

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 574; 500.3; 55.34

МЕТОДИКА РАЙОНИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ  
ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО СЕЙСМОГРУНТОВЫМ МОДЕЛЯМ

**В.И. Джурик, С.П. Серебrenников, А.Ф. Дреннов, Л.А. Усынин**

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
dzhurik@crust.irk.ru*

Реализован подход, основанный на районировании основания линейных сооружений с использованием сейсмогрунтовых моделей, для которых с помощью экспериментальных и расчетных данных выполнена оценка набора параметров сейсмических воздействий, необходимых для проектирования сейсмостойкого сооружения. Подход позволяет экономично и с большей степенью надежности районировать протяженные трассы линейных сооружений по вероятным максимальным сейсмическим воздействиям.

*Сейсмогрунтовые модели, мерзлые грунты, сейсмические воздействия, ускорения землетрясения, температура*

METHODS OF CLASSIFICATION OF PARAMETERS OF SEISMIC HAZARD  
OF LINEAR STRUCTURES BY SEISMIC GROUND MODELS

**V.I. Dzhurik, S.P. Serebrennikov, A.F. Drennov, L.A. Usynin**

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontov str., 128, Russia,  
dzhurik@crust.irk.ru*

The approach under consideration is based on the classification of linear structures according to seismic ground models. A set of parameters of seismic effects required for earthquake proof structural engineering has been estimated with the help of experimental and calculated data. Such approach is the most efficient for seismically active areas of the East Siberia. The extended linear constructions can be zoned by the probable maximal seismic loads with a greater degree of reliability.

*Seismic ground models, frozen ground, seismic effects, accelerations, earthquakes, temperature*

ВВЕДЕНИЕ

Развитие Восточной Сибири связано со строительством линейных сооружений, железных дорог и трубопроводов. Известно, что районирование сейсмической опасности протяженных линейных сооружений требует не только комплексного подхода к их оценке, но и соблюдения кондиции карт параметров, определяемых экспериментальными методами инженерной сейсмологии [Оценка..., 1988; Методические..., 2005]. Такие исследования оправданы на стадии выбора трассы линейного сооружения, когда для оценки сейсмической опасности наряду с результатами анализов по ключевым участкам могут использоваться и данные геологической съемки. Методика расчета сейсмической опасности в баллах в настоящее время достаточно разработана [СНиП II-7-81\*, 2001; Комплект карт..., 1999; Методические..., 2005] и может оцениваться по целому ряду независимых прямых и

косвенных методов. При наличии топоосновы по разрезу трассы, инженерно-геологических, мерзлотных и гидрогеологических данных (в масштабе строительства) такая оценка не вызывает затруднений. Погрешность измеряемых параметров геофизическими методами мала, а погрешность самих инструментальных методов сейсмического микро-районирования в лучшем случае может составлять  $\pm 0,3$  балла. Это говорит о возможности использования обобщенных или наиболее вероятных характеристик для преобладающих разновидностей грунтов в основании сооружения с учетом их состава и состояния. Такие сведения могут быть получены или при непосредственных измерениях в районе трассы, или при исследованиях, проведенных на ответственных и ключевых участках (переходы через русла рек, пересечения зон разломов, площадки вспомогательных сооружений).

Это позволяет детально оценивать локальные инженерно-сейсмологические условия трассы, является одним из важнейших элементов микрорайонирования, обеспечивающих повышение безопасности особо ответственного сооружения – нефтепровода и требует разработки новых подходов к районированию сейсмической опасности трассы как объекта повышенной опасности [*Комплект карт...*, 1999].

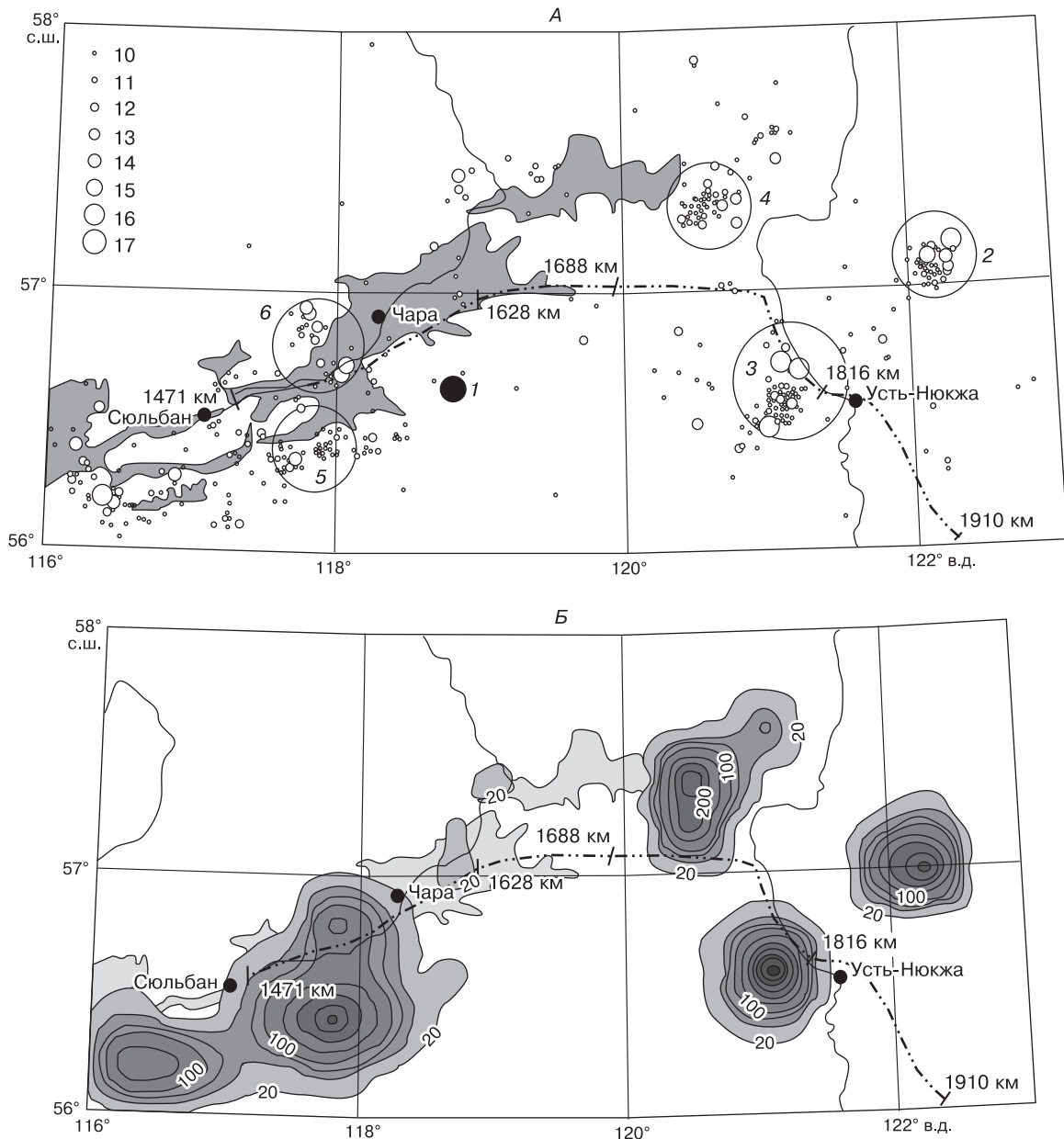
По одному из вариантов трассы нефтепровода Восточная Сибирь–Тихий океан, который расположен в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) и проходит практически вдоль трассы БАМ (около оз. Байкал, пересекает Северо-Байкальский, Северо-Муйский и Кодарский хребты), проведены инженерные изыскания. Выбранный вариант трассы характеризуется высокой сейсмической активностью и входит в зону развития сплошной или слабопрерывистой вечной мерзлоты [*Геокриологические...*, 1966].

Необходимо отметить, что уже на стадии завершения наших исследований в связи с высокой экологической опасностью и сейсмичностью (9–10 баллов) данный вариант трассы был отклонен и принят северный вариант, согласно которому трасса выходит на г. Алдан и далее к городам Тында и Сквородино. Тем не менее мы считаем, что методика исследований сейсмической опасности, реализованная для самого сложного участка нефтепровода (оз. Байкал, Северо-Байкальский, Северо-Муйский и Кодарский хребты), может быть полезна не только для обоснования условий строительства линейных сооружений в районе БАМа, но и для других сейсмоактивных территорий криолитозоны. Предлагаемая методика реализует подход, основанный на районировании трассы нефтепровода по мерзлотно-грунтовым моделям, для которых по экспериментальным и расчетным данным оценивается набор вероятных параметров сейсмических воздействий, необходимых для проектирования сейсмостойкого сооружения. Экспериментальные данные получены из непосредственных измерений на представительных или ключевых участках трассы. В расчетах использованы инженерно-геологические и мерзлотные данные и детальные сведения о сейсмотектонике и сейсмичности района.

**Сейсмотектонические, инженерно-геологические и мерзлотные данные.** Исследованный участок трассы трубопровода, расположенный между реками Сюльбан и Усть-Нюкжа (северо-восток БРЗ), имеет протяженность более 500 км. Для этой территории на основе анализа исходных геолого-геофизических и сейсмологических материалов выделены и обоснованы зоны вероятных очагов землетрясений (ВОЗ). Главная роль в формировании общего уровня сейсмичности в пределах исследуемой трассы и региона в целом отводится Стано-

вой зоне ВОЗ. Зона охватывает обширную территорию и включает серию эмбриональных впадин, межгорных перемычек и систему разломов в областях сочленения впадин и горных сооружений [*Геология...*, 1985б]. Высокий сейсмический потенциал зоны подтверждается наличием нескольких тысяч землетрясений, ежегодное число которых составляет 2000–2500. За период с 1964 по 1999 г. землетрясения с  $K \geq 10$  и интенсивностью около 5 баллов в эпицентре представлены на карте (рис. 1), на которой также показаны наиболее сильные из них, произошедшие ранее: 1) землетрясение 1725 г. (расчетная магнитуда  $M = 8$ , возможная интенсивность сотрясений  $J$  – до 11 баллов, площадь ощутимых колебаний около 4 млн км<sup>2</sup>); 2) Муйское, 1957 г. ( $M = 7,9, J = 11$  баллов, площадь сотрясений 2 млн км<sup>2</sup>); 3) 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. км<sup>2</sup>); 4) Тас-Юряхское, 1967 г. [*Сейсмическое...*, 1977] ( $M = 7, J = 9–10$  баллов, ощущалось на расстоянии более 1100 км от эпицентра, площадь ощутимых сотрясений 1,3 млн км<sup>2</sup>); 5) Южно-Якутское, 1989 г. [*Землетрясения...*, 1993] ( $M = 6,6, J = 8$  баллов, ощущалось на площади 1,2 млн км<sup>2</sup> и на расстоянии более 800 км от эпицентра). Макросейсмические последствия наиболее сильных сейсмических событий второй половины XX в. в пределах зоны проектируемого трубопровода таковы: 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 данных о последних землетрясениях указывает на современную высокую сейсмическую активность исследуемой территории.

Согласно сейсмическому районированию участок проектируемого трубопровода для трех степеней сейсмической опасности оценивается в 9, 9, 10 баллов (карты А, В, С) [*Комплект карт...*, 1999]. Нефтепровод может быть отнесен к особо ответственному сооружению. В этом случае для него исходную сейсмичность следует принимать по карте С (10 баллов). Для площадок сопутствующих или вспомогательных сооружений, в том числе жилых поселков, исходная сейсмичность может быть принята по карте А или В (9 баллов с различной вероятностью сейсмической интенсивности). Учитывая это, рекомендуемый подход реализован для исходной сейсмичности в 9 баллов, а ожидаемые максимальные сейсмические воздействия на основании нефтепровода оцениваются, в том числе и для исходной сейсмичности, в 10 баллов (с учетом отнесения его к особо ответственному сооружению).



**Рис. 1. Карты эпицентров (А) и плотности очагов (Б) землетрясений района проектируемого нефтепровода.**

10–17 – энергетический класс эпицентров землетрясений (по инструментальным данным); 1 – эпицентр землетрясения 1725 г.; 2 – район Южно-Якутского землетрясения; 3 – зона Тас-Юряхского и Олекминских землетрясений; 4 – зона Ханийских землетрясений; 5 – Удоканские землетрясения; 6 – серия Кодарских и Чарских землетрясений.

Исходные сейсмические воздействия интенсивностью 9–10 баллов обусловлены очагами землетрясений с магнитудой 7,5–8,0, удаленными на расстояние 70 км и более от трассы [Геология..., 1985а]. Основные параметры вероятных сильных землетрясений, соответствующие исходной сейсмичности, определены в следующих интервалах: эпицентральное расстояние меняется от 0–1 до

40–100 км, магнитуда – от 7,5 до 8,0, глубина очага – от 10 до 20 км, механизм очага – преимущественно взбросодвиг.

Для оценки сейсмической опасности грунтов в основании нефтепровода необходимы сведения о составе грунтов, их состоянии и распределении геофизических параметров с глубиной в верхней зоне разреза, а также данные о температуре, влаж-

ности (льдистости), объемном весе и пористости [Джурик и др., 2004б]. Территория трассы нефтепровода характеризуется сложными инженерно-геологическими и мерзлотными условиями, они достаточно изучены на стадии ее проектирования по данным бурения, фондовым материалам и геофизическим измерениям в объеме, необходимом для решения поставленных задач. Согласно этим данным, трасса расположена в районе сплошного распространения вечномерзлых грунтов, но сама мерзлая толща имеет различную мощность и температуру [Геология..., 1985а].

По левому борту трогово-тектонической долины р. Сюльбан и на перевале через хр. Кодар (начало трассы) мощность мерзлых грунтов изменяется от 50 до 300 м при температуре от  $-1$  до  $-4$  °С. Для Верхне-Чарской впадины также характерны значительная мощность мерзлой толщи (100–300 м и более) и низкая температура ( $-2$  °С и ниже). В Чарской впадине вечномерзлые грунты имеют мощность 5–10 м на участках таликовых зон и 100–200 м в области сочленения с хр. Удокан. Температура грунтов меняется в широких пределах – от 0 до  $-4$  °С. На перевале через хр. Удокан мерзлые породы имеют мощность более 600 м и температуру менее  $-4$  °С. В конце трассы по долинам рек Хани, Олекма и Нюкжа мощность мерзлой толщи изменяется от 10–50 до 100 м и более, температура грунтов колеблется от 0 до  $-2,5$  °С. Сквозные талики в этих районах приурочены к руслам больших рек и зонам тектонических нарушений, по которым фильтруются подземные воды.

Криогенная текстура многолетнемерзлых грунтов преимущественно массивная, в галечно-гравийных грунтах корковая, в песчаных и супесчаных грунтах распространена слоистая и линзовидная текстура. Часто встречаются погребенные подземные льды с включениями песка и супесей (до 12 м и более). Широкое распространение имеют клиновидные жильные льды. Трасса нефтепровода во многих местах пересекает участки с большим насыщением подземных льдов различного генезиса.

Относительная осадка мерзлых грунтов, включая включения линз льда, меняется с поверхности (торф) от 0,75 до 0,04 (галечниковый грунт с валунами), а для преобладающих в верхнем 10-метровом слое песчаных грунтов диапазон ее изменения – от 0,03 до 0,33. Величина относительной осадки грунтов характеризует степень их лдистости и учитывается при расчетах сейсмической опасности [Оценка..., 1988].

Плотность и коэффициент пористости грунтов распределяются следующим образом: песчаные грунты –  $1,54$ – $1,84$  г/см<sup>3</sup> и  $0,97$ – $1,58$ , гравийно-галечные –  $1,94$ – $2,03$  г/см<sup>3</sup> и  $0,52$ – $0,82$ . Модуль деформации первых находится в пределах 20–30 МПа, вторых – 30–40 МПа.

**Расчет параметров районирования сейсмической опасности основания нефтепровода по сейсмогрунтовым моделям.** Комплект карт сейсмического районирования [Комплект карт..., 1999] не учитывает грунтовых, мерзлотных, гидрогеологических и топографических условий строительства нефтепровода. Однако известно [Джурик и др., 2004б], что эти условия в значительной мере могут влиять на локальные изменения сейсмических воздействий, на основания сооружений и сводятся к трем главным особенностям, связанным с прохождением сейсмических волн [Оценка..., 1988]: топографический эффект, который обычно усиливает амплитуду колебаний вблизи вершины (или уменьшает в основаниях глубоких каньонов); геологический или геомеханический эффект, вызванный контрастом импеданса между коренной породой и осадочным чехлом; геометрический эффект, который связан с наклоном границы между осадочным чехлом и коренной породой. Ниже приводятся возможности количественной оценки степени влияния указанных факторов на сейсмическую опасность основания линейных сооружений.

Для реализации экспериментальных и расчетных методов сейсмического микрорайонирования, кроме приведенных выше данных, необходимы сведения о скоростях распространения сейсмических волн в горных породах района и параметрах колебаний грунтовых слоев, служащих основанием нефтепровода [Рекомендации..., 1985]. На исследуемой территории для статистической оценки скоростных характеристик грунтов различного состояния выполнено более 300 сейсмозондирований. Кроме того, использовался ранее полученный нами большой фактический материал по данным сейсмозондировки и результатам записей землетрясений при обосновании инженерно-сейсмологических условий строительства в районах БАМа [Геология..., 1985а; Джурик и др., 2000]. Значения скоростей продольных и поперечных волн даны в табл. 1, а особенности поведения при землетрясениях слоев рыхлых отложений с различной температурой представлены в виде средних частотных характеристик (рис. 2) [Дреннов, Джурик, 2005].

Минимальные значения скоростей соответствуют рыхлым воздушно-сухим грунтам, максимальные – мерзлым коренным породам. Последние служили эталоном при расчетах сейсмических воздействий. Следует отметить, что коренные породы, выбранные за эталон, имеют сейсмическую опасность на 1 балл меньше исходной и оцениваются для исследуемого участка трассы нефтепровода в 8 баллов (карта В) и 9 баллов (карта С) [Рекомендации..., 1985].

Средние частотные характеристики (отношения спектров исследуемого грунта к эталонному) для песчаных и гравийно-галечных грунтов представлены в зависимости от температуры



Таблица 1. Обобщенные значения скоростей распространения продольных ( $v_p$ , м/с) и поперечных ( $v_s$ , м/с) волн в преобладающих разновидностях грунтов в районе трассы

Тип грунта	Состояние грунтов					
	Талые воздушно-сухие		Талые водонасыщенные		Мерзлые льдонасыщенные ( $t < -1$ °C)	
	$v_p$	$v_s$	$v_p$	$v_s$	$v_p$	$v_s$
Пески различной крупности	500–700	200–340	1500–1800	340–580	3000–3600	1650–2100
Галечниковый и глыбовый грунт	600–1100	280–510	1700–2100	470–700	3200–3900	1770–2200
Трециноватые коренные породы	2100–2800	1000–1600	2500–3200	1200–1800	3000–4400	1700–2400

(см. рис. 2, а, б). Их уровни могут меняться от 1 (при температуре около  $-4$  °C) до 2,8 (при температуре близкой к нулю). Они получены при записях большого количества землетрясений с эпицентральным расстоянием 40–240 км и энергетическим классом 9–10 и говорят об отсутствии явно выраженных частотно-избирательных свойств мерзлых грунтов. Диапазон изменения приращений балльности, рассчитанный по максимуму кривых, чрезвычайно широк и меняется от 0 до 1,5 балла.

Основные необходимые для оценки сейсмической опасности характеристики колебаний грунтов при землетрясениях, такие как акселерограммы, спектры ускорений, частотные характеристики верхних слоев, максимальные ускорения и преобладающие частоты, были получены с использовани-

ем расчетных методов. Основы методики расчетов и рекомендации по их применению для проектирования в строительстве изложены в научных изданиях, методических руководствах и нормативных документах [Расчетные..., 1988; РБ-006-98, 1998; Джурик и др., 2000; Методические..., 2005].

Расчетные методы различаются по способам решения поставленных задач, по точности и типам моделей. Нами использован матричный метод расчета многослойных сред с горизонтальными границами раздела [Расчетные..., 1988]. Для расчетов акселерограмм, частотных характеристик и спектров ускорений использовался набор методов, описанных в [Сейсмический..., 1981], и программы из работы [Ратникова, 1984]. Для их реализации необходимо задание исходного сигнала и расчетной модели. Выше указаны пределы, в которых могут меняться параметры сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ. Из этих данных следует, что каждая из рассмотренных характеристик имеет свои интервалы изменения, поэтому возникают определенные трудности при синтезе исходных акселерограмм.

Особенности задания исходных сигналов заключаются в протяженности трассы (500 км) и в том, что практически на всем ее протяжении сейсмические воздействия, соответствующие исходной сейсмичности, могут создавать землетрясения из зон ВОЗ, расположенных на расстоянии от 0 до 100 км и более от нефтепровода. Об этом свидетельствуют и данные о параметрах зон разломов в пределах трассы БАМ [Геология..., 1985б].

Для обоснования синтеза исходных акселерограмм представлена карта плотности очагов землетрясений (см. рис. 1, Б). Она характеризует распределение числа эпицентров землетрясений на расстоянии не менее 100 км от трассы нефтепровода и наглядно показывает расположение зон ВОЗ по отношению к трассе. Участки Сюльбан–Чара, Хани и Усть-Нюкжа имеют наибольшую плотность эпицентров и расположены вблизи трассы. От остальных зон ВОЗ (см. рис. 1, Б) основание нефтепровода будет подвергаться влиянию “транзитных землетрясений”. Согласно общепринятым подходам с

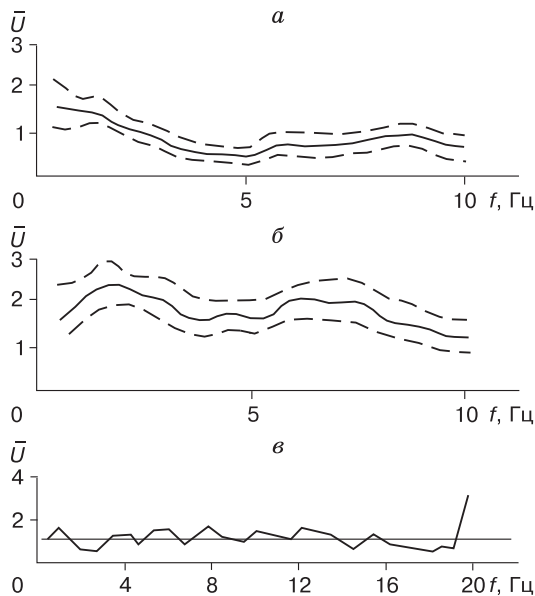


Рис. 2. Средние частотные характеристики мерзлых грунтов ( $\bar{U}$ ), рассчитанные по записям слабых землетрясений:

а – мерзлые песчаные и гравийно-галечные грунты,  $h = 20$  м,  $T = -3$  °C; б – мерзлые песчаные и гравийно-галечные грунты,  $h = 30$  м,  $T = -1$  °C; в – мерзлые эталонные коренные породы,  $T = -3,5$  °C;  $f$  – частота колебаний грунта.

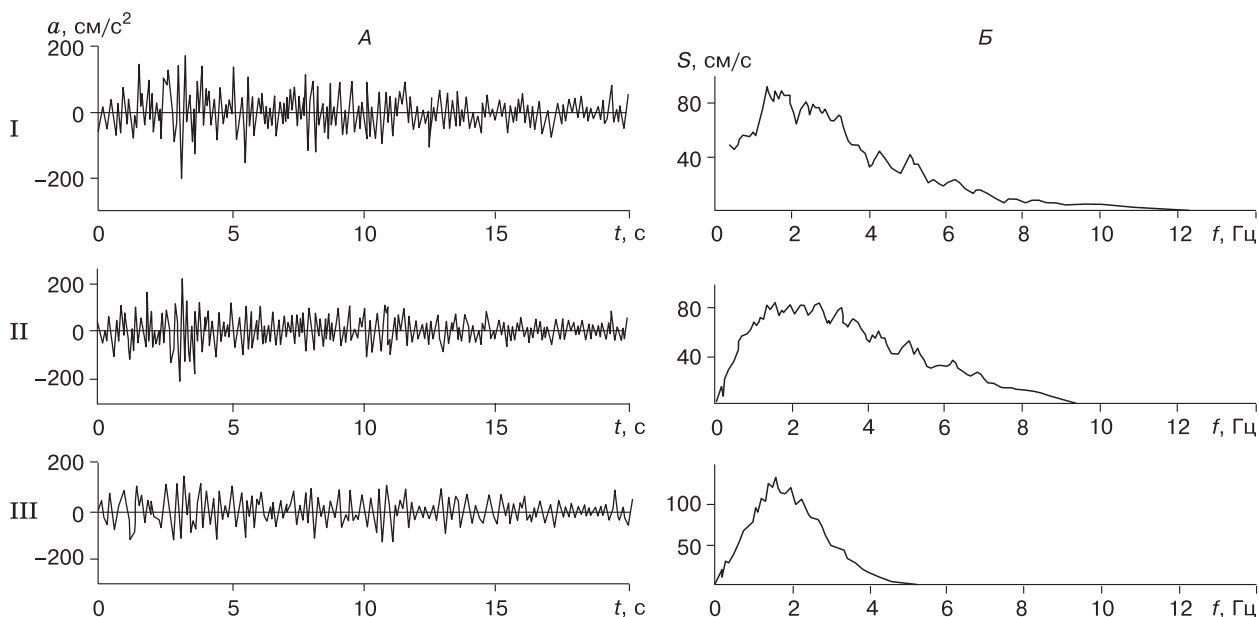
учетом спада бальности с расстоянием, первые возможны до 70 км от трассы, вторые – на расстоянии более 70 км. Это соответствует случаю выбора исходной сейсмичности по карте С [Комплект карт..., 1999; СНиП II-7-81\*, 2001].

На основе отмеченных выше подходов и с учетом ограничений по эпицентральному расстоянию ( $\Delta$ , км) по методике, изложенной в работах [Джурик и др., 2000, 2004а], были сформированы три варианта исходных акселерограмм (рис. 3). Различия в задании трех вариантов сигналов связаны с использованием для статистического анализа записей землетрясений, отвечающих параметрам зон ВОЗ, установленным для трассы нефтепровода, а также данных каталога мировой сети, записей местных землетрясений или совместно тех и других данных [Джурик и др., 2004а].

Вначале рассчитывался средний амплитудный спектр по всей совокупности имеющихся в нашем распоряжении данных каталога сильных землетрясений мировой сети, отвечающих основным параметрам зон ВОЗ на исследуемой территории. Фазовый спектр находился по данным записей местных землетрясений с помощью прямого преобразования Фурье. Следующим этапом является фурье-синтез полученного среднего амплитудного спектра сильных землетрясений с фазовым спектром местного землетрясения [Джурик и др., 2000].

При таком подходе синтезированы три варианта акселерограмм с учетом данных каталога сильных землетрясений мировой сети (см. рис. 3, I), параметров сильных землетрясений мировой сети и местных землетрясений (см. рис. 3, II) и параметров сильных землетрясений мировой сети и местных землетрясений (см. рис. 3, III).

Исходные сигналы нормированы по значениям максимальных амплитуд для эталонных твердомерзлых грунтов участка нефтепровода 1471–1910 км на случай 9-балльных землетрясений. Поэтому их различия по ускорениям незначительны, а по максимуму спектров и по его спаду с ростом частоты различия более существенны. Основные максимумы для трех спектров приходятся на одни и те же частоты в интервале 1–3 Гц (см. рис. 3, Б). Для относительно далеких землетрясений основной максимум более выражен (см. рис. 3, III), для горизонтальной компоненты максимумы отвечают параметрам очагов сильных землетрясений и по интенсивности колебаний поверхности соответствуют уровню исходной сейсмичности для эталонных коренных пород, равной 8 баллам. Основные параметры акселерограмм следующие: максимальные ускорения 180–210 см/с<sup>2</sup>, продолжительность записи на уровне 0,3 от максимума равна 20 с, максимум спектров 90–130 см/с, ширина максимума спектра на уровне 0,5 составляет от 1 до 5 Гц.



**Рис. 3. Синтезированные акселерограммы (А) и их фурье-спектры (Б), полученные для твердомерзлых грунтов участка нефтепровода 1471–1910 км.**

I – по данным каталога сильных землетрясений мировой сети ( $\Delta < 100$  км); II – по параметрам сильных землетрясений мировой сети и местных землетрясений ( $\Delta < 70$  км); III – по параметрам сильных землетрясений мировой сети и местных относительно далеких землетрясений ( $\Delta > 70$  км);  $a$  – максимальное ускорение колебания грунта;  $S$  – спектр Фурье акселерограмм.

Согласно [Расчетные..., 1988], для расчета сейсмических воздействий в соответствии с выбранным подходом построены обобщенные (вероятные) сейсмические модели, отвечающие грунтовым и мерзлотным условиям основания нефтепровода. Модели характеризуются мощностью слоев ( $h$ ), распределением в них скоростей продольных ( $v_p$ ) и поперечных ( $v_s$ ) волн, объемной массой грунтов ( $\rho$ ) и декрементами поглощения ( $d$ ). Для района нефтепровода затухание объемных волн в грунтах изучено значительно хуже, чем первые три параметра модели. Поэтому в расчетах используются их приближенные значения (по литературным данным). Кроме того, они могут определяться в соответствии с распределением скоростей в слоях по модели Г.И. Гуревича [1974].

На основе выполненных прямых измерений, обобщающих сведения о скоростях распространения сейсмических волн, о данных бурения и физических свойствах грунтов, построение моделей до глубин 20–50 м не вызывало затруднений. Там, где

трасса пересекает крупные геологические структуры, рекомендуется построение сейсмогрунтовых моделей до коренных пород, глубина залегания которых может превышать 1 км [Джурик и др., 2003]. Число моделей контролировалось величиной задания погрешности расчетов. Например, различие по оценкам сейсмической опасности по моделям в нашем случае не превышало 0,25 балла. При таком подходе для трассы нефтепровода нами было построено в общей сложности не более 20 моделей. Резонансные частоты для слоя рыхлых грунтов оценивались дифференцированно в зависимости от изменения его мощности по расчетным частотным характеристикам.

Для примера мы представляем девять моделей, которые охватывают практически весь диапазон изменения грунтовых условий в основании трассы (табл. 2). Они отличаются составом и состоянием, но их представительность разная, поскольку таилики выделяются только на участках переходов нефтепровода через русла рек (это худшие усло-

Таблица 2. Параметры обобщенных сейсмических моделей

Номер модели	Тип грунта	$h$ , м	$v_p$ , м/с	$v_s$ , м/с	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$d$	$f$ , Гц	$a_{\max}$ , см/с <sup>2</sup>	
<i>Твердомерзлые и коренные породы</i>									
1	Коренные породы	10	3000	1600	2,5	0,048	>20	180–210	
			4000	2200	2,6	0,037			
<i>Воздушно-сухие грунты</i>									
2	Средние грунты (по составу)	10	700	350	1,9	0,210	7	380	
			2800	1500	2,5	0,050			
			3000	1600	2,5	0,048			
			4000	2300	2,6	0,037			
3	Песчаные грунты с гравием и галькой	10	700	350	1,9	0,210	4,6	410	
			800	400	2,0	0,200			
			2800	1500	2,5	0,050			
			3000	1600	2,5	0,048			
			4000	2300	2,6	0,037			
4	Песчаные и гравийно-галечные грунты	20	700	350	1,9	0,210	2,5	410–490	
			30	800	400	2,0			0,200
			3000	1600	2,5	0,048			
			4000	2300	2,6	0,037			
<i>Водонасыщенные грунты</i>									
5	Средние грунты (по составу)	10	1600	380	1,9	0,180	11	690	
			10	2900	1540	2,5			0,049
			3000	1600	2,5	0,048			
			4000	2300	2,6	0,037			
6	Песчаные грунты с гравием и галькой	10	1600	380	1,9	0,180	8	710	
			10	1800	480	2,0			0,170
			10	2900	1540	2,5			0,049
			3000	1600	2,5	0,048			
			4000	2300	2,6	0,037			
7	Песчаные и гравийно-галечные грунты	20	1600	380	1,9	0,180	6	730	
			30	1800	480	2,0			0,170
			10	2900	1540	2,5			0,049
			3000	1600	2,5	0,048			
			4000	2300	2,6	0,037			
<i>Мерзлые грунты с различной отрицательной температурой</i>									
8	Песчаные и гравийно-галечные грунты ( $T > -1$ °C)	40	2800	1500	2,0	0,050	8	360	
			4000	2200	2,6	0,037			
9	Песчаные и гравийно-галечные грунты ( $T < -2$ °C)	30	3200	1700	2,0	0,034	10	240	
			4000	2200	2,6	0,037			

вия), а основанием на более 80 % протяженности трассы служат мерзлые и коренные породы.

Сравнительные результаты расчетов для трех синтезированных исходных акселерограмм (см. рис. 3) мы приводим для модели 4, где мощность рыхлых неводонасыщенных грунтов  $h = 50$  м (рис. 4, I–III). В результате ускорение колебаний грунтов меняется от 420 до 490  $\text{см}/\text{с}^2$ , уровень частотных характеристик имеет максимум равный 4 на частоте 2,6 Гц (для всех исходных сигналов). Максимумы спектров приходятся на частоты 1,4–1,7 Гц, а их уровни меняются от 250 до 370  $\text{см}/\text{с}$ . Наибольшие различия в последнем случае соответствуют третьей исходной акселерограмме, сформированной с использованием относительно далеких землетрясений. Это говорит о том, что в теоретических расчетах можно использовать дифференцированный подход при выборе исходных сигналов для различных участков трассы в зависимости от расположения зон ВОЗ. В то же время возможно синтезировать и один обобщающий сигнал, отвечающий особенностям всех трех акселерограмм. Поэтому для дальнейших расчетов в качестве исходного сигнала выбрана акселерограмма, представленная на рис. 3, II. Результаты расчетов максимальных ускорений ( $a_{\text{max}}$ ,  $\text{см}/\text{с}^2$ ) и резонансных частот ( $f$ , Гц) колебаний верхних рыхлых слоев для обобщающих моделей сведены в табл. 2. Отмечается, что они получены при использовании программы Л.И. Ратниковой [1984] и экспериментальных частотных характеристик слоев мерзлых грунтов различного состава и температуры (см. рис. 2).

Расчеты показывают, что максимальное ускорение колебаний для твердомерзлого состояния грунтов не превышает 210  $\text{см}/\text{с}^2$ . Талое неводонасыщенное состояние грунтов приводит к увеличению

сейсмических воздействий до 380–490  $\text{см}/\text{с}^2$ . С увеличением мощности рыхлых отложений ускорение вначале возрастает примерно в два раза, а затем значительно снижается. При этом максимальные значения уровня частотных характеристик смещаются в сторону низких частот и для моделей 2, 3 и 4 они равны 7,0, 4,6 и 2,5 Гц соответственно.

Для водонасыщенного состояния ускорения достигают 690–730  $\text{см}/\text{с}^2$ , а максимумы частотных характеристик приходятся на 5–11 Гц. Расчет для этого состояния грунтов проведен с использованием относительных экспериментальных частотных характеристик для одинаковых по составу водонасыщенных и неводонасыщенных грунтовых слоев [Оценка..., 1988]. Относительные частотные характеристики в этом случае необходимы для расчета амплитудного спектра для модели, включающей слой водонасыщенных грунтов (расчетного спектра на грунте). Затем с помощью обратного преобразования Фурье [Бат, 1980] вычисляется форма сигнала (акселерограммы) на поверхности водонасыщенного грунта. Недостатком такого подхода является реализация расчетов сейсмических колебаний в предположении упругого деформирования. Величина неупругих (остаточных) деформаций может оцениваться в этом случае по расчетным параметрам сейсмических воздействий при использовании существующих сейсмических шкал [Медведев, 1962].

Районирование параметров сейсмической опасности проводилось непосредственно по профилю трассы, а результаты представлялись в табличном виде в соответствии с пикетами трассы и в электронном варианте с использованием программы AutoCAD. Районирование ответственных

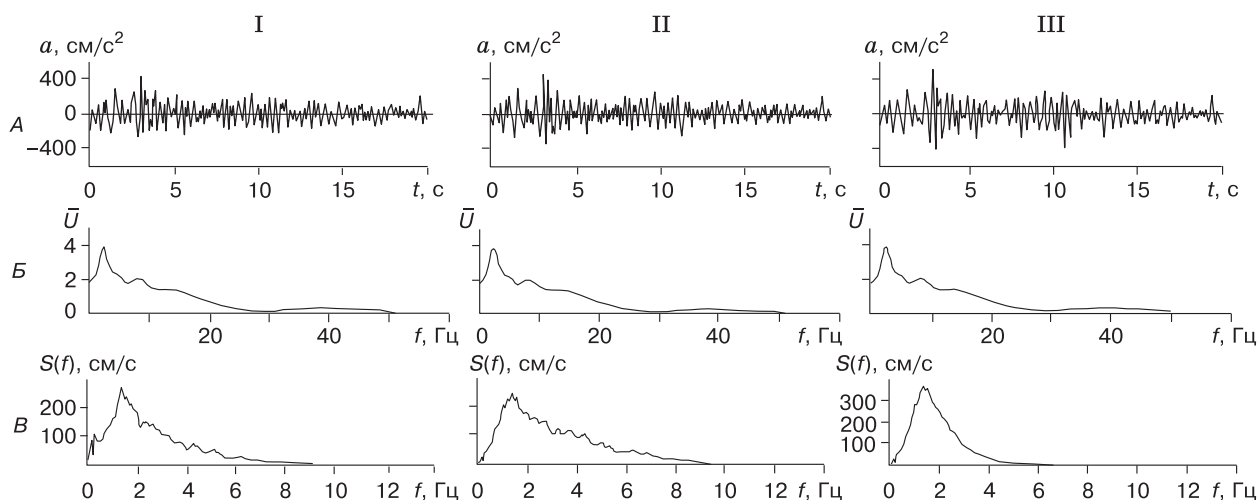


Рис. 4. Результаты расчетов сейсмических воздействий для грунтовой модели ( $h = 50$  м) при использовании исходных синтезированных акселерограмм I–III.

A – акселерограммы, B – частотные характеристики, B – спектры.



участков выполнялось по площади в соответствии с требованием (заданием) заказчика.

В качестве примера представления полученных результатов нами выбран наиболее сложный участок протяженностью 10 км. Это участок пересечения нефтепроводом бассейна р. Олекмы. Учитывая зависимость сейсмических воздействий мерзлых грунтов от температуры, их расчеты проведены на случай сильного землетрясения (карта Б) для моделей, представленных мерзлыми льдонасыщенными грунтами различной температуры. Необходимость таких расчетов очевидна, она обосновывалась нами ранее [Джурик и др., 2003]. Расчеты выполнены для двух моделей (см. табл. 2, модели 8 и 9). Методика расчетов основана на использовании относительных экспериментальных частотных характеристик для мерзлых грунтов различной температуры [Дреннов, Джурик, 2005], полученных по данным записей близких слабых землетрясений (см. рис. 2).

Модель 8 соответствует высокольдистым рыхлым грунтам с  $T > -1^\circ\text{C}$ , модель 9 – цементированным льдом песчаным и гравийно-галечным грунтам с  $T \approx -2^\circ\text{C}$ . Мощность слоя мерзлых грунтов равна 40 и 30 м соответственно. Расчеты показывают, что в мерзлых грунтах максимальные ускорения колебаний исходного сигнала (эталон) для горизонтальной компоненты увеличиваются примерно в 1,3–2 раза и достигают значений 240–360  $\text{см}/\text{с}^2$  (рис. 5). По шкале балльности это соответствует сейсмическому воздействию, равному примерно 8,2 балла для грунтов основания, представляемых моделью 9 ( $T < -2^\circ\text{C}$ ), и 8,8 балла для

грунтов, описанных моделью 8 ( $T > -1^\circ\text{C}$ ). Максимум спектров ускорений (см. рис. 5, б) лежит на частотах 1,5 и 2,5 Гц и увеличивается с повышением температуры мерзлых грунтов от 44,1  $\text{см}/\text{с}$  (модель 9) до 64,4  $\text{см}/\text{с}$  (модель 8). Частотные характеристики пачек слоев показывают (см. рис. 5, в), что наибольшее увеличение исходного сигнала происходит на частотах 8 и 10 Гц.

Таким образом, поставленная задача по разделению участка на вероятные зоны с различной сейсмической опасностью решена однозначно. Площадка разделена на участки 8, 9 и 10 баллов (рис. 6). Максимальное значение ускорений для горизонтальной компоненты в случае сильного землетрясения, соответствующего исходной сейсмичности 9 баллов (карта Б), изменяется на этом участке от 190 до 670  $\text{см}/\text{с}^2$ . Преобладающие периоды рыхлой толщи находятся в пределах 2,5–10,6 Гц. Максимальная сейсмическая опасность приходится на русло р. Олекмы и руч. Чопкокон.

Приведенный пример демонстрирует одну из особенностей районирования трассы нефтепровода по сейсмогрунтовым моделям. Относительно простые по инженерно-геологическим и мерзлотным условиям строительства участки представляются малым набором моделей, т. е. отдельная модель может характеризовать протяженные участки, расположенные в различных районах трассы, для которых нет необходимости проводить детальные геофизические измерения. На сложных участках, как показал приведенный пример, требуются не только детальные инженерно-сейсмологические исследования, но и проведение прямых расчетов

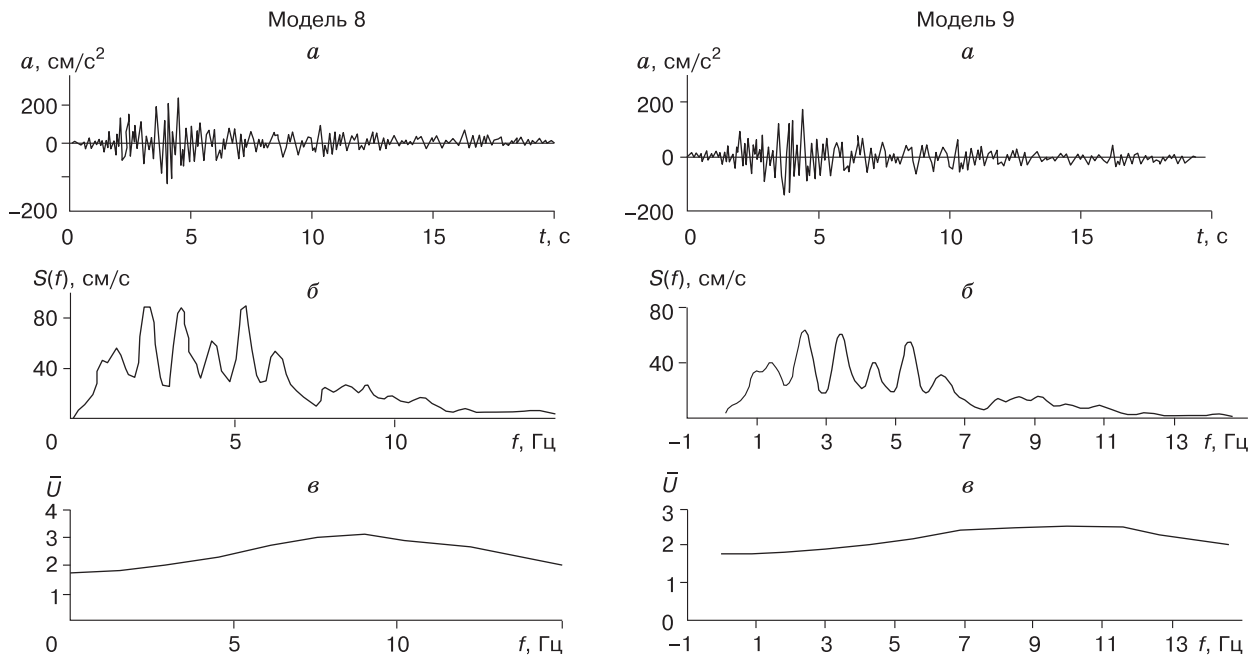
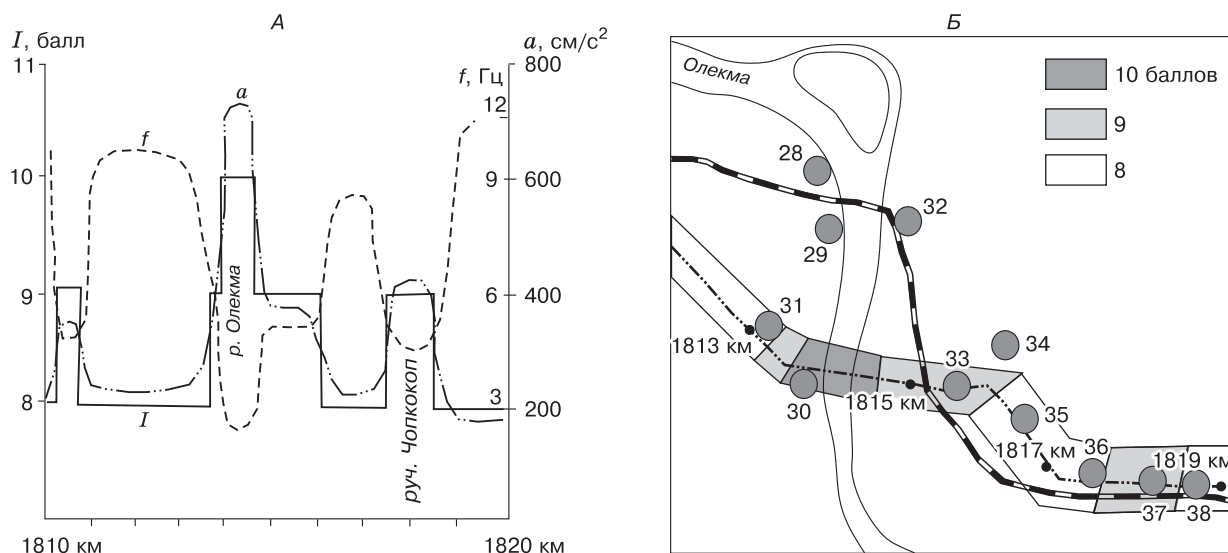


Рис. 5. Акселерограммы (а), их спектры (б) и частотные характеристики (в) для моделей 8 и 9.



**Рис. 6. Районирование параметров сейсмических воздействий на примере участка перехода нефтепровода через р. Олекма.**

А – изменение по оси нефтепровода сейсмической опасности ( $I$ ), максимальных ускорений ( $a$ ) и резонансных частот ( $f$ ) рыхлой толщи; Б – схема расположения пунктов сейсмозондирования и зон с различной сейсмической опасностью в баллах.

сейсмических воздействий для контрастных в инженерно-сейсмологическом отношении разрезов по профилю. Не исключается для таких территорий и привлечение инструментальных методов сейсмического микрорайонирования.

Результаты измерений, выполненные на ответственных участках, использовались при определении вероятных показателей сейсмических свойств, аналогичных по составу и состоянию грунтов для всей исследуемой территории. Однако это не исключает важность остальных измерений, проведенных по трассе и обобщенных в предыдущем разделе. В результате сейсмическая опасность грунтов основания нефтепровода на участке 1471–1910 км оценивается для естественного их состояния в 8, 9, 10 баллов – карта Б и 9, 10, 11 баллов – карта С. В конечном счете эти данные определяют уровень вероятностной оценки сейсмической опасности грунтов основания нефтепровода, которая по изложенной выше методике реализована нами в масштабе карты 1:25 000.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложена методика сейсмического микрорайонирования основания линейного протяженного (500 км) сооружения по сейсмогрунтовым моделям. Выбранный подход является наиболее экономичным и позволяет получить полный набор необходимых параметров сейсмических воздействий для строительства сейсмостойкого линейного сооружения. Оценивается сейсмический

риск этого сооружения по максимальным пиковым ускорениям на случай вероятных сильных землетрясений. При таком подходе обоснована вероятность сейсмических воздействий согласно принятым вариантам карт сейсмического районирования. Основные этапы методики сводятся к следующему.

1. Комплексный анализ исходных геолого-геофизических и сейсмологических материалов, обоснование зон вероятных очагов землетрясений, уточнение границ исходной сейсмической опасности при использовании данных о пересечении трассой зон разломов. Определение основных параметров вероятных сильных землетрясений, соответствующих исходной сейсмичности.

2. Изучение сейсмических свойств наиболее распространенных грунтов основания линейного сооружения с учетом их состава и состояния. Обоснование выбора параметров эталонных скальных грунтов. Проведение районирования сейсмической опасности трубопровода по данным измерений скоростей сейсмических волн, выполненных по трассе и на представительных участках.

3. Обобщение и анализ данных регистрации близких землетрясений, синтез исходных сигналов для “эталонных” коренных пород, соответствующих по интенсивности вероятным сильным землетрясениям. Построение достаточного набора вероятных сейсмических моделей, расчет основных параметров сейсмических воздействий и районирование по ним основания трассы линейного сооружения.

Таким образом, для участка трассы в 500 км на основе реализации предложенной методики определяются основные сейсмические характеристики и параметры сейсмических воздействий. Часть из них – скорости сейсмических волн, акселерограммы, спектры ускорений и частотные характеристики получены непосредственно для основных разновидностей грунтов в различном их состоянии. Другие параметры, в том числе сейсмическая опасность в баллах, определяются путем выполнения необходимых расчетов. Само районирование трассы проводится по сейсмогрунтовым моделям, каждая из которых описывается набором указанных выше параметров. Такой подход нами продемонстрирован на примере участка перехода нефтепровода через р. Олекма.

Изложенный подход наиболее экономичен для сейсмически активных северных районов Восточной Сибири. Он позволяет с большей степенью надежности районировать протяженные трассы линейных сооружений по вероятным максимальным сейсмическим воздействиям.

### Литература

- Бат М.** Спектральный анализ в геофизике. М., Недра, 1980, 535 с.
- Геокриологические условия** Забайкальского Севера / Под ред. Н.А. Граве. М., Наука, 1966, 216 с.
- Геология и сейсмичность зоны БАМ.** Инженерная геология и инженерная сейсмология / Под ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1985а, 192 с.
- Геология и сейсмичность зоны БАМ.** Сейсмогеология и сейсмическое районирование / Под ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1985б, 191 с.
- Гуревич Г.И.** Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М., Наука, 1974, 474 с.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д.** Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. Новосибирск, Наука, 2000, 270 с.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П.** Восстановление основного толчка сильного землетрясения по его афтершокам // Материалы XXXVII совещания “Эволюция тектонических процессов в истории земли”. М., ГЕОС, 2004а, с. 139–142.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф.** Оценка влияния деградации толщ мерзлых пород на изменение сейсмического риска // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 28–38.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф.** Оценка влияния природно-техногенных факторов на проявления сильных землетрясений в пределах криолитозоны // Криосфера Земли, 2004б, т. VIII, № 2, с. 40–47.
- Дреннов А.Ф., Джурик В.И.** Оценка резонансных частот и скоростных характеристик слоя мерзлых отложений // Геология и геофизика, 2005, т. 46, № 2, с. 217–223.
- Землетрясения в СССР в 1989 г.** М., Наука, 1993, 232 с.
- Комплект карт** общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / Под ред. В.Н. Страхова, В.И. Уломова. М., ОИФЗ, 1999, 57 с.
- Медведев С.В.** Инженерная сейсмология. М., Госстройиздат, 1962, 260 с.
- Методические рекомендации** по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений. МДС 22-1. М., МИИТ, 2005, 50 с.
- Оценка влияния** грунтовых условий на сейсмическую опасность // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М., Наука, 1988, 224 с.
- Расчетные методы** в СМР // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М., Наука, 1988, с. 96–130.
- Ратникова Л.И.** Расчет колебаний на свободной поверхности и во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта // Сейсмическое микрорайонирование. М., Наука, 1984, с. 116–121.
- Рекомендации** по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. М, Госстрой СССР, 1985, 73 с.
- РБ-006-98.** Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. М., Госатомнадзор России, 1998, 63 с.
- Сейсмический риск** и инженерные решения. М., Недра, 1981, 370 с.
- Сейсмическое районирование** Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Под ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1977, 303 с.
- СНиП II-7-81\*.** Строительство в сейсмических районах. М., Госстрой России, 2001, 45 с.

Поступила в редакцию  
23 ноября 2006 г.