



УДК 550.348

Инженерно-сейсмологическое обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Южной Якутии с учетом деградации мерзлоты

В. И. Джурик (dzhurik@crust.irk.ru)
С. П. Серебренников (serebr@crust.irk.ru)
А. Ю. Ескин (eskin@crust.irk.ru)
Л. А. Усинин (usynin@crust.irk.ru)
Е. В. Брыжак (bryzhak@crust.irk.ru)
А. Н. Шагун (shagun@crust.irk.ru)

Аннотация. На примере обоснования инженерно-сейсмологических условий строительства линейных сооружений на юге Якутии предлагаются подходы к оценке прогнозных сейсмических воздействий сильных землетрясений на их основания с учетом деградации мерзлоты. Для этого использовались результаты исследований комплексом инструментальных методов сейсмического микрорайонирования (сейсмических жесткостей, микросейсм и записей местных землетрясений), по которым получены исходные данные для проведения необходимых теоретических расчетов.

Ключевые слова: максимальные ускорения, резонансные частоты, сейсмическая опасность, сильные землетрясения, акселерограммы, метод микросейсм, частотные характеристики.

Введение

Успешное освоение Сибири и Дальнего Востока в первую очередь связано с развитием транспортных систем. Учитывая сложные природные условия этих районов, связанные с наличием мерзлоты и высокой сейсмичности, возникает необходимость всестороннего совершенствования подходов к обоснованию строительства линейных сооружений. Освоение территорий в пределах криолитозоны на участках распространения пластично-мерзлых грунтов с температурой, близкой к нулю, может приводить к их деградации, это вызывает необходимость прогноза параметров сейсмических воздействий, в особенности для наиболее ответственных линейных сооружений: мостовых переходов и станционных поселков.

Опыт инженерно-сейсмологических исследований, проведенных в пределах криолитозоны, показал, что если методика прогноза сейсмических воздействий в баллах для естественного состояния мерзлых грунтов

достаточно обоснована [7], то расчет основных параметров прогнозных акселерограмм и их спектров, на случай деградации мерзлоты, требует совершенствования. Реализацию одного из подходов решения поставленной задачи мы приводим на примере обоснования сейсмической опасности линейных сооружений (Юг Якутии) на проектируемой трассе железнодорожного пути «ст. Икабьекан – Тарыннахский ГОК» протяженностью 180 км.

Строительство железной дороги связано с планированием комплексного развития Сибирского региона, оно в первую очередь включает строительство горно-обогатительных комбинатов и промышленных объектов, расположенных в районах с высокой сейсмичностью, что ставит серьезные задачи по обеспечению сейсмической безопасности таких объектов и в первую очередь линейных сооружений.

Сейсмогеологические и мерзлотные данные

На обзорной карте сейсмичности (рис. 1) представлен район Южной Якутии, который неоднократно испытывал на себе сотрясения в 7–9 баллов. Широтное направление сейсмических событий в данном районе контролируется Хани-Кудулинской разломной зоной (рис. 1, обозначение 1), входящей в систему Станового краевого шва. Эта зона объединяет систему новейших разрывных нарушений сбросо-сдвигового типа, к ней приурочены эпицентры землетрясений с магнитудой $M \leq 5,0$ (Ханийское 1957 г.) и палеосейсмодислокации Кудулинская и Читкандинская (рис. 1, обозначение 2), образование которых связано с землетрясениями интенсивностью 8–9 баллов [6; 9]. В пределах описываемой системы разрывных нарушений обнаружены сейсмогенные деформации недавнего прошлого, приуроченные к фланговым частям (структуры «Кудули» и «Читкандинская»), образование которых связано с землетрясениями интенсивностью 8–9 баллов.

В основу сейсмического районирования исследуемой территории положена конфигурация зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) и определение параметров их сейсмического потенциала. Зона ВОЗ с максимальным уровнем сейсмической опасности ($M = 7,0-7,5$) приурочена к среднему течению р. Олекмы и расположена восточнее исследуемой территории. Она относится к области взаимодействия структур Байкальского рифта и Становой складчатой системы. Рассматриваемая зона ВОЗ способна генерировать сейсмические сотрясения с силой до 10 баллов. Зона ВОЗ с уровнем потенциальной сейсмичности ($M = 6,5-7,0$) охватывает бассейн среднего течения р. Олекмы между 56 и 58 градусами северной широты (рис. 1, обозначения 4–6). В пределах этой зоны ВОЗ находятся также сейсмодислокация «Кудули» и ряд вторичных сейсмопроявлений в виде обвалов, оползней и каменных выколов. Восточнее зона ВОЗ включает западную часть Чульманской впадины (междуречье Олекмы и Алдана), где находится эпицентр Южно-Якутского землетрясения 1989 г. с $M = 6,6$ [10; 11]. В названной зоне возникновения очагов сильных землетрясений возможно проявление сейсмических событий с интенсивностью в 9 баллов.

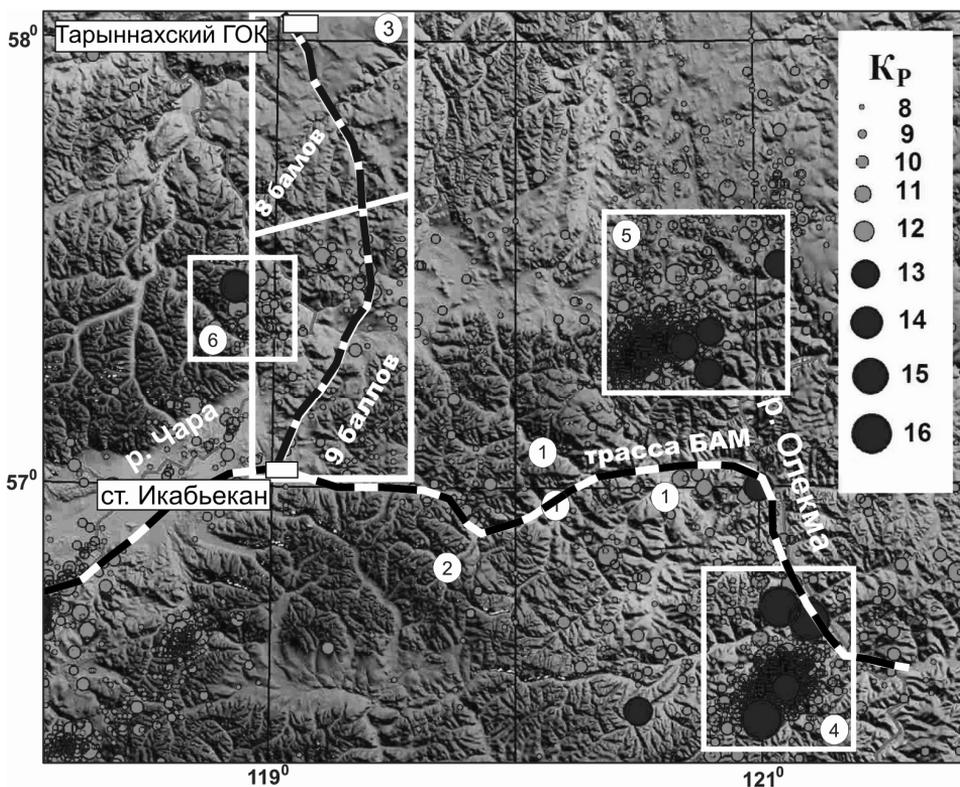


Рис. 1. Обзорная карта сейсмичности региона.

K_p – энергетический класс землетрясений с 8 по 16 (до 2010 г.);

1 – Хани-Кудулинская разломная зона; 2 – Читкандинская палеосейсмодислокация;

3 – район строительства; 4 – зона Тас-Юряхского (1967), Олекминского (1968) и Нюкжинского (1958) землетрясений; 5–6 – зоны с относительно повышенной плотностью эпицентров землетрясений за инструментальный период наблюдений

По собранным статистическим данным установлено, что на исследуемой территории подземные толчки с энергетическим классом $K_p = 12$ (6 баллов) возможны один раз в 10 лет, с $K_p = 13$ (6–7 баллов) – раз в 30 лет, с $K_p = 14$ (7 баллов) – раз в 100 лет, с $K_p = 15$ (8 баллов) – раз в 280 лет и $K_p = 16$ (9 баллов) – раз в 800 лет. Таким образом, средний период повторяемости 8- и 9-балльных событий на исследуемой территории может составлять от 200 до 800 лет. По сейсмогеологическим данным району присвоен сейсмический потенциал, равный магнитуде от 6,0 до 7,0 ($K_p = 15$ и $K_p = 16$), глубина возникновения гипоцентров ожидаемых землетрясений 8–40 км, эпицентральные расстояния от 30–40 до 200 км, преобладающий механизм очагов – взбросо-сдвиг. С учетом категории строительства, для дальнейших расчетов обоснована и принята исходная сейсмичность трассы по карте В [4]. В итоге, с учетом детального изучения сейсмичности, геологии и тектоники района, граница раздела железнодорожного пути на участки с исходной сейсмичностью 8 и 9 баллов проведена нами в масштабе строительства (см. рис. 1).

В целом исследуемый район входит в зону сплошного и островного распространения вечномёрзлых грунтов. Мощность мерзлой толщи варьируется от 0 до 300 м, температура мерзлых грунтов колеблется от минус 0,5–1,0 до минус 3–5 °С [1]. Это подтверждается и данными прямых измерений температуры при инженерно-геологических исследованиях, проведенных для обоснования строительства. Девятибалльная зона находится в относительно более суровых климатических условиях, и, следовательно, северная часть трассы характеризуется большим распространением в основании сооружения талых грунтов.

Методика задания исходного сигнала и построения расчетных моделей

При формировании исходного сейсмического сигнала необходимо учитывать местные условия и возможность использования записей сильных событий, зарегистрированных вне рассматриваемого региона, в том числе и мировой сетью. Разработка такого способа особенно важна для тех сейсмически активных регионов, где инструментальные записи сильных движений имеются в ограниченном количестве или где сеть станций записи сильных движений почвы еще не полностью сформирована. Основа, отвечающая вышеперечисленным требованиям, опирается на теорию восстановления сигналов и изображений по фазовым характеристикам [3], когда, в отличие от имеющихся способов, задается амплитудный спектр землетрясения с необходимыми параметрами, а фазовый спектр определяется по данным записей местных землетрясений и достаточно полно характеризует местные условия распространения сейсмического сигнала, поскольку учитывает как регулярную, так и случайную (рассеянную) составляющие. Вместе с тем в пределах исследуемой площадки пространственные вариации фазы предполагают некоторые различия в огибающих сейсмического сигнала, зарегистрированного в различных пунктах наблюдения. Поэтому задание исходного сигнала в общем случае сводится к ряду реализованных нами процедур, которые не противоречат имеющимся теоретическим и экспериментальным данным.

Определяется зона возможного сильного землетрясения. На основе сейсмологических и сейсмогеологических данных устанавливается наиболее вероятный тип подвижки в очаге. Из каталога или архивных материалов региональной сети сейсмических станций отбираются наиболее сильные землетрясения из интересующих нас зон ВОЗ. Далее производится разделение амплитудных и фазовых характеристик выбранных землетрясений с помощью прямого преобразования Фурье, т. е. реализуется получение соответствующих амплитудных и фазовых спектров (в настоящей работе использована стандартная программа вычисления спектров сейсмических сигналов методом быстрого преобразования Фурье (БПФ)). После чего по амплитудным спектрам отобранных записей землетрясений вычисляется средний амплитудный спектр.

Завершающим этапом является Фурье-синтез среднего амплитудного спектра с фазовым спектром, полученным по местному землетрясению с помощью прямого преобразования Фурье. Поскольку среда выступает формообразующим фактором очагового импульса, то фазовый спектр, так или иначе, учитывает излучение очага. Рассеивающие характеристики сред при усреднении амплитудных спектров отобранных сильных землетрясений по ансамблю нивелируются, а поглощающие характеристики усредняются и вряд ли сильно отличаются от средних для исследуемого региона, тем более что ошибка при экспериментальном определении последних может достигать 100%. Здесь надо отметить, что если по каким-либо причинам необходимо более полно учесть рассеивающие составляющие в синтезируемом сейсмическом сигнале, то вместо среднего амплитудного спектра можно использовать амплитудный спектр, полученный как огибающая, соединяющая соседние максимумы отдельных спектров отобранных землетрясений.

В том случае, когда параметры выбранных землетрясений имеют значительный разброс по отношению к требуемым, приходится иметь дело с нормированными амплитудными спектрами с последующим приведением интенсивности полученного исходного сейсмического сигнала к реальному с помощью данных общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР) [5] и инструментальной шкалы, или по нормативным средним.

При задании исходного сигнала по кратко изложенной выше методике мы использовали только записи местных землетрясений (северо-восток Байкальской рифтовой зоны), которые по своим параметрам отвечали сильным землетрясениям из выделенных зон ВОЗ для исследуемого района. Но и в этом случае наши возможности также ограничены в статистических данных по записям относительно сильных землетрясений в районе строительства. Записи, которые послужили основой для формирования исходного сигнала, мы приводим на рис. 2, основные параметры соответствующих землетрясений – в табл. 1.

Как уже отмечалось, нами реализован способ задания исходного сигнала, основанный на записях местных землетрясений и данных сейсмологического анализа с указанием пределов, в которых могут меняться параметры сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ. В подтверждение мы представляем только карту очагов землетрясений (см. рис. 1). Карта имеет свои недостатки в направлении ее использования, но она наглядно показывает расположение эпицентральных зон по отношению к участкам работ. Значительные интервалы изменений имеют также магнитуды, интенсивность землетрясений в баллах и другие параметры. Из этого следует, что каждая из рассмотренных характеристик имеет свои интервалы изменений, что свидетельствует о необходимости более обоснованного подхода как к заданию исходного сейсмического воздействия, так и к оценке его изменения за счет неоднородностей в пунктах строительства ответственных сооружений [2]. В нашем случае задание сигнала отвечало требованиям, изложенным в руководствах и нормативных документах [3; 5; 7; 8].

Таблица 1

Основные параметры землетрясений Якутии, записи которых использованы для формирования исходного сигнала

| № | Дата и время | Координаты эпицентра | | К | М | Сейсмостанция, эпицентральное расстояние, номер на рис. 2 |
|---|--------------------------|----------------------|-----------|------|-----|--|
| | | φ | λ | | | |
| 1 | 25.05.2004 11-09-11,9 | 56,0 | 125,72 | 10,7 | 3,7 | Чульман, 106 км, 3 Тында, 114 км, 6 |
| 2 | 10.11.2005 19-27-25,7 | 57,38 | 120,79 | 12,8 | 4,9 | Чульман, 260 км, 4 |
| 3 | 11.11.2005 06-12-47,7 | 57,42 | 120,75 | 11,8 | 4,3 | Иенгра, 300 км, 2 |
| 4 | 12.12.2005 18-44-38,5 | 57,45 | 120,85 | 10 | 3,3 | Иенгра, 100 км, 1 |
| 5 | 12.12.2005 18-48-23,8 | 57,45 | 120,92 | 11,6 | 4,2 | Алдан, 300 км, 9 |
| 6 | 14.12.2005 23-12-13,3 | 54,46 | 120,88 | 12,7 | 4,8 | Чульман, 260 км, 5 Тында, 308 км, 7 Алдан, 300 км, 8 |

Синтезированный по изложенной методике сигнал (рис. 3) приведен к эталону, представленному наиболее вероятной сейсмической моделью для всей рассматриваемой 9-балльной зоны. Основные параметры модели и сигнала следующие: мощность верхнего слоя 10 м, скорость продольных (V_p) сейсмических волн 2700 м/с, поперечных (V_s) – 1450 м/с, максимальное ускорение 208 см/с², максимум спектра 39 см/с, ширина спектра на уровне 0,5 от максимума меняется от 1 до 8 Гц, длительность колебаний на уровне 0,3 от максимума составляет 20 с. Указанные параметры исходного сигнала говорят о том, что он соответствует 8-балльному воздействию, а ширина спектра характеризует его соответствие как относительно далеким (максимумы спектра в основном в диапазоне 0–3 Гц), так и относительно близким (3–8 Гц) по эпицентральному расстоянию землетрясениям из выделенных зон ВОЗ. При проведении необходимых расчетов для линейных сооружений, расположенных в 8-балльной зоне, синтезированный сигнал (см. рис. 3) был масштабирован на 7-балльные воздействия для эталонных коренных пород.

Акселерограмма для модели эталона получена согласно расчету колебаний на поверхности и во внутренних точках среды по программе Л. И. Ратниковой [8] и при использовании записей местных землетрясений [3; 7].

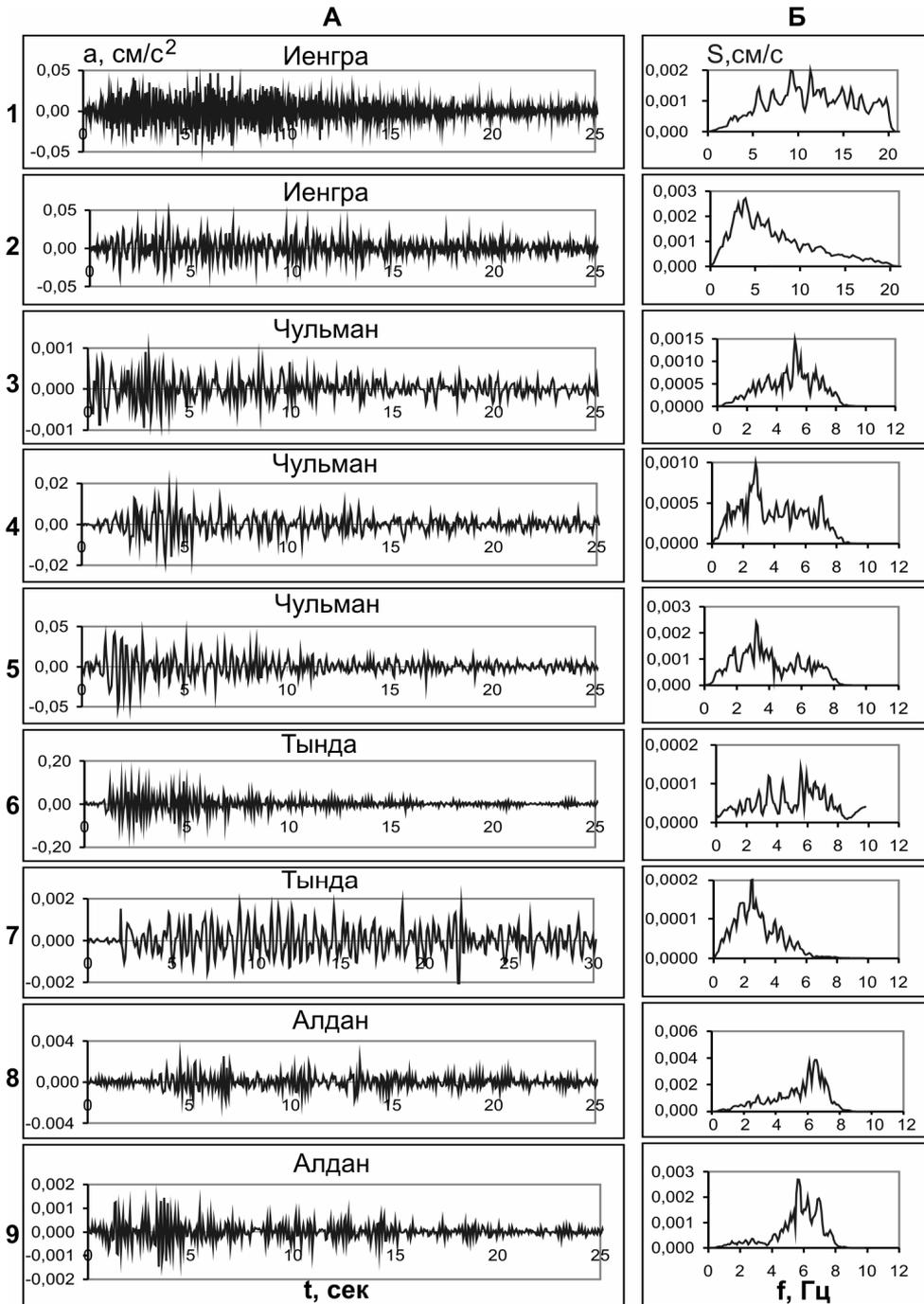


Рис. 2. Акселерограммы землетрясений (А) и соответствующие им амплитудные спектры Фурье (Б) (слева указаны номера, соответствующие последнему столбцу табл. 1)

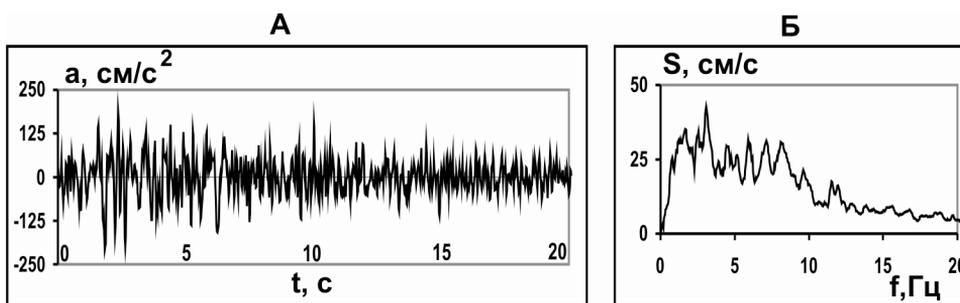


Рис. 3. Акселерограмма исходного сигнала для компоненты NS (ориентированной на север и юг) (А) и ее амплитудный спектр (Б)

Само обоснование сейсмической опасности трассы проведено при использовании комплекса методов сейсмического микрорайонирования: микросейсм, сейсмических жесткостей и расчетных методов [9]. Инструментальные измерения выполнены, согласно нормативным документам по сейсмическому микрорайонированию [5; 7; 9], более чем в 500 пунктах наблюдений. На сложных по инженерно-геологическим условиям участках и мостовых переходах они сгущались и разрежались на относительно однородных, представленных твердомерзлыми грунтами с неглубоким залеганием коренных пород. В результате представилась возможность провести статистический анализ распределения регистрируемых параметров по физическому состоянию грунтов и дать оценку сейсмической опасности трассы железнодорожного пути в баллах и в сейсмических ускорениях при использовании расчетных методов.

Использование последних недостаточно обосновано при расчетах сейсмических воздействий для грунтов различного состояния (мерзлые, воздушно-сухие, водонасыщенные) в основаниях сооружений. Поэтому нами использовались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) верхней зоны разреза, полученные с помощью метода микросейсм. Они определялись по отношению спектров горизонтальных компонент к вертикальным, согласно выражению [12]:

$$U(x) = \frac{H_N + H_E}{2V_Z},$$

где H_N , H_E – спектры микросейсм по горизонтальным компонентам NS (ориентирована на север и юг) и EW (ориентирована на восток и запад), V_Z – спектр по вертикальной компоненте Z. Этот способ позволяет в определенной мере компенсировать спектральные составляющие, связанные с техногенным шумом, и получить достаточно надежные собственные характеристики верхней толщи рыхлых отложений с учетом их состояния.

Для записи микроколебаний использовались автономные цифровые сейсмические станции ANG-06 с трехкомпонентными сейсмодатчиками A1632B. Применяемая аппаратура обеспечивала динамический диапазон 98 дБ в полосе частот от 0,5 до 20 Гц в режиме регистрации ускорений. Для получения необходимой статистической надежности при оценке урвня и

спектрального состава микроколебаний регистрация в каждом пункте велась не менее 10–15 мин. При этом измерялись колебания в направлениях осей X и Y , ориентированных на север и восток, и в направлении вертикальной оси Z . Схема измерений была выбрана с учетом того, чтобы охватить все разновидности грунтовых комплексов, представленных в основании железнодорожного пути.

Вначале было выполнено районирование трассы по выбранным инструментальным методам в баллах. При этом вся трасса с исходной сейсмичностью 9 баллов была разделена на участки с сейсмической опасностью в 8, 9 и 10 баллов, а с исходной сейсмичностью 8 баллов разбита на участки 7, 8 и 9 баллов. Согласно грунтовым условиям, наименьшим значениям балльности соответствуют в основном участки с преобладанием коренных и твердомерзлых грунтов ($T < -2^\circ\text{C}$), средним – пластично-мерзлые ($T > -2^\circ\text{C}$) и переходные зоны от мерзлых грунтов к талым, наибольшие значения балльности соответствуют водонасыщенным рыхлым отложениям (талики русел рек).

Для каждой зоны по большому количеству пунктов измерений были получены средние частотные характеристики по методу микросейсм. Для их дальнейшего использования они были трансформированы в частотные характеристики по записям землетрясений (рис. 4) путем умножения первых на величину отношения коэффициентов в формулах для расчета приращений балльности по методу микросейсм и амплитудно-частотному методу [7; 9]. На всех частотных кривых (см. рис. 4) вертикальными отрезками показан доверительный интервал для вероятности $P = 0,9$.

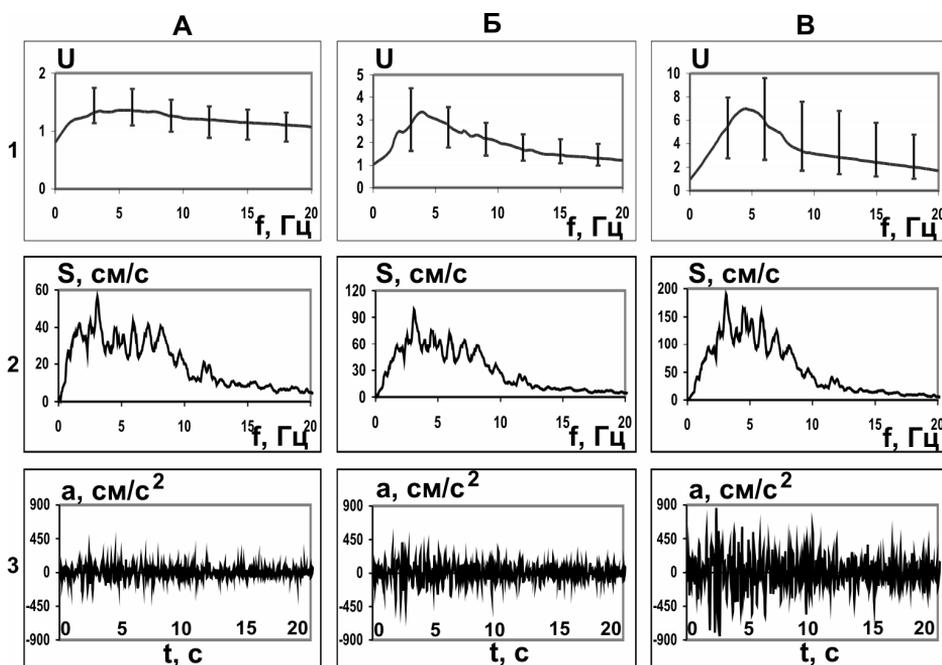


Рис. 4. Расчетные сейсмические характеристики

Среднестатистические частотные характеристики (1), восстановленные средние амплитудные спектры сигналов (2) и восстановленные акселерограммы максимальной горизонтальной компоненты сильных землетрясений (3) для 8- (А), 9- (Б) и 10-балльной (В) зон

Необходимо отметить, что такая трансформация не совсем корректна в смысле использования различных источников колебаний и применяемых методик расчета самих частотных характеристик. Но, учитывая, что это собственная характеристика верхнего слоя, и она определяется в большей степени его параметрами, а не источника колебаний, можно считать, что такой подход в первом приближении является корректным.

В результате получено, что наибольшие значения уровней средних частотных характеристик при переходе от участков с минимальными значениями балльности к средним и далее к максимальным меняются в отношении близком к 2 (1,4; 3,2; 6,8). Максимальное значение АЧХ связано с резонансными особенностями рыхлой толщи, и этот параметр использовался для оценки сейсмической опасности грунта в баллах по отношению к скальному грунту по известным зависимостям [5; 7]. Частоты основных максимумов на уровне 0,7 находятся в широких пределах – от 1–2 до 9 Гц, и это имеет свои объяснения, поскольку в анализ включались АЧХ, полученные в одинаковых по балльности сейсмических зонах, но для участков с различной мощностью верхнего слоя, лежащего на коренных породах, принятых за эталон. Однако отмечается, что при сейсмическом микрорайонировании (СМР) по трассе использовались конкретные АЧХ, их максимальные значения и резонансные частоты.

Полученные средние частотные характеристики нами использовались для восстановления акселерограмм сильных землетрясений на поверхности слоя также для каждой сейсмической зоны. Но для краткости изложения пример такого восстановления мы приводим только для участка с исходной сейсмичностью, равной девяти баллам. Для этого амплитудный спектр исходного сигнала, масштабированного для 9-балльной зоны (см. рис. 3), умножался на амплитудно-частотные характеристики (рис. 4, обозначение 1), что привело к получению спектров для изучаемых зон (см. рис. 4, обозначение 2). Далее путем реализации обратного преобразования Фурье рассчитывались средние акселерограммы, соответствующие сильным землетрясениям, для конкретно выделенных 8-, 9- и 10-балльных зон (см. рис. 4, обозначение 3). При этом использовалась фазовая характеристика синтезированного исходного сигнала (см. рис. 3).

Расчетные максимальные ускорения для 8-, 9- и 10-балльных зон равны 268, 430 и 856 см/с² соответственно. С учетом доверительных интервалов разброс значений относительно среднестатистической частотной характеристики представлен в табличной форме (табл. 2). Для коренных (эталонных) и твердомерзлых грунтов (8 баллов) относительное отклонение от среднего составляет 0,3, для 9-балльной зоны – 0,36 и для 10-балльной (водонасыщенные грунты) – не превышает 0,4. В результате величина отклонения от среднего по существующим шкалам не превышает 0,5 баллов.

Таблица 2

Расчетные максимальные ускорения для 8-, 9- и 10-балльной зон

| Сейсмическая опасность зон (баллы) | A_{\max} для минимальных значений АЧХ ($\text{см}/\text{с}^2$) | A_{\max} для средних значений АЧХ ($\text{см}/\text{с}^2$) | A_{\max} для максимальных значений АЧХ ($\text{см}/\text{с}^2$) |
|------------------------------------|--|---|---|
| 8 | 201 | 268 | 351 |
| 9 | 236 | 430 | 578 |
| 10 | 527 | 856 | 1176 |

Таким образом, при наличии синтезированного исходного сигнала, соответствующего по своим параметрам исходной сейсмичности территории, использование экспериментальных частотных характеристик для восстановления акселерограмм сильных землетрясений грунтовых оснований линейных сооружений можно считать обоснованным.

Используя отмеченные возможности выбранного комплекса методов и достаточно представительный статистический набор измерений скоростей сейсмических волн и АЧХ (по методу микросейсм), мы даем комплексную оценку сейсмической опасности на примере двух ответственных участков: железной дороги в пределах расположения планируемой станции (рис. 5) и мостового перехода через р. Кунг-Юрях (рис. 6).

Участки расположены в районе с исходной сейсмичностью, равной девяти баллам. Их представительность не вызывает сомнений в отношении сложности оценки сейсмической опасности. Участки являются наиболее ответственными для линейного сооружения, поскольку в большинстве случаев это переходные зоны от коренных и мерзлых пород к талым и водонасыщенным грунтам и от твердомерзлых к пластично-мерзлым грунтам (см. рис. 5 и 6).

Участки графиков, соответствующие моделям, параметры которых указаны в табл. 3, подписаны буквой М и номером модели. В квадратах представлены скорости сейсмических волн ($\text{м}/\text{с}$): сверху – V_P , снизу – V_S ; треугольниками указаны пункты регистрации микросейсм и измерений скоростей сейсмических волн. Кружками обозначены: 1 – граница мерзлоты для естественного состояния грунтов; 2 – граница мерзлоты для прогнозируемого состояния грунтов; 3 – температура мерзлых грунтов для их прогнозируемого состояния; 4 – уровень грунтовых вод (УГВ) в прогнозируемом состоянии

Статистику измерений по всей трассе мы использовали для формирования наиболее вероятных сейсмических моделей, соответствующих естественному и прогнозируемому состоянию грунтов, расчетов для них необходимых сейсмических воздействий и далее районирования по ним трассы линейного сооружения [3]. Для двух выбранных участков были сформированы восемь вероятностных сейсмических моделей (табл. 3): для естественного и прогнозируемого состояния грунтов.

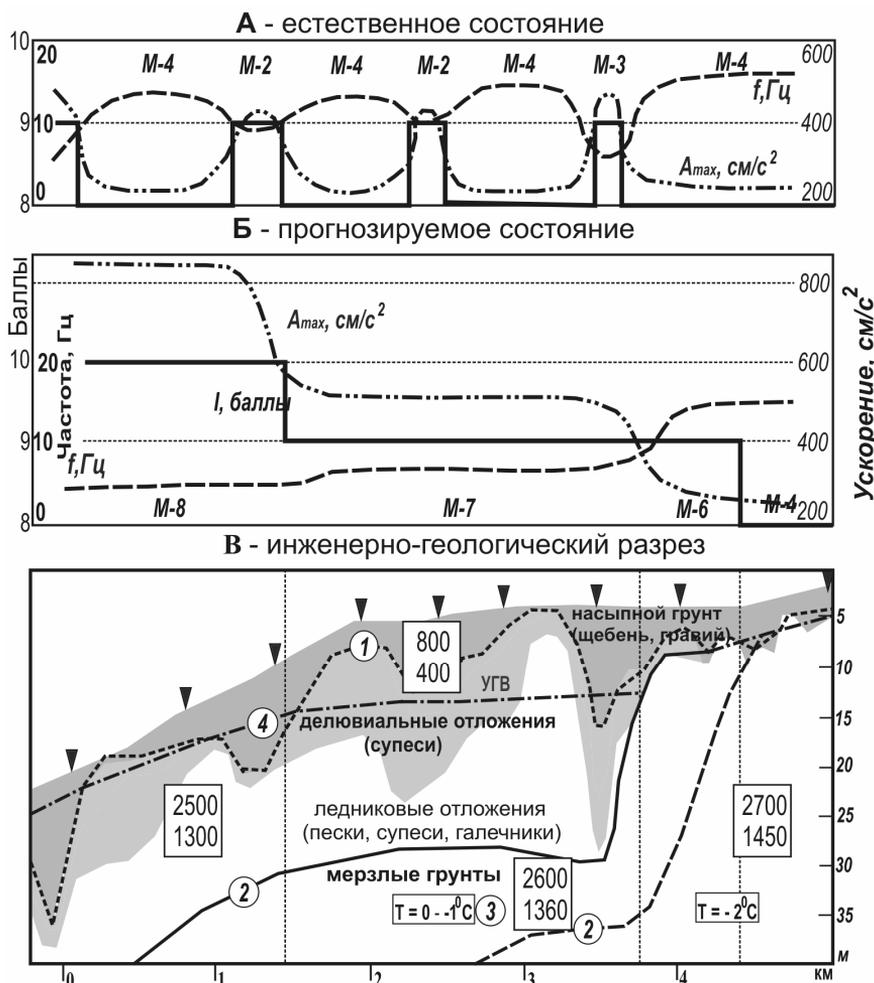


Рис. 5. Инженерно-сейсмогеологические условия строительства железной дороги в пределах расположения планируемой станции (исходная сейсмичность 9 баллов)

По ранее разработанной методике [7] проведен прогноз скоростей сейсмических волн по прямым измерениям в грунтах, таких же по составу, но находящихся в талом или в водонасыщенном состоянии. Прогнозируется одно из возможных состояний грунтов после нарушения их естественного состояния в результате строительства, что показывает (в параметрах сейсмических воздействий) степень увеличения сейсмической опасности для конкретно выбранного варианта оттаивания.

Результаты расчетов представлены в табличной (см. табл. 3) и наглядной формах (рис. 7). Согласно расчетам, проведенным в соответствии с изложенной выше методикой, сейсмическая опасность выбранных участков разделяется на 8, 9 и 10 баллов. Мерзлотные и инженерно-геологические условия участков с элементами прогноза достаточно детально представлены на инженерно-геологических разрезах (см. рис. 5 и 6).

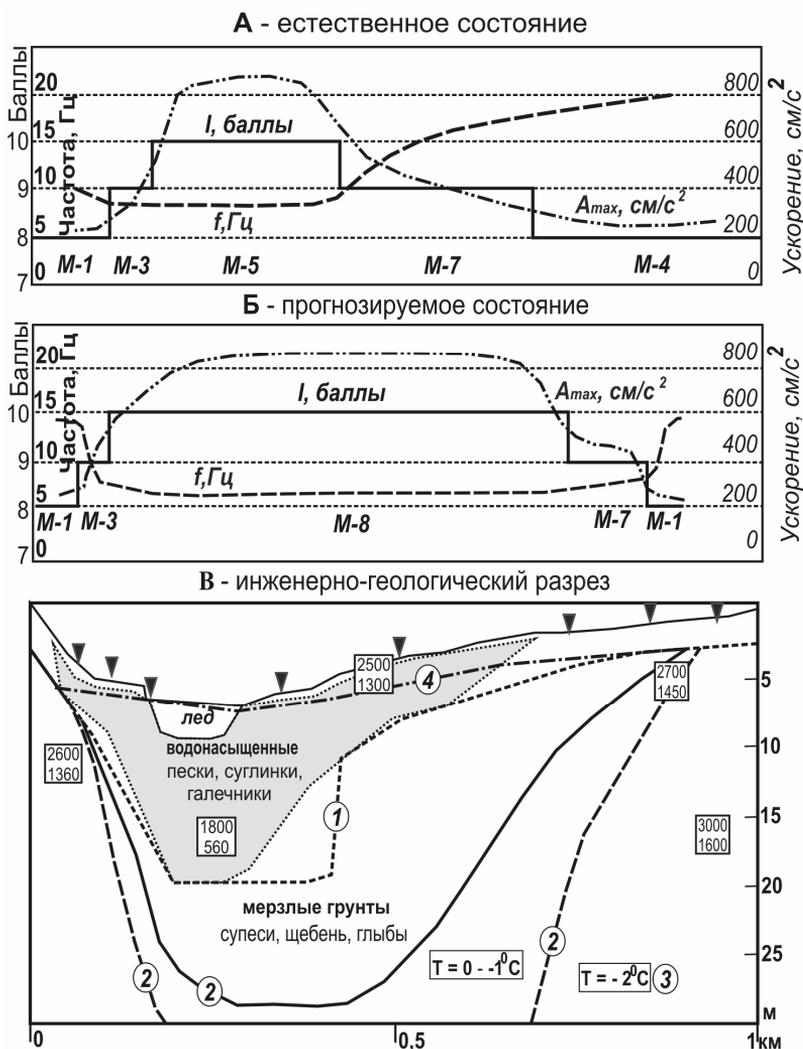


Рис. 6. Инженерно-сейсмологические условия строительства участка мостового перехода через р. Кунг-Юрях (условные обозначения те же, что и на рис. 5)

Для участка железнодорожной станции (см. рис. 5) характерны делювиальные отложения, они представлены в основном супесями со щебнем. Пески, супеси, галечники с включениями льда являются основой водно-ледникового комплекса. Грунты многолетнемерзлые, с поверхности талые, в естественном состоянии представлены чередованием талых неводонасыщенных рыхлых грунтов (до 6–14 м) и твердомерзлых, которые залегают ниже слоя сезонного оттаивания. В прогнозируемом состоянии разрез сверху представляется талыми неводонасыщенными рыхлыми грунтами (от 2 до 12 м), ниже идут водонасыщенные грунты мощностью до 15–20 м, подстилаются они мерзлыми грунтами с постепенным переходом от слоя с температурой от 0 до -1°C и далее до -2°C .

Таблица 3

Параметры вероятностных сейсмических моделей для выбранных ответственных участков строительства железнодорожной станции и мостового перехода и соответствующая им сейсмическая опасность

| Мо- дель | Тип (состояние грунта) | h (м) | V_P (м/с) | V_S (м/с) | ρ (т/м ³) | ΔI (бал- лы) | A_{max} (см/с ²) NS | I (баллы) Резонанс- ная частота f (Гц) |
|---|---|------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------------------|---|--|
| Коренные породы, модель эталона | | | | | | | | |
| М-1 | Коренные породы (мерзлые) | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | -1 | 208 | 8 |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | >20 |
| Естественное состояние грунтов | | | | | | | | |
| М-2 | Рыхлые талые до 10 м. Ниже мерзлые, с 20 м эталонные | 2 | 600 | 300 | 1,8 | 0 | 434 | 9 |
| | | 8 | 800 | 400 | 1,9 | | | 10,4 |
| | | 10 | 2500 | 1300 | 2,1 | | | |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |
| М-3 | Рыхлые талые до 20 м. Ниже эталонные | 2 | 600 | 300 | 1,8 | 0 | 480 | 9 |
| | | 8 | 800 | 400 | 1,9 | | | 5,8 |
| | | 10 | 900 | 450 | 2,0 | | | |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |
| М-4 | Мерзлые рыхлые, ($T < -2$ °C) Коренные поро- ды | 10 | 2500 | 1300 | 2,0 | -1 | 230 | 8 |
| | | 20 | 2600 | 1360 | 2,1 | | | 15,7 |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |
| | | | | | | | | |
| М-5 | Рыхлые водонасыщенные мерзлые (-1 °C) коренные породы | 14 | 1700 | 520 | 2,1 | +1 | 820 | 10 |
| | | 20 | 2600 | 1360 | 2,1 | | | 9 |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |
| | | | | | | | | |
| Прогнозируемое состояние грунтов | | | | | | | | |
| М-6 | Рыхлые мерзлые (-1 °C) мерзлые (-2 °C) коренные породы | 4 | 800 | 400 | 1,9 | -1 | 248 | 8 |
| | | 12 | 2500 | 1300 | 2,0 | | | 14 |
| | | 22 | 2600 | 1360 | 2,1 | | | |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |
| М-7 | Рыхлые водонасыщенные мерзлые (-1 °C) коренные породы | 9 | 800 | 400 | 1,9 | 0 | 510 | 9 |
| | | 12 | 1700 | 520 | 2,1 | | | 7 |
| | | 18 | 2600 | 1360 | 2,1 | | | |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |
| М-8 | Рыхлые водонасыщенные мерзлые (-1 °C) коренные породы | 3 | 800 | 400 | 1,9 | +1 | 860 | 10 |
| | | 18 | 1700 | 520 | 2,1 | | | 6 |
| | | 20 | 2600 | 1360 | 2,1 | | | |
| | | 10 | 2700 | 1450 | 2,5 | | | |
| | | ∞ | 3000 | 1600 | 2,6 | | | |

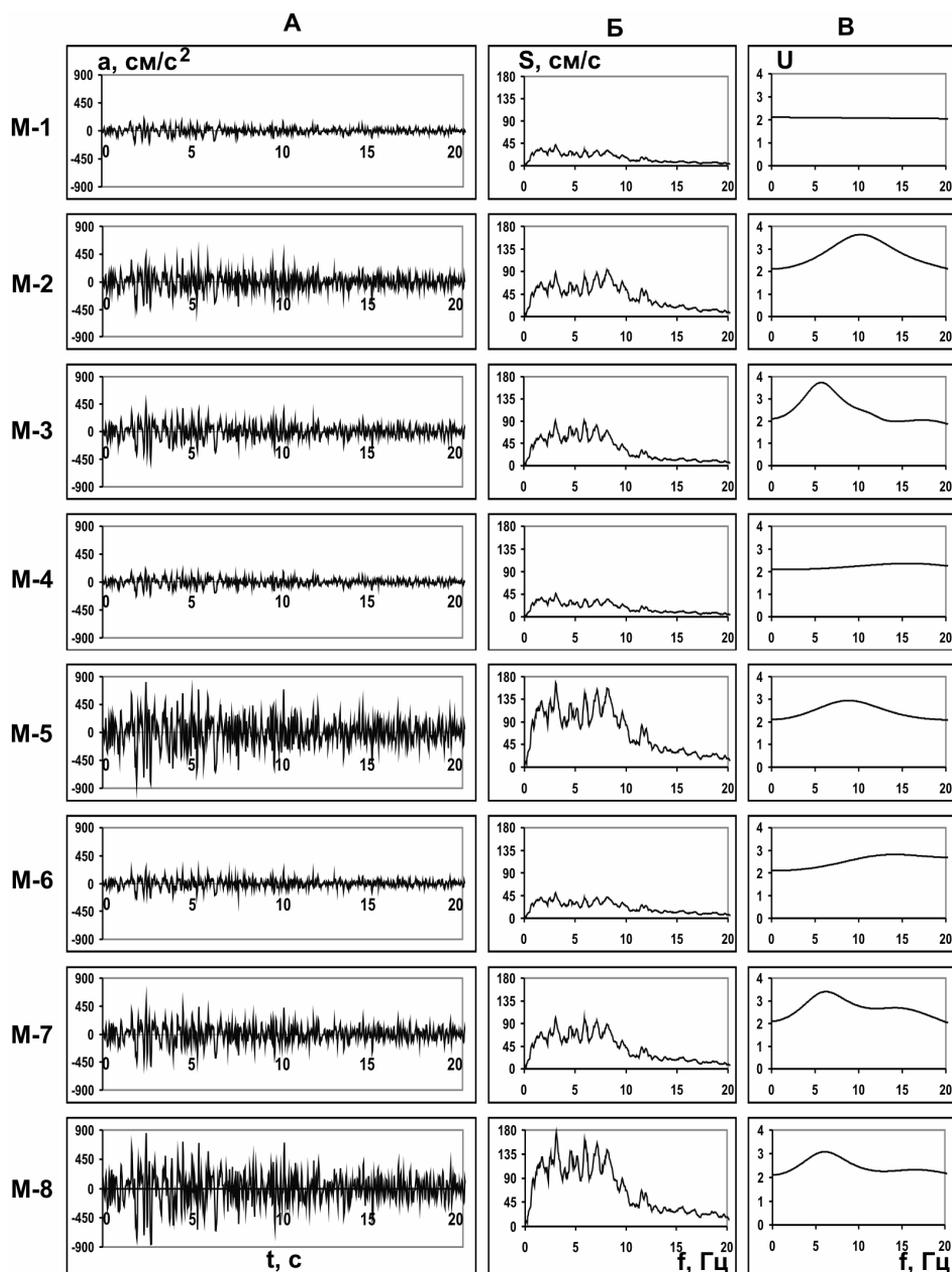


Рис. 7. Акселерограмма (А), ее амплитудный спектр (Б) и частотная характеристика слоя (В) (слева указаны модели, соответствующие табл. 3)

В восточной части разреза эти слои на незначительных расстояниях по разрезу залегают практически с поверхности, коренные породы со значениями акустических жесткостей, близких к эталонным, залегают с глубины 20–40 м. В общем, весь разрез для естественного состояния грунтов представляется моделями М-2, М-3 и М-4, а для прогнозируемого – моделями

М-6, М-7 и М-8 (см. табл. 3). В первом случае пиковые или максимальные для горизонтальной компоненты ускорения меняются от 230 до 480 см/с², во втором – от 248 до 860 см/с². Резонансные частоты имеют максимальные значения для модели 4 (15,7 Гц) и минимальные – для модели 3 (5,8 Гц), а для моделей 6, 7 и 8 частоты закономерно снижаются от 14 до 6 Гц.

Основой инженерно-геологического разреза участка мостового перехода (см. рис. 6) являются речные отложения, в состав которых входят пески, суглинки и галечниковый грунт. Грунты руслового участка насыщены водой. Делювиальные отложения представлены глыбовым материалом. Пески, супеси и галечниковый грунт с включением песка и валунов формируют образования водно-ледникового комплекса. На береговых участках коренные породы залегают практически с поверхности. Грунты многолетнемерзлые, на русловом участке талик. Для этого участка прогнозируется частичное оттаивание грунтов в результате строительства, которое приводит к увеличению мощности водонасыщенных рыхлых грунтов (до 20 м) и простираения их по оси мостового перехода. При этом смещаются по глубине и по створу линейного сооружения границы мерзлоты с различной отрицательной температурой.

Разрез по оси мостового перехода для естественного состояния грунтов представляется моделями М-1, М-3, М-4, М-5 и М-7, а для прогнозируемого – моделями М-1, М-3, М-7 и М-8 (см. табл. 3). Максимальные для горизонтальной компоненты ускорения меняются для обоих состояний в пределах от 208 до 860 см/с². Максимальные значения ускорений и минимальные резонансные частоты имеют русловые участки. При расчетах акселерограмм для естественного состояния грунтов использовались АЧХ, непосредственно зарегистрированные в пунктах измерений (они отмечены треугольниками на рис. 5 и 6). Для прогнозируемых состояний использовался метод тонкослоистых сред [8] и экспериментальные частотные характеристики для аналогичных разрезов.

Из рассмотренных примеров (см. рис. 5 и 6) очевидно, что даже частичная деградация мерзлоты приводит к значительному ухудшению инженерно-сейсмологических условий строительства.

Подтверждается (см. рис. 5 и 6), что видимая скоростная однородность грунтов для их естественного состояния, которая, казалось бы, должна определять и относительную однородность сейсмической опасности и меняться в соответствии с распределением акустических жесткостей, полностью не решает поставленные задачи. Здесь на первый план выходят прочностные характеристики грунтов, которые определяются их составом, температурой и физическим состоянием. Учет этих параметров для всей исследуемой трассы нами проведен через использование температуры мерзлоты, обводненности грунтов по методу сейсмических жесткостей, частотных характеристик по данным метода микросейсм и расчетных методов.

Таким образом, на современном уровне развития инженерно-сейсмологических исследований, обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Восточной Сибири воз-

можно только при получении достаточного набора данных по основным экспериментальным методам сейсмического микрорайонирования. Кроме того, обязательным элементом для ответственных линейных сооружений должен являться прогноз их сейсмической опасности на случай частичной или полной деградации мерзлоты. Это дает возможность проектировщикам судить, в экономическом отношении, о необходимости сохранения или уничтожения мерзлоты в процессе строительства.

Заключение

В статье рассмотрены данные экспериментальных и расчетных методов и их возможности по усовершенствованию инженерно-сейсмологического обеспечения сейсмической безопасности строительства линейных сооружений в условиях криолитозоны. Но сам подход к использованию вероятностных экспериментальных частотных характеристик для расчетов акселерограмм сильных землетрясений, соответствующих по своим параметрам исходной сейсмичности района, требует дальнейшего совершенствования. Его можно рассматривать как вариант лучшего приближения к использованию микросейсмических колебаний грунтов различного состояния для оценки сейсмической опасности в параметрах сейсмических воздействий, если они рассматриваются в предположении обратной связи амплитуд и прочностных показателей грунтов. Важно, что такая закономерность соответствует проявлению сейсмической опасности при ее оценке по прямому амплитудно-частотному методу сейсмического микрорайонирования, основанному на регистрации близких землетрясений.

Требуемые нормативными документами основные показатели (сейсмической опасности), полученные согласно теоретическим расчетам, могут быть приведены в соответствие с экспериментальными данными, когда для каждого состояния грунтов будет обоснована их сейсмическая модель, рассчитаны и масштабированы для каждой из них параметры сейсмических воздействий, соответствующие исходной сейсмичности района. В этом случае расчеты для каждого состояния грунтов (воздушно-сухие, водонасыщенные и мерзлые) будут наиболее обоснованными и соответствовать экспериментальным измерениям. Последние, в свою очередь, являются основой прогноза параметров сейсмических воздействий на случай частичной или полной деградации мерзлоты в результате строительства.

Проведенный выше анализ можно считать обобщением полученных результатов работ по СМР трасс линейных сооружений на юге Якутии в направлении более рационального использования теоретических расчетов и данных экспериментальных методов в условиях Восточной Сибири. Основой для получения акселерограмм, спектров ускорений и частотных характеристик служили данные комплекса расчетных и инструментальных методов сейсмического микрорайонирования (сейсмических жесткостей и микросейсм). В результате получен набор необходимых данных для оценки инженерно-сейсмологических условий строительства линейного сооружения по предложенной выше методике, возможности которой реализова-

ны на примере двух участков, расположенных в девятибалльной сейсмической зоне и в сложных геокриологических условиях.

При достаточном статистическом наборе регистрируемых инструментальными методами сейсмического микрорайонирования характеристик, обоснованном формировании исходного сигнала, с учетом основных параметров зон ВОЗ, отвечающих исходной сейсмичности территории строительства, и данных записей местных землетрясений, обеспечивается, на уровне требований нормативных документов, получение необходимого набора параметров сейсмических воздействий для проектирования сейсмостойких линейных сооружений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ Мо_г_а №11-05-92201.

Список литературы

1. Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1:2 500 000. Лист 11 / ред. А. Ю. Рогатюк ; МГУ им. Ломоносова, 1996.
2. *Джурик В.И.* Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны / В. И. Джурик, А. Ф. Дреннов, А. Д. Басов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. – 272 с.
3. *Джурик В. И.* Методика районирования сейсмической опасности линейных сооружений по сейсмогрунтовым моделям / В. И. Джурик [и др.] // Криосфера земли. – 2008. – Т. XII, № 4. – С. 66–76.
4. Карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. – М. : М-во науки и технологий РФ, 1999. – 57 с.
5. МДС 22-1.2004. Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений. – 48 с.
6. *Николаев В. В.* Сейсмогеология зоны Ханейского рифтогенного разлома / В. В. Николаев // Сейсмоструктура и сейсмичность района строительства БАМ. – Новосибирск : Наука, 1980. – С. 95–101.
7. *Джурик В. И.* Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / В. И. Джурик [и др.]. – М. : Наука, 1988. – 224 с.
8. *Ратникова Л. И.* Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах / Л. И. Ратникова. – М. : Наука, 1973. – 124 с.
9. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. – М. : Госстрой СССР, 1985. – 73 с.
10. *Хилько С. Д.* Новейшая структура и сейсмоструктура Токкинской впадины / С. Д. Хилько, В. В. Николаев // Сейсмоструктура, глубинное строение и сейсмичность северо-востока Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск : Наука, 1975. – С. 14–23.
11. *Козьмин Б. М.* Южно-Якутское землетрясение 20 апреля 1989 года / Б. М. Козьмин, С. И. Голенецкий, В. В. Николаев. – Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 1992. – 45 с.
12. *Nakamura Y.* A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface / Y. Nakamura // Quarterly report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – V. 30, N 1. – P. 25–33.

Earthquake engineering safety of laying in seismoactive areas of south Yakutia with regard to permafrost degradation

V. I. Dzhurik, S. P. Serebrennikov, A. Yu. Eskin, L. A. Usynin,
E. V. Bryzhak, A. N. Shagun

Annotation. This paper substantiates the engineering-seismological conditions of laying in southern Yakutia and proposes approaches to the assessment of predicted effects of large earthquakes on foundations with regard to permafrost degradation. It is done using the initial results obtained through a complex of instrumental methods for seismic zoning (seismic impedance, microseisms and local earthquake records) to make theoretical calculations required.

Key words: maximal accelerations, resonance frequency, seismic hazard, earthquakes, accelerogram, microtremor method, frequency characteristics.

Джурик Василий Иванович
доктор геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-75-10

Усынин Леонид Андреевич
младший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-58-60

Серебренников Сергей Петрович
кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-58-60

Брыжак Евгений Вадимович
аспирант
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-58-60

Ескин Александр Юрьевич
кандидат геолого-минералогических наук
главный специалист
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-58-60

Шагун Артем Николаевич
младший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-58-60