

В. П. СОЛОНЕНКО, О. В. ПАВЛОВ, В. С. ХРОМОВСКИХ, В. А. ПАВЛЕНОВ

К МЕТОДИКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

На территории Советского Союза 6,4 млн. кв. км занимают районы с высоким уровнем сейсмической активности. Если учесть, что из них более 3,4 млн. кв. км (53%) приходится на области распространения вечномёрзлых грунтов, то становится понятной необходимость скорейшей разработки методики сейсмического микрорайонирования в условиях вечной мерзлоты. Эта необходимость диктуется еще и тем, что в настоящее время в Восточных и Северо-Восточных районах широким фронтом разворачиваются проектирование и строительство крупных промышленных сооружений, гидроузлов, городов и т. д.

Существующие способы инструментального сейсмического микрорайонирования в условиях вечной мерзлоты оказываются неприемлемыми. Это обусловлено тем, что материалы инструментальных наблюдений обычно характеризуют грунты, физико-механические свойства которых соответствуют лишь периоду наблюдений, причем при построении карт сейсмического микрорайонирования подразумевается стабильность этих свойств. Это справедливо для районов с положительным геотермическим полем, поскольку здесь основания фундаментов сооружений закладываются ниже подошвы слоя зимнего промерзания грунтов и тем самым почти исключается влияние сезонномёрзлого слоя на поведение сооружений при сейсмическом потрясении.

В условиях вечной мерзлоты физико-механические свойства грунтов нестабильны и изменяются в течение всего года. Так, исследования, проведенные в двух районах вечной мерзлоты в Восточной Сибири, показали, что скорости продольных волн в мерзлых грунтах составляют 3—4 км/сек, а при их оттаивании падают до 1,8—2,3 км/сек. Одновременно изменяется и плотность грунтов, вследствие чего акустические жесткости одних и тех же грунтов могут меняться в очень широких пределах (в 2 и более раза). Меняются и амплитуды, и периоды колебаний грунтов. Все сказанное относится не только к грунтам деятельного слоя, но и к верхним горизонтам вечной мерзлоты, так как с изменением температуры мерзлого грунта изменяется количество воды, находящейся в жидкой фазе, а следовательно, изменяются и свойства грунта. Нельзя забывать и о том, что уже при строительстве очень часто бывает невозможным сохранить естественный режим мерзлого слоя, что ведет к изменению как физико-механических, так и сейсмических свойств грунта, находящегося в основании сооружения. Мощность деятельного слоя после освоения строительных площадок обычно резко увеличивается, а под сооружениями, построенными с расчетом уничтожения вечной мерзлоты, образуются псевдоталики, поэтому изменяются и резонансные свойства верхнего горизонта грунтов.

В настоящее время существует два основных способа строительства в условиях вечной мерзлоты. При первом—строительство ведется с расчетом на сохранение режима вечной мерзлоты, а при втором—заранее проектируются и рассчитываются мероприятия по уничтожению вечной мерзлоты. Этот способ обычно применяется в случаях, когда по условиям строительства либо невозможно сохранить естественные условия, либо тогда, когда мероприятия, направленные на сохранение вечной мерзлоты, экономически неоправданы. При освоении одних и тех же площадей часто приходится прибегать как к тому, так и к другому способам, что, естественно, предъявляет определенные требования к сейсмическому микрорайонированию строительных площадок.

В соответствии с этими двумя способами строительства и особенностями изменения сейсмических свойств грунтов при переходе из мерзлого в талое состояние вытекает основной принцип сейсмического микрорайонирования в условиях вечной мерзлоты—составление двух вариантов карты сейсмического районирования: для случая сохранения вечной мерзлоты в основаниях сооружений и для случая ее уничтожения. Для их составления, кроме материалов инструментальных исследований, направленных на получение сейсмических характеристик грунтов, находящихся в мерзлом и талом состояниях, необходим большой комплекс сейсмогеологических и инженерно-геокриологических исследований. Сейсмогеологические исследования необходимы для выявления сеймотектонических особенностей района строительных площадок и установления исходного балла. При инженерно-геокриологических исследованиях решается большой круг вопросов, связанных с характеристикой вечномерзлых грунтов, инженерно-геологическими условиями площадок, характером и ходом физико-геологических процессов. Для обоснования карт сейсмического микрорайонирования необходимо располагать следующими наборами карт.

1. Сеймотектонические карты сейсмоопасной зоны и районируемого участка. Площадь детальной сеймотектонической карты определяется верхним уровнем сейсмичности данного района. Для определения этой площади в условиях Монголо-Байкальской сейсмической зоны в основу могут быть положены результаты суммирования всех наблюдений над сильными землетрясениями. Например, при верхнем уровне сейсмичности в 10 баллов необходимо исследовать площадь не менее в 2 тыс. кв. км, в то время как при верхнем уровне в 9 баллов эта площадь может быть сокращена более чем в 1,5 раза.

2. Инженерно-геокриологические карты (инженерно-геологическая, мерзлотно-литологическая, коренной основы, мощностей рыхлых отложений, льдонасыщенного состояния грунтов и др.) должны давать полную характеристику как инженерно-геологических условий строительных площадок в целом, так и освещать специальные вопросы геокриологии (характер геокриологического разреза толщи, льдистость вечномерзлых грунтов, их относительная осадка при протавании, ископаемые льды, термокарст и мн. др.).

Помимо перечисленного набора карт, необходимо тщательное изучение макросейсмического материала и постановка широкого комплекса инструментальных наблюдений.

Исходя из этих основных положений, Институтом земной коры СО АН СССР совместно с Восточно-Сибирским трестом инженерно-строительных изысканий было проведено сейсмическое микрорайонирование одной из строительных площадок в Становом нагорье.

Площадка расположена в пределах одной из эмбриональных впа-

дин байкальского типа и ее горного обрамления [1]. Сейсмо-геологическое изучение впадины показало, что она является активно развивающейся структурой живой тектоники с высоким уровнем потенциальной сейсмической активности. Являясь одним из звеньев в цепи эмбриональных внутригорных впадин, протягивающихся по северному склону хребта Удокан, она несет все признаки, свойственные образованиям подобного типа. По своей структуре впадина представляет клинообразный грабен, ограниченный со всех сторон разломами. Разнос блоков земной коры по этим разломам достигает 700—800 м. Разлом, ограничивающий впадину с юга, разорвал покров верхнечетвертичных базальтов. Часть его оказалась погребенной под толщей ледниковых отложений, а другая сохранилась на вершинах южного горного обрамления. Базальты во впадине лежат на аллювиальных отложениях мощностью 10—12 м.

На южном и северном бортах впадины устанавливаются сейсмодислокации, образование которых связано с недавними землетрясениями силой порядка 9 баллов. Современная сейсмическая активность разломов, ограничивающих впадину, подтверждена инструментальными наблюдениями.

Поскольку Ингамакитская впадина представляет собой сложную блоковую структуру, в ней возможны очаги местных землетрясений с наибольшими глубинами (землетрясение 15 сентября 1963 г. $H=5$ км). При этих условиях землетрясения даже сравнительно невысокой интенсивности ($M=5-5\frac{1}{2}$) здесь могут проявиться как 8—9-балльные.

Сейсмическая опасность площадки определяется не только активностью самой впадины (в Намаракитской впадине, почти аналогичной по своей структуре, в 1957 г. произошло 10-балльное Муйское землетрясение), но и близким расположением к 10-балльной зоне, граница которой проходит в 8 км от площадки.

С учетом всего сказанного приразломная часть впадины включена в 9-балльный район повышенной сейсмической опасности.

К числу явлений, в значительной мере усложняющих сейсмические условия и неблагоприятных для строительства, относится сложное устроенная вечная мерзлота и связанные с нею физико-геологические процессы: термокарст, солифлюкция и т. д.

Мощность вечной мерзлоты изменяется от нескольких метров до 100—120 м, а в горном обрамлении и до 700—800 м. В местах выхода подземных вод вечная мерзлота отсутствует и возникают довольно крупные талики. Льдонасыщенность грунтов колеблется от 6—8% до 45—48% и даже 65%. В связи с тем, что впадина во время последнего оледенения была ледоемом и бассейном ледниковой аккумуляции, в толще ледниковых отложений встречаются ископаемые льды, ледяные ядра гидролакколитов и другие генетические типы льдов. Тектонические трещины и трещины отдельности в скальных породах верхней части геокриолитозоны также зачастую заполнены льдом. Очень существенно колеблется температура вечной мерзлоты и физико-механические свойства даже однородных по гранулометрическому составу и влажности грунтов.

С целью исследования сейсмических свойств грунтов на площадке были поставлены инструментальные наблюдения методом акустических жесткостей и амплитудно-частотным методом. С целью сокращения времени, наряду с регистрацией землетрясений, была проведена серия взрывов, имитирующих сейсмический эффект. Всего проведено 11 взрывов с весом зарядов в 50, 100, 200 и 400 кг. Все взрывы были проведены в воде (в озерах) на глубинах 4—10 м. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались: 1) сейсмограф ВЭГИК—гальванометр

1 Б-IV—осциллограф ОСБ-VI; 2) сейсмограф С-5С—гальванометр ГБ-IV—осциллограф Н-700. Первый комплект аппаратуры использовался на стационарных сейсмических станциях, установленных в определенных грунтовых условиях с наиболее характерными разрезами, а второй—только при взрывах, в качестве передвижных типов грунто-вых условий.

Первая группа взрывов в количестве шести была проведена при расположении пунктов регистрации по профилю для выбора оптимального веса заряда и эпицентрального расстояния (пункт взрыва—станция). Вторая группа проводилась при условии примерно одинакового расстояния от пункта взрывов до станций (3,5—4 км). При обработке результатов выяснилось, что при взрывах достаточно хорошо освещаются сейсмические характеристики грунтов в диапазоне периодов 0,05—0,5 сек и записи по взрывам хорошо согласуются с записями по землетрясениям. Величины встречающихся периодов по взрывам лежат в интервале 0,03—0,75 сек, в то время как для землетрясений область регистрируемых частот расширяется и лежит в интервале периодов от 0,05 до 1,63 сек. Анализ спектров записей взрывов и сравнение их со спектрами землетрясений показывает, что при взрывах в воде на сейсмограммах присутствуют те же периоды, что и при землетрясениях, а интервал частот, наиболее важный для сейсмического микрорайонирования, хорошо перекрывается.

При сравнении записей, полученных для рыхлых вечномерзлых и скальных грунтов, обнаруживается сопоставимость максимальных амплитуд как на тех, так и на других грунтах. Однако, рассматривая процентное соотношение повторяемости периодов, можно заметить, что для скальных грунтов частота повторяемости различных периодов более равномерна, чем для вечномерзлых.

При сейсморазведочных работах (использовалась сейсмическая станция ПСЛ-60) установлено, что скорости продольных волн в скальных породах составляют 4600—6000 м/сек, а для вечномерзлых рыхлых грунтов—3200—4200 м/сек. Разница в скоростях дает приращение балльности по методу акустических жесткостей 0,3—0,7 балла, в зависимости от плотности пород.

Значительные различия в максимальных амплитудах записей взрывов устанавливаются для случая изменения мощности слоя рыхлых отложений. При увеличении мощности слоя более 20 м наблюдается увеличение амплитуды в 2 раза (рис. 1). В этих же условиях отмечается и изменение скоростей продольных волн.

В результате исследований для площадки были составлены две карты сейсмического микрорайонирования (рис. 2).

На карте, составленной для естественных условий (при сохранении вечной мерзлоты), выделяются следующие микрорайоны:

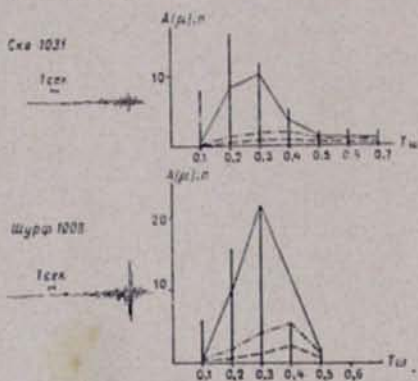


Рис. 1. Копии сейсмограмм взрыва с весом заряда 400 кг ВВ и соответствующие им спектры (вертикальная компонента): 1—спектр суммарных амплитуд; 2—спектр максимальных амплитуд; 3—спектр средних амплитуд; 4—частота повторяемости периодов, скважина 1031—мерзлый грунт, скважина 1001—мерзлый грунт $H > 20$ м

С расчетной сейсмичностью 8 баллов.

Выделяются на скальных грунтах с высокими несущими свойствами, что способствует снижению исходной сейсмичности, отнесенной к среднелдыстым валунно-галечным грунтам. В отдельных 8-балльных микрорайонах несущими грунтами являются валунно-галечные грунты с незначительной льдистостью (мощность более 10 м). Эти грунты

представляются более надежным основанием для сооружений, чем «средние», для которых принята исходная сейсмичность, поскольку в малолдыстых грунтах практически исключены релаксационные явления, возникающие при длительном воздействии нагрузок.

С расчетной сейсмичностью 9 баллов. Выделяются в областях распространения крупноскелетных, преимущественно валунно-галечных грунтов, с льдистостью от 37,8% до 63,5%. Мощность от 15 до 200 м.

Эти отложения приняты нами за «средний грунт». Их большая льдонасыщенность будет способствовать релаксационным осадкам под влиянием веса сооружений (особенно при неизбежном повышении температуры вечномерзлых грунтов), что приведет к перенапряжениям конструкций. Это обстоятельство заставляет сохранить исходную сейсмичность в этих районах, хотя вечномерзлые крупноскелетные грунты превосходят по несущей способности «средние грунты» с положительным геотермическим полем.

В зоне с исходной сейсмичностью 9 баллов повышенной опасности имеются микрорайоны со скальными грунтами и 9-балльная сейсмичность их объясняется близостью к живым сейсмоактивным разломам.

С расчетной сейсмичностью 10 баллов. Выделяются на резко расчлененных крутых склонах, сложенных скальными грунтами. При землетрясениях здесь весьма возможно возникновение обвалов, снежных лавин и т. п.

Расчетную сейсмичность 10 баллов имеют и зоны таликов с галечниковыми несущими грунтами и уровнем грунтовых вод на глубине 1,5—2 м.

Непригодные по инженерно-сейсмогеологическим условиям. Сюда отнесены участки с мощными погребенными линзами льда и развивающиеся термокарстовые воронки-провалы.

В горном обрамлении впадины в пределах этих микрорайонов широко развиты сейсмогенные трещины и вторичные сейсмогравитационные явления (осыпи, обвалы, оползни).

При составлении варианта карты сейсмического микрорайонирования с уничтожением вечной мерзлоты предполагалось, что при строительстве или эксплуатации сооружений будет допущено протаивание вечномерзлых грунтов в основании сооружений. В этих условиях

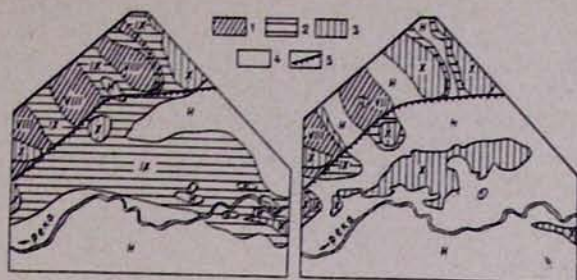


Рис. 2. Карта сейсмического микрорайонирования: а) для естественных условий; б) при уничтожении вечной мерзлоты. 1—3—сейсмические микрорайоны (1) 8 баллов; 2) 9 баллов; 3) 10 баллов; 4—микрорайоны, непригодные для строительства; 5—граница между зонами с исходной балльностью 9 баллов и 9 баллов повышенной опасности

8-балльная расчетная сейсмичность может быть сохранена только на скальных грунтах, представленных песчаниками. На крупнозернистых порфировидных гранитах расчетная сейсмичность повышается до 10 баллов, что объясняется тем, что эти граниты быстро теряют свои несущие свойства в зоне дезинтеграции и превращаются в дресву. Сооружения, построенные на этих грунтах, могут с течением времени резко снизить сопротивляемость динамическим нагрузкам.

Десятибалльная расчетная сейсмичность сохраняется в пределах бывших 8-балльных микрорайонов на крупноскелетных валуно-галечных грунтах, а также на песчаниках в 9-балльной зоне повышенной сейсмической опасности.

Десятибалльные микрорайоны со скальными грунтами не меняют своей конфигурации. Внутри впадины появляются 10-балльные микрорайоны с валуно-галечными грунтами, в пределах которых грунтовые воды будут находиться на разных глубинах в чашах протавивания под сооружениями. При осушении территории расчетная сейсмичность на отдельных участках в этих микрорайонах может быть снижена до 10 баллов повышенной сейсмической опасности. Этим подобные участки принципиально отличаются от 10-балльных микрорайонов, охватывающих зону таликов. Снижение расчетной сейсмичности в областях развития таликов за счет понижения уровня грунтовых вод вряд ли экономически целесообразно.

Таким образом, следует отметить, что сейсмическое микрорайонирование в условиях вечной мерзлоты представляется весьма сложной задачей вследствие большого числа вариаций мерзлого состояния одних и тех же по литологическому составу грунтов и невозможности, в большинстве случаев, сохранения естественного режима вечной мерзлоты при возведении и эксплуатации сооружений. Разработка двух вариантов карт сейсмического микрорайонирования представляется наиболее целесообразным направлением в решении этой важной проблемы.

Сейчас трудно сказать, как и в каких пределах скажется на превращении балльности различие в льдонасыщенности и температуре вечномерзлых грунтов—это очередная задача инструментального микрорайонирования. Приведенные нами карты сейсмического микрорайонирования свидетельствуют о том, что инструментальное изучение сейсмических свойств вечномерзлых грунтов должно проводиться в комплексе с инженерно-геокриологическими исследованиями.

В заключение необходимо подчеркнуть, что в сейсмических районах области вечной мерзлоты карта сейсмического микрорайонирования еще не решает вопроса о выборе площадки для строительства. Важнейшую роль здесь приобретает экономика. Строительство, например, в 8-балльном районе может оказаться дороже, чем в 9-балльном районе.

Институт
земной коры Сибирского
отделения АН СССР

ЛИТЕРАТУРА

Соловьев В. П., Тресков А. А., Курушин Р. А. и др. Живая тектоника, вулканы и землетрясения Станового нагорья. Изд. «Наука», М., 1966.