и толщей делювиальных обломочных отложений. Сейсмический профиль расположен вкрест простирания переуглубления. В пределах взрывного интервала в 300 м глубина до коренных пород изменяется от 35 до 50 м. Вся делювиальная

в верхней части разреза определяется в зависимости от глубины залегания преломляющего горизонта. При неглубоком залегании скальных грунтов использовался метод КМПВ, а в качестве источника сейсмических колебаний применялся удар кувалды о грунт в вертикальном и горизонтальном направлениях, для возбуждения продольных и поперечных волн. В случае залегания преломляющего горизонта ниже 20—30 м использовался метод МПВ, а сейсмические колебания возбуждались взрывами. Регистрировались только первые вступления. При работе методом КМПВ взрывной интервал составлял 90 м, а при МПВ—300 м.

На рис. 1 показаны три типа сейсмогеологических разрезов, встречающихся на участке № 2, и соответствующие им годографы. Сейсмогеологический разрез для шурфа №7 (рис. 1,а) представлен 4-метровой толщей делювиальных обломочных отложений, залегающей на трещиноватых кварцитовидных песчаниках. Средняя скорость распространения продольных волн в делювиальных отложениях составляла 3140 м/сек, а поперечных—1920 м/сек. Скорость головных продольных волн в трещиноватых песчаниках составляет 4790 м/сек, а головных

толща не дифференцируется в скоростном отношении и имеет среднюю скорость распространения продольных сейсмических волн 3220 м/сек. Граничная скорость продольных волн, приуроченная к кровле кремнистых песчаников, равна 4550 м/сек.

Совершенно другие сейсмогеологические условия имеет пойма р. Нирунгнакан скв. 38 (рис. 1, в). До глубины 50—60 м аллювиальные гравийно-галечно-валунные отложения находятся в талом состоянии. Ниже таликовой зоны отложения представлены теми же аллювиальными отложениями, находящимися в мерзлом состоянии. Средняя скорость прямых продольных волн в талых отложениях составляет 1040 м/сек, а граничная скорость в мерзлых отложениях достигает 4380 м/сек.

В правой части разреза выделяется зона, имеющая граничную скорость продольных сейсмических волн 2870 м/сек. Скорее всего, это талые обводненные аллювиальные отложения, в то время как сверху залегает необводненный талик.

Подобными исследованиями были охарактеризованы скоростные разрезы почти для всех типов грунтовых условий. При этом оказалось, что для скальных грунтов характерны скорости: продольных волн—5000 м/сек, поперечных—2900 м/сек. В выветрелой зоне скорости несколько снижаются: до 3500 м/сек для продольных волн и до 2000 м/сек—для поперечных. В рыхлых мерзлых грунтах в зависимости от их состава, льдонасыщенности и температуры скорости колеблются в широких пределах: 3000—3500 м/сек для продольных волн и 1500—3000 м/сек—для поперечных. Наиболее низкие значения скоростей распространения сейсмических волн получены для талых грунтов: от 870 до 1370 м/сек.

Хорошо известно, что наличие слоя рыхлых грунтов на скальном основании приводит к существенному усилению сейсмического эффекта при сильном землетрясении за счет влияния собственных колебаний слоя [6, 8]. В связи с этим для разрезов, построенных на основе инженерно-геокриологических данных, были произведены расчеты собственных колебаний для трех вариантов плоскопараллельных горизонтально залегающих слоев (табл. 1).

Таблица 1
Исходные данные для расчета собственных колебаний слоев

Вариант	Номер слоя	Мощность слоя, м	Плотность	P , м/сек	S , м/сек	Номер пункта наблюдений
I	1	4	2,5 2,7	3140 3500	1920 2900	Шурф 7
II	1 2	50	2,11 2,7	3540 5000	1970 2900	Скв. 107
III	1 2 3	5 40	1,9 2,2 2,7	840 1370 5000	(450) (600) 2900	Скв. 38 (талик)

Рассматривая табл. 1, легко увидеть, что в варианте I мы имеем дело с одним из распространенных типов грунтовых условий: скальный грунт, прикрытый маломощным слоем выветрелой породы того же состава или небольшой слой наносов. Во втором варианте рассматривается так типичный для многих строительных площадок случай: слой мерзлого рыхлого грунта мощностью 50 м, лежащий на скальном основании, и в третьем варианте мы сталкиваемся с талым грунтом, также лежащим на скальном основании.

Расчеты производились в отделе методов интерпретации ИФЗ АН СССР по программе Л. И. Ратниковой и А. Л. Левина [5]. Рассматривались случаи возбуждения колебаний объемными волнами P и S , падающими снизу с углами падения 20° — 40° для горизонтальных (u_{p-x}) и вертикальных (w_{p-x}) компонент.

При сейсмическом микрорайонировании наибольшее значение имеют резонансные пики на частотах от 1—5 гц ($T=1$ —0,2 сек), поскольку этот интервал частот соответствует собственным периодам колебаний различных инженерных сооружений, поэтому расчеты проводились в интервале частот от 0 до 10 гц .

В результате расчетов выяснилось, что в вариантах I и II резонансные явления в интересующем нас интервале частот не возникают, хотя во втором случае наблюдается плавное увеличение амплитуд примерно в 2 раза (рис. 2), что практически может дать приращение балльности на 1 балл.

В варианте III возникают резонансные пики на периодах 0,2—0,3 сек , близких к собственным периодам колебаний зданий (рис. 3).

Поскольку расчеты сделаны без учета затухания колебаний, то в реальных условиях с поправкой на затухание резонансные пики должны быть менее резкими.

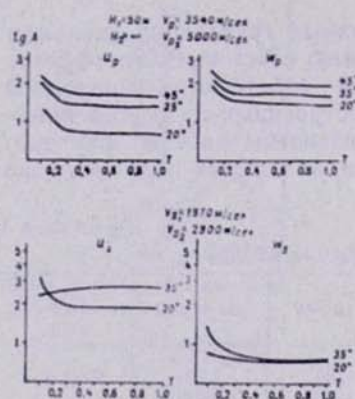


Рис. 2. Расчетные амплитудные спектры для II варианта

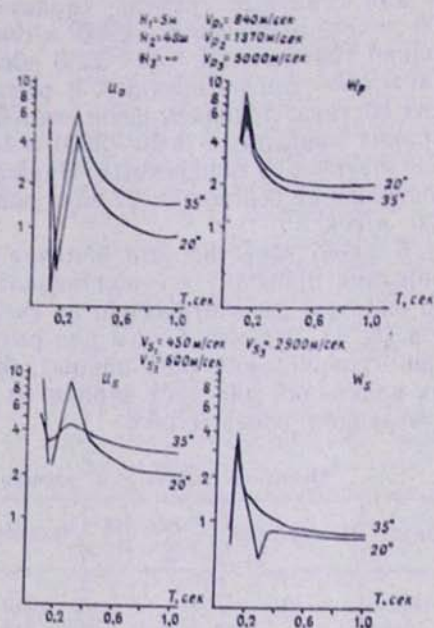


Рис. 3. Расчетные амплитудные спектры для III варианта

Регулярные инструментальные наблюдения над землетрясениями проводились на площадках № 1 и 2. На третьей площадке были проведены наблюдения только над взрывами. Наиболее полный объем исследований проведен на площадке № 2, где было организовано пять постоянных пунктов регистрации в различных грунтовых и мерзлотных условиях. Приборы были установлены возле шурфов 1, 7, 13, 115 и скв. 107.

Шурф 7—мерзлые скальные грунты (кварцитовидный песчаник);

Шурф 115—галечник мерзлый;

Шурф 13—илистые пески мерзлые, мощностью до 20 м;

Шурф 1—песок пылеватый, мерзлый с включениями линз льда;

Скважина 107—песок пылеватый, мерзлый, мощностью до 50 м.

На всех пунктах наблюдений были установлены регистраторы с большой скоростью развертки (240 и 480 мм/мин) с автоматическим синхронным пуском в момент землетрясения.

Автоматизация синхронного пуска нескольких регистрирующих устройств, удаленных друг от друга на значительные расстояния (более 1 км), дело пока еще сложное. Кроме того, сейсмичность Кодаро-Удоканского района в период наблюдений была невелика и требовалось значительное время для получения записей землетрясений. Чтобы обойти эти трудности и уменьшить время, необходимое для набора материала, были организованы наблюдения над взрывами, имитирующими колебания грунта при землетрясениях. Для этого в озерах, на расстояниях 1—3 км, проводились взрывы с зарядами в 50, 100, 200, 300, 400, 500 и 600 кг. Выбор пунктов взрывов в озерах делался с целью получения достаточного объема однородной среды для возбуждения сейсмических колебаний, близких по спектральному составу к естественным.

Взрывы проводились в ледниковых озерах глубиной от 2 до 10 м и площадью в 10—15 тыс. кв. м. При взрывах кроме стационарных, использовались пять передвижных сейсмических станций, что обеспечивало более полный охват всех возможных видов грунтовых условий (в том числе и зоны таликов). Таким образом регистрация велась одновременно в 8—10 пунктах наблюдения.

На площадке №3 использовались только взрывы и передвижные сейсмические станции.

Постоянные станции оборудовались сейсμοприемниками ВЭГИК в сочетании с гальванометрами ГВ—IV и осциллографами ОСБ—VI. На передвижных станциях использовались сейсμοприемники С-5-С с гальванометрами ГВ—IV и осциллографами Н—700. Увеличение первых было порядка 6000, вторых—2000.

На постоянных станциях приборы устанавливались на бетонные постаменты, основания которых заглублялись на 30—50 см ниже слоя сезонного промерзания, что исключало его воздействие на сейсмический эффект. На передвижных станциях в качестве постаментов использовались 5-миллиметровые железные плиты с пятью вертикальными штырями длиной 15 см для более плотного сцепления с грунтом.

Во всех случаях велась трехкомпонентная запись сейсмических колебаний.

Материалы инструментальных наблюдений на площадках подтверждают неблагоприятные сейсмические условия для варианта III, который соответствует наличию в толще мерзлых грунтов—талика.

Сопоставим теоретические расчеты с результатами полевых наблюдений:

1. Рыхлый и скальный мерзлые грунты (расчетные варианты I и II).

На рис. 4 изображены участки сейсмограммы с записями волны от землетрясения с эпицентральным расстоянием порядка 400 км и соответствующие спектры. Спектральные характеристики записей получены

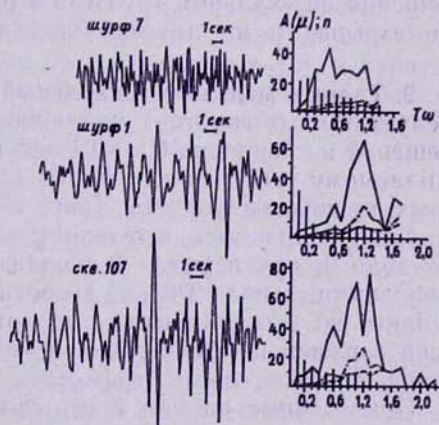


Рис. 4. Записи землетрясения (волна) и амплитудные спектры (сплошная линия—сумма амплитуд, пунктир—средняя амплитуда, штрих—пунктир—максимальная амплитуда, столбик—частота повторяемости периода)

сплошным промером видимых периодов и амплитуд Амплитуды пересчитаны в истинные смещения почвы в микронах. Наличие слоя мерзлого грунта мощностью 50 м (вариант II, скв. 107) приводит к увеличению амплитуд колебаний в 2—3 раза по сравнению со скальным грунтом (вариант I, шурф 7). На периоде 0,6 сек для скального грунта амплитуда колебаний 20 мк, а для 50-метрового слоя мерзлого рыхлого грунта амплитуда более 40 мк. На периодах 0,9—1,2 сек разница в амплитудах колебаний увеличивается еще больше.

На рис. 5 приведен пример записи взрыва с зарядом 400 кг и соответствующие ему спектральные характеристики грунтов, для которых

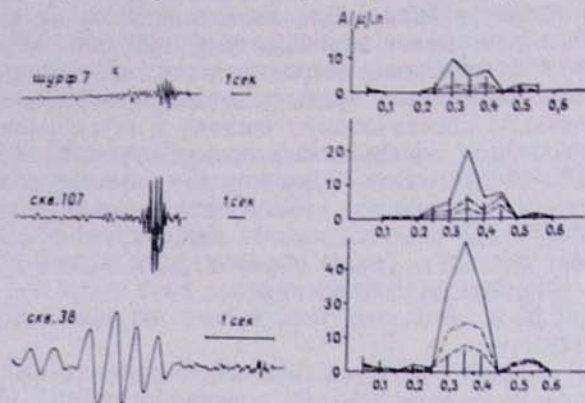


Рис. 5. Записи взрыва и амплитудные спектры для пунктов наблюдения, где было записано землетрясение (рис. 4). В скв. 38 талый грунт

были получены записи землетрясения (рис. 4). Из сравнения спектров для скального (шурф 7) и рыхлого (скв. 107) грунтов видно, что на периоде 0,35 сек смещения почвы на рыхлом мерзлом грунте превосходят смещения на скальном грунте в 2 раза. Подобное явление наблюдается при взрывах и на других участках.

2. Талик, мерзлота и скальный грунт (III расчетный вариант). В случае талых грунтов наблюдается резкое увеличение амплитуд смещений на периодах 0,3—0,4 сек (рис. 5, скв. 38), что соответствует ожидаемому увеличению амплитуд при подходе объемных волн, для которых проведены расчеты (рис. 3).

Следует отметить, что теоретические расчеты проведены для объемных волн, а при взрывах наблюдаются резкие увеличения амплитуд поверхностных волн Релея. Теоретические расчеты для волн Релея не сделаны, но экспериментальные данные, полученные из сравнения записей взрывов и землетрясений, показывают, что практически наблюдается тот же самый эффект.

Приведенные на рис. 5 результаты получены на наиболее хорошо изученном участке. Аналогичные значительные увеличения амплитуд на периодах 0,2—0,3 сек в талых грунтах отмечены при регистрации взрывов на участке № 3.

Изложенный выше материал позволяет сделать ряд выводов.

Прежде всего, совершенно очевидно, что наличие талых грунтов среди сплошной мерзлоты в значительной степени ухудшает инженерно-

геологические условия строительных площадок. Талики ограниченного объема, включенные в массив вечномёрзлых грунтов, представляют собой серьезную опасность в сейсмическом отношении. По-видимому, это можно объяснить тем, что в сравнительно малом объеме талых грунтов, заключенных среди массива мерзлых грунтов с резко отличными физикомеханическими свойствами (разница в скоростях распространения сейсмических волн достигает порядка 3—4 км/сек), происходит многократное отражение сейсмических волн от границы раздела, что приводит к резкому усилению сейсмического эффекта. Расчетную балльность на таких участках, по-видимому, придется повышать на 2—3 балла по отношению к исходной (для средних грунтов). Еще большую опасность талые грунты могут представлять, если они возникнут как следствие эксплуатации сооружений при резком нарушении температурного режима вечной мерзлоты.

Сейсмическое микрорайонирование, если его проводить путем наблюдений над землетрясениями, требует значительных затрат времени. Даже в таком высокосейсмичном районе, как побережье Тихого океана, сейсмическое микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского заняло около трех лет, в течение которых было получено лишь 60 записей землетрясений, которые могли быть использованы в процессе исследований [2].

Выше было показано, что наблюдения над взрывами дают материал, вполне пригодный для целей сейсмического микрорайонирования. Отсюда следует, что в большинстве случаев, особенно на небольших площадках, при сейсмическом микрорайонировании вполне возможно проводить исследования с помощью взрывов, что позволит сократить сроки исследований с нескольких лет до 6—7 месяцев.

На основании описанного выше опыта может быть предложена следующая методика инструментальных исследований при сейсмическом микрорайонировании.

Вначале с помощью сейсморазведки определяются характерные скоростные разрезы зоны малых скоростей (на глубину до 50—100 м). Эти работы проводятся с учетом данных инженерно-геологических исследований. Они позволяют выделить характерные сейсмогеологические разрезы, для которых делаются теоретические расчеты ожидаемых спектральных характеристик. Для контроля результатов расчетов, в пунктах с типичными сейсмогеологическими разрезами проводятся наблюдения над взрывами. Полученные записи используются для построения амплитудных спектров и дифференциации площадки строительства по зонам разной балльности.

Конечно, эти выводы нельзя считать окончательными, так как рассмотренный в работе вопрос находится в стадии исследования и нуждается во всесторонней проверке и тщательном сравнении амплитудных спектров, полученных по записям землетрясений и взрывов, с расчетными.

Наилучшим способом проверки этих рекомендаций было бы проведение подобных исследований на территории, для которой сейсмическое микрорайонирование проведено по результатам наблюдений при сильных землетрясениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамбурцев А. Г. Экспериментальное определение параметров верхней части разреза сейсмическими методами. Изв. АН СССР, «Физика Земли», №3, 1968.
2. Ершов И. А., Медведев С. В. и др. Сейсмическое микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, №36 (203). Изд. «Наука», М., 1965.
3. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. Под ред. В. П. Солоненко, Изд. «Наука», М., 1966.
4. Николаев А. В. Сейсмические свойства грунтов. Изд. «Наука», М., 1965.
5. Ратникова Л. И., Левшин А. Л. Расчет спектральных характеристик тонко-слоистых сред. «Известия АН СССР», «Физика Земли», №2, 1967.
6. Саваренский Е. Ф. Элементарная оценка влияния слоя на колебания земной поверхности. Изв. АН СССР, сер. геофиз., №10, 1959.
7. Сейсмическое районирование СССР. Под ред. С. В. Медведева, Изд. «Наука», М., 1968.
8. Штейнберг В. А. Анализ колебания грунтов от близких землетрясений. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, №33 (200). Изд. «Наука», 1964.