

УДК 550.34

КОМПЛЕКСНАЯ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА ТОННЕЛЯ В УМЕРЕННОЙ СЕЙСМОКЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ СИБИРИ**Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю.***Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: dzhurik@crust.irk.ru*

В статье обобщаются результаты инженерно-сейсмологического обоснования условий строительства тоннеля, расположенного в начальной части БАМ в пределах Сибирской платформы. Сейсмичность территории обусловлена слабыми «транзитными» землетрясениями, но их проявление связано здесь с наличием островной мерзлоты и возможностью провоцирования опасных для сооружения оползней и обвалов. Сами исследования направлены на совершенствование методики расчетов характеристик и параметров сейсмических воздействий, необходимых в настоящее время для проектирования и строительства сейсмостойкого сооружения. Выполненные ранее исследования обобщены на уровне оценки сейсмической опасности линейного сооружения в баллах. Представлена методика и результаты расчетов с учетом состояния грунтов на поверхности и на глубине заложения тоннеля согласно сейсмической шкале MSK-64. В таком же направлении для получения новых данных по спектральным характеристикам грунтов (акселерограммы, спектры ускорений и частотные характеристики) и их параметров (максимальные ускорения, преобладающие периоды, резонансные частоты) служили данные комплекса расчетных и геофизических методов и данные бурения скважин. Полученные на их основе результаты, необходимые для выбора исходного сигнала, формирования необходимого количества сейсмогрунтовых моделей и проведения дальнейших расчетов, представлены в виде изменения основных параметров сейсмических воздействий по оси тоннеля также для его поверхности и основания.

Ключевые слова: тоннель, сейсмическая опасность, баллы, акселерограммы, спектральные характеристики

COMPREHENSIVE ENGINEERING-SEISMOLOGICAL ASSESSMENT OF THE CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF A TUNNEL IN THE TEMPERATE SEISMOCLIMATIC ZONE OF SIBERIA**Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Serebrennikov S.P., Eskin A.Yu.***Institute of the Earth's crust Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk,**e-mail: dzhurik@crust.ru*

The article summarizes the results of engineering-seismological substantiation of the conditions for the construction of the tunnel located in the initial part of the BAM within the Siberian platform. Seismicity of the territory is specified by weak transit earthquakes, but their expression is associated here with the presence of island permafrost and the possibility of provoking dangerous for the construction landslides. The research is aimed at improving the methods of calculation of the characteristics and parameters of seismic effects, which are currently required for the design and construction of a earthquake-resistant structure. Previously performed studies are summarized at the level of seismic hazard assessment of a linear structure in intensity degrees. The method and results of calculations taking into account the state of soils on the surface and at the depth of the tunnel according to the seismic scale MSK-64 are presented. In the same direction to obtain new data on the spectral characteristics of soils (accelerograms, acceleration spectra and frequency characteristics) and their parameters (maximum accelerations, dominant periods, resonance frequencies) the data of the complex of computational and geophysical methods and drilling data were used. The results obtained on their basis, necessary for the selection of the initial signal, the formation of the required number of seismic models and further calculations, are presented in the form of changes in the basic parameters of seismic effects along the axis of the tunnel also for its surface and base.

Keywords: tunnel, seismic hazard, intensity degrees, accelerograms, spectral characteristics

Представляется методика инженерно-сейсмологической оценки условий строительства Коршуновского тоннеля, расположенного на Байкало-Амурской магистрали, на участке Тайшет – Лена. Исследования связаны с комплексным развитием Байкало-Амурской магистрали, вопрос о котором был поднят в ОАО «РЖД» ещё в 2005 г. Уже в следующем году институтом была разработана «Стратегическая программа развития Байкало-Амурской магистрали до 2020 года». Основное внимание уделялось увеличению пропускной способности Северного широтного хода от станции

Тайшет до Советской Гавани. В частности, предусматривается возможность прокладки второго пути и реконструкция существующих тоннелей. В свою очередь, это требует уточнения их сейсмической опасности и совершенствования методов ее оценки в связи с требованиями новых нормативных документов [1].

Площадка строительства входит в зону умеренного климатического пояса России и в область резко континентального климата. Среднегодовая температура $-3,8^{\circ}\text{C}$, встречаются редкие острова и линзы мерзлых грунтов, их мощность может достигать

20 м, а температура не опускается ниже минус одного градуса. Льдистые включения прослеживаются по трещинам до глубины 40 м. При строительстве объекта предусмотрено оттаивание мерзлых грунтов в его основании (II принцип строительства [2]), которому и соответствует выполняемое обоснование его сейсмической опасности.

В сейсмогеологическом направлении тоннель так же характеризуется относительно умеренной сейсмичностью, находится на южной окраине Сибирской платформы и его сейсмическая опасность обусловлена характером распространения «транзитных» сейсмических колебаний из высокосейсмической Байкало-Становой зоны: Восточно-Саянская зона ВОЗ с принятой магнитудой землетрясений – 8. Сейсмические эффекты от местных очагов землетрясений, так и транзитные сотрясения, могут достигать, как минимум 5 баллов для средних грунтовых условий. Это согласуется со старыми и новыми нормативными документами [1], согласно которым сейсмичность площадки по карте «С», с учетом отнесения участка строительства к объектам повышенной ответственности, при расчетах, принята равной 6 баллам. Поэтому вполне обоснованно, для решения поставленной задачи, использовались имеющиеся данные по сейсмичности района и полученные нами ранее исследования по инженерно-сейсмологическому обоснованию условий строительства тоннелей БАМ [3].

Цель исследования: обоснование методики комплексной оценки условий строительства тоннелей в умеренных сейсмоклиматических зонах Сибири, при использовании новых возможностей оценки параметров сейсмических воздействий на случай прогнозируемых сильных землетрясений.

Материалы и методы исследования

В методическом отношении, для оценки изменения сейсмической опасности в баллах и прогноза динамических параметров сильных землетрясений на поверхности и на глубине заложения тоннеля необходимы сведения о количественной оценке параметров движений грунта на случай сильных землетрясений (они отмечены во введении).

Если методика расчетов сейсмических воздействий прогнозируемых сильных землетрясений на поверхности и оценка связей грунтовых условий и колебаний грунта при землетрясениях в какой-то степени разработаны [4], то на глубине заложения тоннеля она требует дальнейшего развития [5]. Основной причиной различия в проявлениях сейсмичности на поверхности и в основании подземного сооружения является отражение продольных и поперечных волн на дневной поверхности, интерференционные явления, уменьшение трещиноватости горных пород и снижение интенсивности колебаний поверхностных волн

с глубиной. Способ расчета основан на полученных экспериментальных данных о затухании амплитуд колебаний с глубиной [3]. Он определяется влиянием двух факторов: грунтовыми условиями основания сооружения и глубиной его заложения от поверхности в баллах, согласно экспериментальным выражениям

$$\Delta I(h) = 1,1 - e^{-0,016(h-30)},$$

где h – глубина заложения тоннеля в метрах.

$$\sum \Delta I = \Delta I(\rho I) - \Delta I(h),$$

где $\Delta I(\rho I)$ – приращения сейсмической опасности за счет изменения сейсмической жесткости грунтов в основании тоннеля.

В общем, зависимость показывает, что при глубине заложения основания тоннеля, равной 80 м от поверхности, его сейсмическая опасность уменьшается на более чем 0,6 баллов, а при глубине заложения более 100 м достигает 1 балла. При дальнейшем увеличении глубины выработки сейсмическая опасность остается постоянной.

В свою очередь для расчетов по приведенным формулам приращений балльности и получения сейсмических характеристик и их параметров прогнозируемых сильных землетрясений необходимо: изучение скоростной неоднородности грунтов верхней зоны разреза до коренных «эталонных» грунтов, задание исходного сигнала (соответствующего исходной сейсмичности района), построение необходимого числа сейсмогрунтовых моделей и проведение теоретических расчетов. В плане получения указанной выше информации реализованы экспериментальные измерения (сейсморазведочные, электроразведочные и ультразвуковые) и проведены теоретические расчеты.

Сейсморазведочные измерения выполнялись методом преломленных волн (МПВ) 24-канальной компьютеризированной цифровой станцией. При электроразведочных измерениях использовался метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с разносами питающей линии АВ до 500 м [6]. В лабораторных условиях определены скорости распространения волн ультразвука по образцам грунтов монолитов методом просвечивания. Образцы отбирались из скважин и обнажений на припортовых участках, исследовано около 100 образцов. При отборе учитывалась представительность по составу, характерные свойства и требуемые для измерения размеры образцов.

Исходный сигнал для реализации теоретических расчетов определяется на основе количественных геолого-геофизических и сейсмологических данных, расчетная модель – на основе инженерно-геологических данных, прямых измерений и обобщенных данных о скоростях сейсмических волн на площадке строительства по методике, изложенной в работах [7, 8]. Учитывая умеренную сейсмичность территории, исходный сигнал масштабировался на величину, соответствующую исходной сейсмичности для эталонных грунтов (5 баллов, для грунтов I категории).

Сами расчеты проводились по методам, основанным на предложенной рекуррентной матричной формуле, связывающей смещения и напряжения на произвольных границах упругих слоев в случае идеально упругой среды. Эти методы обобщены для оценки смещения на свободной поверхности и во внутренних точках слоистой среды [8]. Они позволяют оцени-

вать преобладающие периоды колебаний нескольких слоев рыхлых грунтов, их спектральный состав и интенсивность колебаний в виде акселерограмм и преобладающих частот сейсмических колебаний при возможных сильных землетрясениях.

Более конкретно выбранная методика с некоторыми дополнениями анализируется при обсуждении результатов выполненных работ, связанных с оценкой изменения динамических параметров сильных землетрясений с глубиной заложения тоннеля.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполненный комплекс геофизических измерений необходим для формирования расчетных сейсмогрунтовых моделей. По данным электроразведки по разрезу тоннеля выделяются низкоомные зоны на уровне его заложения и на припортальных участках, а относительно высокоомные – в центральной части разреза. Различия в УЭС выделенных зон на глубине заложения тоннеля незначительны, и они лежат в пределах от 10–20 до 100 Ом*м (это характерно и для скоростей сейсмических волн). Дальнейшее уточнение разреза в направлении выделения низкоомных зон (трещиноватых пористых пород) требует сгущения сети и увеличения глубинности геофизических измерений. В целом, оценивая полученные данные, можно сказать, что в теле тоннеля, особенно в выделенных выше зонах, сцепление грунтов ослаблено. То есть на этих участках породы более водонасыщенны и трещиноваты, что, вероятно, может быть связано и с повышенной фильтрацией в этих зонах.

Обобщенная интерпретация сейсморазведочных данных, выполненных отдельными зондированиями на поверхности и на глубине заложения тоннеля на припортальных участках, позволила получить распределение значений скоростей продольных волн на глубину заложения тоннеля. Они показывают, что скорости сейсмических волн меняются от 600–700 (припортальные участки) до 3000–3200 м/с (центральный участок). Результаты измерения средних скоростей в верхней части коренных пород (до 10 м), необходимые для выбора их эталонных значений, показывают, что в зависимости от состояния они имеют значительные интервалы изменения. Наиболее вероятные значения V_p приходятся на 2200–2400 м/с и V_s на 1100–1300 м/с. В лабораторных условиях, диапазон изменения скоростей ультразвука от 1600 до 4160 м/с, наиболее вероятные значения, на уровне 0,7 от максимума их распределений, приходятся на диапазон от 2400 до 3200 м/с. Средние значения в образцах меняются от 1800 до 3860 м/с, а наиболее вероятные приходятся

на значения 2600 и 3500 м/с. Грунты с такими значениями скоростей имеют сейсмическую опасность на один балл меньше исходной и оцениваются для участка строительства тоннеля в 5 баллов.

По сравнению со значениями скоростей в массиве полученные величины V_p по образцам или сравнимы, или превышают их. Причина такого расхождения ясна. Относительно заниженные значения скоростей объясняются их малой влажностью, повышенной пористостью и, как следствие, малой объемной массой. Поэтому по своим значениям они близки к скоростям в массиве.

Представленные данные геофизических измерений и инженерно-геологические сведения позволили сформировать пять расчетных сейсмических моделей (таблица). Для построения моделей использовалась установленная закономерность изменения скоростей сейсмических волн с глубиной и непосредственные их измерения на поверхности и в основании тоннеля на участках припортальных выемок. Распределение скоростей обосновывается представленными моделями до глубины ниже заложения тоннеля не менее чем на 10 м. Сами модели служили основой для расчетов сейсмической опасности в баллах и для количественной оценки параметров движений грунта на случай сильного землетрясения.

Исходным сигналом, учитывая умеренную сейсмичность района и отсутствие сети региональных сейсмических станций, вполне обоснованно выбрана нормированная запись акселерограммы на 5-балльное воздействие (рис. 1, исх. сигнал). Сам исходный сигнал формировался по данным записей землетрясений, зарегистрированных постоянными сейсмическими станциями из наиболее опасных Саянской и Северобайкальской (южный фрагмент) зон ВОЗ [9]. Его параметры: максимальное ускорение 22 см/с^2 , ширина спектра на уровне 0,5 – от 2 до 7 Гц, максимум спектра приходится на частоту 3 Гц, а его уровень равен 4,53 см/с. По своим спектральным показателям он отвечает 5-балльному воздействию и может использоваться в качестве исходного «эталонного» сигнала для расчетов вероятных сейсмических воздействий на случай прогнозируемых сильных землетрясений, как для поверхности тоннеля, так и для его основания.

Выполненные по изложенной выше методике расчеты представлены на рис. 1 в виде акселерограмм (А), их спектров (Б) и частотных характеристик (В). В обобщенном виде распределение расчетных параметров сейсмических воздействий по оси тоннеля представлено на рис. 2 для по-

верхности и основания тоннеля, в том числе и в баллах. Представленные характеристики и параметры исходного сигнала важны для анализа относительной оценки сейсмической опасности основания тоннеля и дальнейшего совершенствования методики его задания, для умеренных в сейсмическом отношении территорий со сложными грунтовыми и мерзлотными условиями.

В итоге расчетные параметры сейсмических воздействий по оси тоннеля, представленного скоростной моделью (рис. 2, В), распределяются следующим образом: максимальные ускорения для поверхности тоннеля для максимальной горизонтальной компоненты меняются от 48 до 63 см/с², на глубине заложения тоннеля от 24 до 42 см/с² (рис. 1, А и рис. 2, А); максимальное значение спектра на поверхности составляет 10,6–14,1 см/с и на глубине тоннеля 4,41–8,88 см/с; интервалы частот, на которых спектр ускорений превышает уровень 0,7 от максимального значения, для поверхности 1,56–8,64 Гц и на глубине 0,73–8,5 Гц (рис. 1, Б); резонансная частота верхних слоев до границы воздействий

исходного сигнала равна 3,96–6,98 Гц, и на глубине тоннеля по осредненной частотной характеристике от 0 до 20 Гц резонансные максимумы не выделяются (рис. 1, В). В последнем случае выполненное осреднение связано с незначительным отклонением кривой от 1 (не более чем ± 0,5). Сами кривые (рис. 1, Б, «осн.») отвечают колебаниям относительно однородного полупространства, различия между ними могут быть скорректированы по значениям скоростей сейсмических волн, отнесенных к полупространству.

Приращения балльности относительно коренных пород для припортальных и центрального участка тоннеля за счет грунтовых условий меняются от 0,81 до 1,18 баллов. Эти величины приращений за счет угла наклона местности более 15° могут увеличиться на поверхности на один балл и достигать значений 6,81–7,18 баллов. Или уменьшиться за счет глубины его заложения до 4,2–5,4 баллов для основания центральной части тоннеля. Результаты таких расчетов в обобщенном виде показаны на рис. 2, Б.

Параметры расчетных сейсмических моделей для обобщенных типовых разрезов

№ модели Расстояние (м)	Грунтовые условия	h (м)	Vp (м/с)	Vs (м/с)	γ (т/м ³)
1		2	3	4	5
1 0–135 Западный портал	Рыхлые грунты Разрушенные коренные породы Сильнотрещиноватые породы Относительно-сохранные породы	5 16 24 ∞	610 1100 1800 2300	270 520 910 1210	1,8 2,0 2,2 2,4
2 135–284	Рыхлые грунты Рыхлые грунты Разрушенные коренные породы Сильнотрещиноватые породы Относительно-сохранные породы	6 14 15 30 ∞	540 800 1500 2260 2980	240 390 720 1200 1630	1,8 1,9 2,1 2,4 2,5
3 284–740 Центральная часть тоннеля	Рыхлые грунты Рыхлые грунты Разрушенные коренные породы Разрушенные и трещиноватые породы Сильнотрещиноватые породы Относительно-сохранные породы Коренные прочные породы	4 14 14 19 28 50 ∞	550 880 1310 1820 2380 2980 3200	250 410 630 910 1250 1630 1800	1,8 1,9 2,0 2,2 2,4 2,5 2,6
4 740–910	Рыхлые грунты Разрушенные коренные породы Сильнотрещиноватые породы Относительно-сохранные породы Коренные прочные породы	8 18 16 50 ∞	800 1430 2230 2980 3200	410 710 1220 1630 1800	1,9 2,0 2,4 2,5 2,6
5 910–980 Восточный портал	Рыхлые грунты Рыхлые грунты Сильнотрещиноватые породы Относительно-сохранные породы	3 16 11 ∞	540 710 2300 2980	240 340 1240 1630	1,8 1,9 2,4 2,5

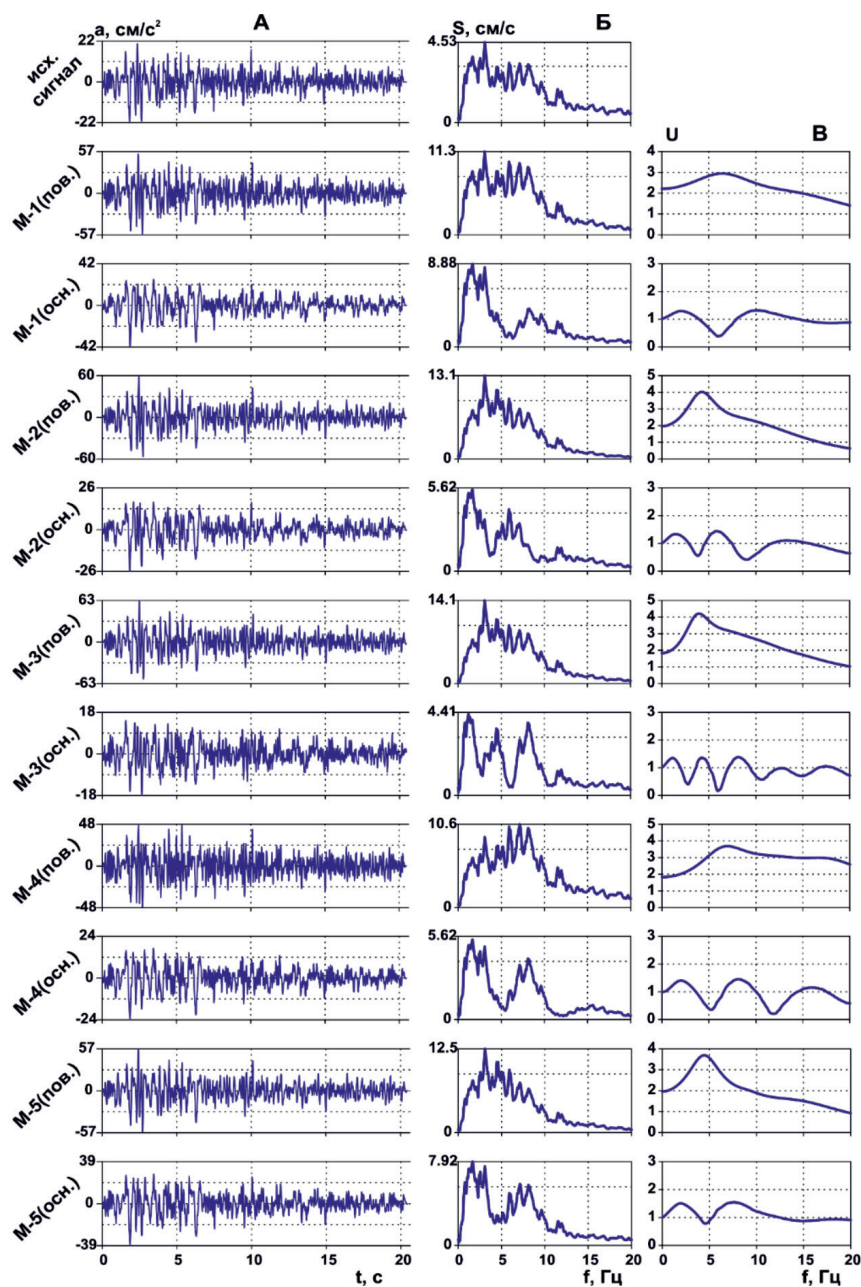


Рис. 1. Акселерограммы (А), их спектры (Б) и частотные характеристики (В) для исходного сигнала и сейсмических моделей 1–5, рассчитанные для поверхности и основания тоннеля

Сравнение расчетных значений максимальных амплитуд в cm/s^2 и сейсмической опасности в баллах показывает, что для основания тоннеля они хорошо согласуются (рис. 2). Различия для поверхности тоннеля связаны с учетом поправки приращений балльности за счет угла наклона дневной поверхности. Например, для центральной части тоннеля для его основания и поверхности они составляют 4,2 и 6,1 баллов соответственно, а в ускорениях колебаний 18 и 63 cm/s^2 . То есть сейс-

мическая опасность меняется на 2 балла, а ускорение сейсмических колебаний увеличивается в 3,4 раза, что несколько не соответствует их установленным соотношением, согласно которым при увеличении интенсивности колебаний на 1 балл ускорение колебаний грунтов увеличивается в 2 раза [3]. Для припортальных участков различие в оценках сейсмических воздействий основания и поверхности тоннеля снижаются как в баллах, так и в ускорениях колебаний (рис. 2).

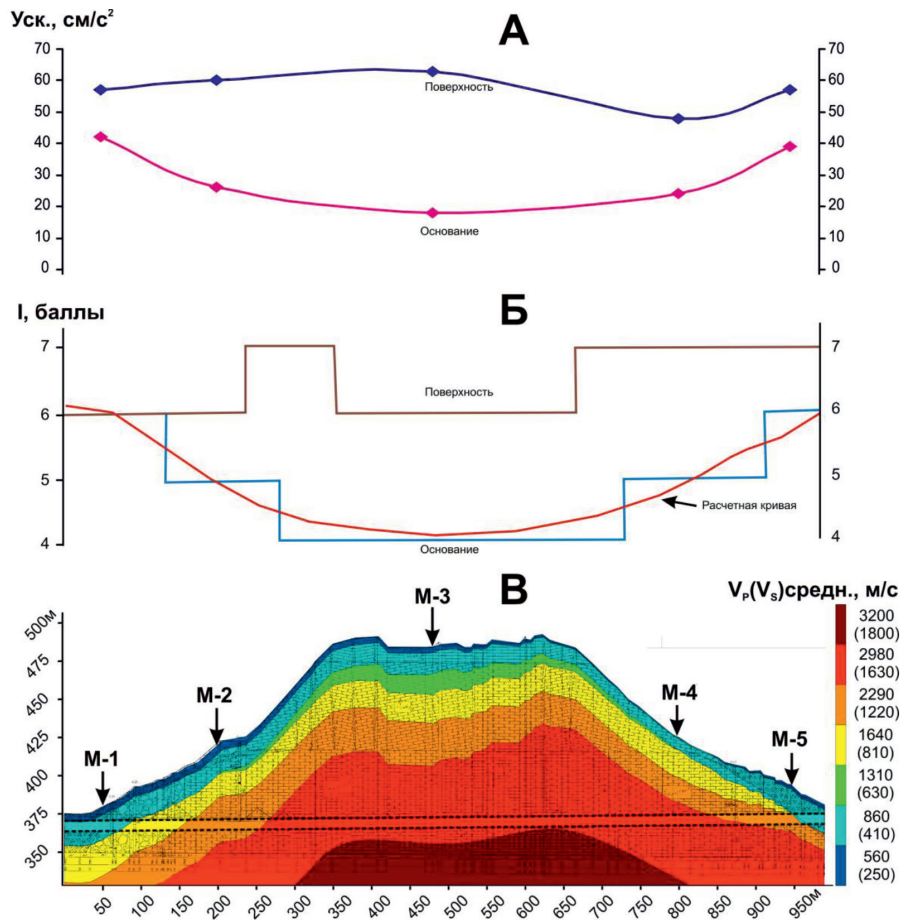


Рис. 2. Распределение расчетных параметров сейсмических воздействий по оси тоннеля. А – максимальных ускорений для поверхности и основания тоннеля; Б – то же для сейсмической опасности в баллах; В – модель скоростного разреза по оси тоннеля; М-1–М-5 – пункты формирования расчетных моделей

Отмечается, что выявленные нами проявления прогнозных воздействий могут спровоцировать оползни на участках неустойчивых положений грунтовых масс, что характерно для исследуемого тоннеля, подвижки которых могут происходить при умеренных землетрясениях или даже при техногенном воздействии.

Заклучение

Проведенные выше исследования можно считать обобщением возможных подходов к методике обоснования инженерно-сейсмологических условий строительства тоннеля, расположенного в умеренных сейсмоклиматических зонах в пределах Сибирской платформы. Они направлены на более рациональное использование комплекса экспериментальных и расчетных методов для оценки параметров сейсмических воз-

действий прогнозируемого относительно сильного землетрясения на основание тоннеля и на его поверхность.

При достаточном статистическом наборе регистрируемых инструментальными методами сейсмического микрорайонирования характеристик и обоснованного выбора исходного сигнала (с учетом исходной сейсмичности района и зон ВОЗ) обеспечивается, на уровне требований нормативных документов, получение необходимого набора параметров сейсмических воздействий (акселерограмм, спектров ускорений и частотных характеристик) для проектирования сейсмостойкого сооружения.

Проведенные расчеты сейсмических воздействий справедливы для массивов горных пород с ненарушенной структурой, что характерно для основания исследуемого тоннеля. В разломных сейсмоактивных

зонах, где возможны остаточные деформации при землетрясениях, расчеты для таких участков теряют свой инженерно-сейсмологический смысл.

Список литературы

1. ОСП-2015. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Изменение N1 СП 14.13330.2014. «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011).
2. СП 25. 13330. 2012 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1, 2, 3) от 24 января 2019 г.
3. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 224 с.
4. Trifunac M. Site conditions and earthquake ground motion – A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2016. Vol. 90. P. 88–100. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.08.003.
5. Малеев Д.Ю., Шабалин В.А. Оценка сейсмической опасности тоннелей с помощью высокочастотных микросейсм // *Горный информационный бюллетень* (научно-технический журнал). 2009. Т. 4. С. 117–121.
6. Хмелевской В.К., Шевнина В.А. Вертикальное электрическое зондирование: учеб. пособие. М.: МГУ, 2013. 28 с.
7. Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю. Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // *Вулканология и сейсмология*. 2015. № 5. С. 57–67.
8. Ратникова Л.И. Расчет колебаний на свободной поверхности во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта // *Сейсмическое микрорайонирование*. М.: Наука, 1984. С. 116-121.
9. Dzhurik V.I., Drennov A.F., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V. A study of the relationships between the characteristic acceleration frequencies and earthquake magnitude: the Baikal rift zone. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 67–74. DOI: 10.1134/S0742046318010037.