УДК 550.344

ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ ТЕРРИТОРИЙ ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

Джурик В.И.

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Лермонтова 128, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

Рассматриваются вопросы решения практических задач сейсмического микрорайонирования и прогноза изменения инженерно-сейсмологических условий строительства в процессе освоения территорий с мерзлыми грунтами. Обобщаются результаты оценки максимальных сейсмических воздействий, с учетом состояния грунтов, для территорий восточного фланга БРЗ и Южной Якутии. Рассмотрены основные динамические параметры сейсмических сигналов и диапазоны их изменений для относительно сильных землетрясений. Получены экспериментальные взаимосвязи между основными сейсмическими параметрами преобладающих разновидностей грунтов для их различного состояния и установлена возможность их прогноза при деградации мерзлоты, на примере территорий Муйской и Чарской впадин.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, Южная Якутия. Чарская впадина, максимальные ускорения, резонансные частоты, криолитозона, прогноз.

BASIS AND RESULTS OF ENGINEERING-SEISMOLOGICAL PREDICTION FOR THE EASTERN FLANK OF THE BAIKAL RIFT ZONE AND SOUTH YAKUTIA

V.I. Dzhurik

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Lermontov Str., 128, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

Consideration is being given to solving practical problems of seismic microzoning and predicting the change in engineering-seismological conditions during construction in permafrost areas. Generalization is made from the data on maximum effects from earthquakes for the eastern flank of the BRZ and South Yakutia with regard to ground conditions. The paper is concerned with the basic dynamic parameters of seismic signals and parameter variation ranges for relatively strong earthquakes. Experimental relationships have been obtained between the basic seismic parameters of the prevailing ground types for their different conditions, and a possibility has been found for the parameter predictions in permafrost degradation by the example of the Muya and Chara basins.

Keywords: Baikal rift zone, South Yakutia, Chara basin, peak accelerations, resonant frequencies, cryolithic zone, prediction.

Введение

Вариации климатических условий земли, техногенные и природные факторы, является отражением изменения сейсмических свойств и физико-механических параметров мерзлых грунтовых служащими основаниями сооружений, независимо от их состава. Подобная реакция грунтов являются негативной для строительства и, в большинстве случаев, уменьшает прочностные свойства мерзлоты в основаниях сооружений. Это, в свою очередь, вносит свои коррективы в особенности проявления сейсмичности в верхней части криолитозоны и, поэтому, должны прогнозироваться для проектирования сейсмостойких сооружений в таких районах. Реализуемые в данной статье исследования, являются попыткой решения поставленных задач для конкретных территорий путем проведения теоретических расчетов на основе полученного нами набора необходимых взаимосвязей между сейсмическими параметрами по экспериментальным данным.

Рассматриваемый Восточный фланг Байкальской сейсмической зоны (БСЗ), начиная от северной части о. Байкал, включает серию впадин: Верхнеан-

гарскую, Муйскую, Чарскую и районы южной Якутии. Они являются уникальными в природном отношении, где сочетаются распространения вечномёрзлых грунтов и проявления высоко балльных землетрясений [12]. Возможная их интенсивность на территории Восточного фланга Байкальской сейсмической зоны оценивается в 8, 9 и более баллов [2]. Она подтверждается следующими статистическими данными за последние 50 лет.

Землетрясение 1725 года (расчетная магнитуда $M=8$, возможная интенсивность сотрясений (J) – до 11 баллов, площадь ощутимых колебаний около 4 млн. км²); Муйское - 1957г. ($M=7,9$, $J=11$ баллов, площадь сотрясений – 2 млн. км²); Олекминское землетрясение - 1958 г. ($M=6,5$, $J=8$ баллов, эпицентр расположен в бассейне среднего течения р. Олекмы, площадь ощутимых сотрясений оценивается в 450-500 тыс. км²); Тас-Юряхское – 1967 г. ($M=7$, $J=9-10$ баллов, ощущалось на расстоянии более 1100 км от эпицентра, площадь ощутимых сотрясений 1,3 млн. кв. км); Южно-Якутское - 1989 (8 баллов, $M=6,6$, ощущалось на площади 1,2 млн. кв. км и на расстоянии более 800 км от эпицентра). Макро-сейсмические последствия, наиболее сильных сейсмических событий второй половины XX века в пределах рассматриваемой зоны, сводятся к следующему: камнепады, сход лавин, трещины в стенах жилых и промышленных объектов, испуг и паника среди населения. Местность слабозаселенная, поэтому при землетрясениях жертв не отмечено. Анализ имеющихся сейсмогеологических материалов и данные о последних землетрясениях указывают на современную высокую сейсмическую активность территории в настоящее время.

В связи с планируемым освоением этих территорий (вторая волна строительства БАМ и Сила Сибири) возникает необходимость помимо детальных геолого-структурных и сейсмологических исследований, направленных на уточнение исходной сейсмичности, проводить сейсмическое микрорайонирование территорий криолитозоны для естественного состояния грунтов и прогнозировать их изменение, в случае оттаивания грунтов, под воздействием климата и техногенеза.

Результаты исследований и их анализ

Ранее нами были проведены исследования динамики сейсмического риска на примере крупной геологической структуры Байкальской Рифтовой Зоны [3], которые выявили необходимость разработки новых и усовершенствования существующих подходов для прогноза изменения сейсмической опасности территорий промышленного и гражданского строительства. В развитие исследований в этом направлении на основе использования результатов режимных измерений сейсмических параметров мерзлых грунтов, выполненных на участках с различной степенью техногенного воздействия и в различных климатических зонах, были установлены экспериментальные уравнения. К настоящему времени они дополнены новыми измерениями, которые только подтвердили установленные ранее взаимосвязи и повысили их достоверность.

Это позволило получить общие представления о сейсмических свойствах наиболее распространенных грунтов северо-востока Сибири по наиболее вероятным их значениям (Рис.1). Установленная закономерность изменений основных параметров грунтов с учетом их состава и состояния, в дальнейшем использовалась для построения расчетных моделей и прогноза изменения скоростей упругих волн мерзлых (III) грунтов при переходе их в талое неводонасыщенное (I) или водонасыщенное (II) состояние. Сам прогноз обосновывается следующими экспериментальными уравнениями [4].

$$V_{PI}=0,3(V_{PIII} - 0,2T_{0,18}) - 0,47; V_{PII}=0,37(V_{PIII} - 0,2T_{0,18}) + 0,54;$$

$$V_{SI} = 0,185(V_{SIII} - 0,14T_{0,53}) - 0,052; V_{SII} = 0,164(V_{SIII} - 0,14T_{0,53}) + 0,103;$$

$$V_{PI}=1,05V_{PII} - 1,264; V_{SI}=1,18V_{SII} - 0,19.$$

Приведенные переходные уравнения соответствуют преобладающим песчаным и гравийно-галечным грунтам с песчаным заполнителем. Наибольшие значения скоростей распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн характерны для скальных грунтов. В мерзлых грунтах (V_p) и (V_s) во многих случаях значительно выше, чем в талых. Среди талых повышенными значения-

ми скоростей обладают обводненные грунты. Как следствие отношение максимальных амплитуд колебаний исследуемых и эталонных грунтов при землетрясениях у талых грунтов больше чем у мерзлых, но значительно меньше, чем у водонасыщенных. Соответственно, сейсмическая опасность мерзлых грунтов меньше, или сравнима с талыми и зависит от их температуры (Рис. 1).

Рис.1. Изменение скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, удельного электрического сопротивления (ρ) и отношения максимальных амплитуд ($A_i/A_{э}$) в зависимости от состава и состояния грунтов северо-восточного фланга БСЗ

Для расчетов сейсмической опасности грунтов различного состояния в баллах использовалась зависимость приращений сейсмической балльности от акустических жесткостей (ρV) по формуле С.В. Медведева [8] и установленной

нами зависимости приращений балльности от температуры мерзлого грунта (Т) и влажности-льдистости (W), согласно выражения:

$$\Delta I (WT) = Re^{-0,5T}(1-e^{0,17(W-5)}),$$

где Т – температура мерзлых грунтов, взятая по модулю и W - влажность (льдистость). Выражение справедливо при W>5%.

В общем представленная зависимость показывает, что при малых значениях влажности 4-7% сейсмические свойства мерзлых грунтов не зависят от температуры. При повышении влажности до 15% увеличивается приращение балльности, связанное температурой мерзлого грунта. И при влажности-льдистости большей 15%, величина $\Delta I (T)$ стабилизируется, имея наибольшее значение, при температуре 00 и приближается к нулю при температуре ниже - 40С.

Коэффициент R для песчаных и глинистых грунтов близок к единице, а для грубообломочных и валунных принимается равным, 0,5 [8].

В итоге отмечается, что сейсмическая опасность мерзлых грунтов меньше, или сравнима с талыми и зависит от их температуры [2]. Указанные закономерности изменения скоростей и сейсмической опасности в баллах в зависимости от состояния грунтов использовались при реализации прогноза максимальных сейсмических воздействий, в случае возможной деградации мерзлоты на участках С-В БСЗ, на примере Чарской впадины.

Чарская впадина представляет собой хорошо развитую тектоническую депрессию на восточном фланге БРЗ. Она вытянута с юго-запада на северо-восток на 120 км, имеет ширину 20-35 км. Северо-западный борт ее образован крутыми склонами хр. Кодар, с юго-востока она ограничена хр. Удокан, склоны которого плавно спускаются к днищу впадины. В Физико-географическом отношении Чарская впадина характеризуется суровыми климатическими условиями, она относится к районам сплошного распространения вечномерзлых грунтов [1]. Мощность мерзлой толщи по геотермическим расчетам во впадине превышает 100 и более метров при температуре от -1,5 до – 6 0С. Мощность пластов инъек-

ционного льда достигает 10-15 м, сквозные талики характерны для тектонических зон и встречаются под крупными озерами (Большое и Малое Леприндо), под руслами крупных рек (р. Чара) и некоторыми участками песчаных массивов (Урочище Пески). В горных сооружениях, обрамляющих впадину, мощность мерзлых пород может достигать 1000 и более метров (хр. Удокан и хр. Кадар на высоте 2000-2600 м) а их температура ниже -60°C [10]. Сейсмичность Чарской впадины оценивается в 9, 9 и 10 баллов согласно ОСР-97 [7], а пределы, в которых могут меняться параметры сильных землетрясений из зон ВОЗ следующие: эпицентрального расстояние 0-100 км, магнитуда 6,5-7,8, глубина очага 10-20 км.

Чарская впадина, как и Байкальская характеризуется межвпадинными перемычками с меньшими высотами, чем окружающие их поднятия. Она соединяется с Муйской (запад) и Токкинской (восток) впадинами, образуя между собой протяженные ветвящиеся рифтовые долины. Мощность кайнозойских отложений в ней достигают 2300-2800 м, а абсолютные отметки поверхности фундамента опускаются до 1500-2500 м [9]. Под Чарской впадиной построены две преломляющие границы с $V_{\text{гр}}=5,4$ и $V_{\text{гр}}=5,8$ км/с.

Первая граница является поверхностью фундамента впадины. Ее положение и структурные особенности согласуются с построениями по гравиметрическим данным [6]. Вторая граница расположена на глубине 2-3 км и, по своей конфигурации, подобна поверхности фундамента. Ниже на глубинах 4-5 и 8-10 км идут изолинии скоростей 6,0 и 6,2 км/с [9]. В средней части земной коры установлен слой с пониженной до 6,0 км/с скоростью, ограниченной сверху и снизу изолиниями скоростей 6,3 и 6,4 км/с. Понижение скорости составляет 0,3-0,4 км/с. На этих же глубинах выделены отражающие границы со средними скоростями 5,9 и 6,0 км/с.

Освоение территории впадины (БАМ, станционные и промышленные поселки, подъездные пути к месторождениям, строительство ГОКов), приводит к более существенному изменению природной среды [2], поэтому решение вопросов прогноза сейсмических воздействий при деградации мерзлоты должно быть

связано с прогнозом изменения мерзлотно-инженерно-геологических и гидро-геологических условий строительства планируемых объектов. Для решения главной задачи и исключения влияния неоднородностей при расчетах относительных сейсмических параметров грунтов необходимо построение сейсмических моделей трех уровней (Рис. 2).

Рис. 2. Типовые сейсмогрунтовые модели для глубин 0,01-0,1 км (модели 1-5), от 0,01-3 км (модели 13-15) и до 12 км (модели 10-12)

Для первых двух (стадии ОСР и ДСР) это построение моделей до глубин в десятки километров (ОСР), в основном это данные (ГСЗ) для конкретных районов, различающихся по сейсмическим и геологическим условиям начиная с поверхности фундамента. На стадии ДСР могут использоваться имеющиеся сведения по среднеглубинной геофизики, для моделей, характеризующих зону выветривания и трещиноватые коренные породы (ДСР).

Третий уровень моделей соответствовал самой верхней части разреза, включающей слои рыхлых отложений, разрушенных полускальных и скальных пород, с учетом влияния гидрогеологических и мерзлотных условий территорий, а также ожидаемых техногенных изменений грунтов (СМР). Для построения обобщенных моделей этого уровня необходим большой объем измерений петрофизических характеристик грунтов на исследуемой территории с помощью малоглубинной геофизики. Далее обосновываются исходные сигналы, соответствующие вероятным сильным землетрясениям и проводятся теоретические расчеты [4-5].

В итоге изучено влияние глубинных и приповерхностных неоднородностей на расчетные параметры сейсмических воздействий и получены общие представления о сейсмических свойствах наиболее распространенных грунтов северо-востока БСЗ по наиболее вероятным их значениям (Рис. 1). Построены карты схемы сейсмического риска Чарской впадины для естественного и прогнозируемого состояния мерзлоты. Впадина разделяется на участки 8-9 баллов для естественного (мерзлого) состояния грунтов (Рис. 3) и для прогнозируемого талого состояния разделяется на участки 8, 9 и 10 баллов (Рис.4). Диапазон изменения максимальных ускорений в первом случае составляет 160-420 см/с² и во втором 160-900 см/с² – соответственно для естественного и прогнозируемого состояния грунтов.

Построение карт-схем максимальных ускорений для крупных геологических структур имеет в большей степени методический характер и в обобщенном виде характеризует динамику сейсмического риска при температурных изменениях в криолитозоне. Выявленная степень влияния слоев горных пород различного состояния, на исходные сейсмические колебания, проведенная через расчет спектральных характеристик, акселерограмм и спектров ускорений, показывают значительную изменчивость влияния верхних слоев грунтовых отложений на интенсивность и частотный состав землетрясений. Получена следующая закономерность: на сцементированных льдом мерзлых и коренных породах большой

мощностью основные изменения исходного сигнала можно ожидать на частотах от 0,5 до 2,0 Гц. Максимумы частотных характеристик также смещаются в сторону низких частот. Деграция мерзлоты малой мощности приводят к усилению влияния приповерхностных неоднородностей, которые становятся значительными (сравнимыми с глубинными) на относительно высоких частотах.

Используя экспериментальные данные и теоретические расчеты, реализован подход к районированию сейсмической опасности, который заключается в представлении отдельных территорий, набором физических динамических моделей и в проведении для них расчетов необходимых величин. В результате в первом приближении построены карты-схемы максимальных ускорений (сейсмического риска) исследуемых крупных геологических структур для естественного состояния мерзлоты и на случай ее деграции. Тем самым работа направлена на прогноз изменения проявлений сейсмичности в криолитозоне и на возможность смягчения их последствий.

Рис. 3. Карта-схема максимальных сейсмических воздействий для естественного (мерзлого) состояния грунтов Чарской впадины

Рис. 4. Карта-схема максимальных сейсмических воздействий для прогнозируемого (талого) состояния грунтов Чарской впадины

Список литературы

1. Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М.: Наука, 1967. – 222 с.
2. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Инженерная геология и инженерная сейсмология. Новосибирск: наука, 1985. – 190 с.
3. Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф. Динамика сейсмического риска при температурных изменениях в криолитозоне. //Криосфера Земли. №4. Т.9. 2003. – С. 37-40.
4. Джурик В.И. Сейсмогеологические, сейсмологические и инженерно-сейсмологические исследования лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. – 2014, Т.1, №1– С. 135–157.
5. Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н. Основные параметры спектров ускорений при землетрясениях с $M > 5$ для Байкальской Рифтовой Зоны // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, №5. – С. 984-994.
6. Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской зоны и сопредельных территорий. М.: Наука, 1971. – С. 167.
7. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации, ОСР-97. М.: 1999. – 57 с.
8. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. – 300 с.
9. Недра Байкала по сейсмическим данным. Новосибирск: Наука, 1981. – 195 с.