

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЯВЛЕНИЙ ПРОГНОЗНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ
НА УЧАСТКЕ МАТЕРИК–САХАЛИН ДЛЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОГО ЛИНЕЙНОГО
СООРУЖЕНИЯ**

В.И. Джурик, С.П. Серебrenников, Е.В. Брызжак, А.Ю. Ескин

ФГБУН Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова 128, г. Иркутск, 664033; e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 14 октября 2020 г.

Представляются результаты районирования сейсмической опасности участка подводного перехода нефтяного трубопровода через пролив Невельского между пос. Лазарев Николаевского района Хабаровского края и мысом Погиби на территории Сахалинской области в районе пос. Погиби. По акватории участок перехода ограничен полосой шириной 500 м и протяженностью 11 км. Согласно фондовым материалам Геофизической службы РАН и карте ОСР-2015, наибольшая сейсмическая активность Охотоморского региона наблюдается в зоне Курильских островов, а ближайшая к месту строительства активность проявляется в центральной зоне северного Сахалина. Крупные землетрясения регистрируют рядом сейсмологических станций в непосредственной близости к участку строительства. Сами очаги близлежащих землетрясений сдвинуты к востоку от места строительства и в большей степени приурочены к системам глубинных разломов, обязанных сочленению Западно-Сахалинского синклиория с Сихотэ-Алинским вулканическим поясом.

Основная цель исследований связана с разработкой методики прогноза сейсмических воздействий для территорий, подверженных прогнозируемым сильным землетрясениям. В этом направлении для конкретного сооружения предлагается подход, основанный на построении набора наиболее вероятных сейсмических моделей до эталонных коренных пород, задание исходного сигнала, соответствующего исходной сейсмичности района, расчета для них основных параметров сейсмических воздействий и далее, в первом приближении, реализация технологии построения инженерно-сейсмологического разреза по участку строительства нефтепровода.

Предложенные подходы к прогнозу проявления сейсмичности на участке перехода нефтепровода через пролив Невельского основаны на определенных ограничениях, которые позволили получить набор параметров сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений, необходимых для проектирования и строительства сейсмостойкого линейного сооружения. Достоинством такого подхода, при усовершенствовании методов расчета и в случае мониторинга критически важных объектов, является возможность пересчета сейсмических воздействий на сооружение при использовании сформированных сейсмогрунтовых моделей.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, сейсмогрунтовые модели, акселерограммы, спектры, частотные характеристики, преобладающие частоты, пролив Невельского, Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования связаны с оценкой проявлений прогнозной сейсмичности на участке критически важного линейного сооружения – участка наземного и подводного нефтяного трубопровода. Он пройдет через узкую часть пролива Невельского между пос. Лазарев Николаевского района Хабаровского края и мысом Погиби на территории Сахалинской области (рис. 1, а).

Район строительства расположен вблизи сейсмически активной части северного Сахалина, что наглядно характеризуется картой эпицентров землетрясений за инструментальный период наблюдений (рис. 1, б). Для ее построения использовались сведения о прошедших землетрясениях, зарегистрированных Сахалинским филиалом ГС РАН, в основном по данным ближайших к месту строительства постоянных сейсмических станций, рас-

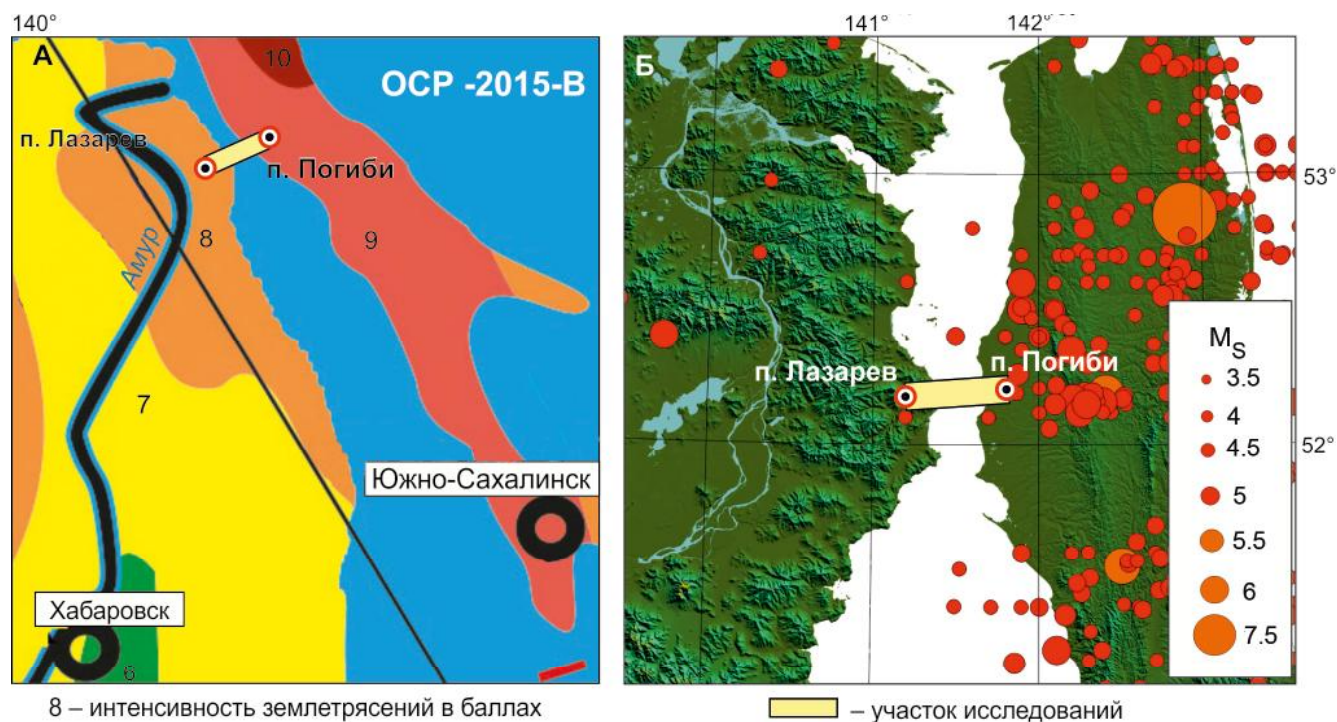


Рис. 1. Обзорная карта участка строительства (а), карта эпицентров землетрясений с магнитудой 3.5–7.5 (б).

положенных на острове Сахалин и в пределах Хабаровского края.

Наиболее сильные землетрясения приурочены к Западно-Сахалинскому, Центрально-Сахалинскому и Восточно-Сахалинскому разломам или их оперениям [15]. Можно отметить несколько крупных землетрясений, вызвавших разрушительные последствия: Монеронское 1971 г., Нефтегорское 1995 г., Углегорское 2000 г., Невельское 2007 г. [9], которые определили необходимость уточнения исходной сейсмичности (УИС) и ее корректировки в связи с усилением сейсмической активности с 1995 г. [5]. Авторы статьи не проводили работ в направлении детального сейсмического районирования (ДСР), воздействия оценивались на основании карт ОСР и данных по реализации СМР. Такой подход является оправданным для конкретно исследуемого линейного сооружения, поскольку поставленные выше задачи – это также задачи УИС, но с детальностью на порядок выше.

В результате можно констатировать, что участок надводного и подводного трубопровода находится в сейсмически опасном районе с высокой сейсмической активностью (рис. 1). В соответствии с картами ОСР [10] поселок Лазарев находится в зоне сейсмической активности 8, и 9 баллов, Погиби – 8, 9 и 10 баллов. Сами поселки и трасса нефтепровода расположены в различных сейсмических зонах [10], это нагляд-

но подтверждает представленная карта эпицентров землетрясений в радиусе до 200 км от объекта строительства за инструментальный период регистрации землетрясений. Начиная с магнитуды (M) 3.5, количество землетрясений островной части, по сравнению с континентальной, увеличивается в разы, а с M больше 5 присутствуют только на островной части. Для Сахалинского региона статистика землетрясений следующая: в течение 10 лет здесь регистрируется в среднем одно землетрясение с $M \geq 6$ и около 10 событий с $M \geq 5$ [17]. Это подтверждает необходимость разделения этих территорий по уровню исходной сейсмичности.

В то же время при расположении объекта строительства на границе различных сейсмических зон в пределах 20 км предпочтение отдается зоне с повышенной сейсмичностью [14], что и принято при оценке проявлений прогнозной сейсмичности для проектируемого линейного сооружения [10]. В подтверждение этого необходимо отметить, что сейсмическая активность на Сахалине сосредоточена в интервале глубин в земной коре от 10 до 30 км [15, 16]. Поэтому наиболее сильные землетрясения будут проявляться в пределах переходного участка строительства протяженностью 11 км практически с одинаковой интенсивностью, которая на Сахалине наблюдалась сотрясениями интенсивностью до 8–9 баллов по шкале MSK-64 [7].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленная задача прогноза проявления сейсмичности на участке нефтепровода связана с необходимостью реализации его строительства для наземной и подводной частей сооружения. Обоснованных методов оценки сейсмической опасности для таких сооружений практически не разработано. Это связано с недостаточностью фактических материалов по их поведению и отсутствием необходимой статистики экспериментальных записей при относительно сильных землетрясениях. Не исключается и сложность решения задачи сейсмостойкости из-за дополнительного воздействия на сооружение сейсмических нагрузок, возникающих в окружающей среде (сейсмическое давление грунта, воды и наносов), хотя возможность решения таких задач предпринималась и ранее [8, 13].

Тем не менее, в нашем случае для реализации поставленной задачи принят подход, основанный на предположении о сохранении методики оценок сейсмических воздействий наземной и подводной части нефтепровода. Это является оправданным, поскольку установлено, что одним из главных факторов повреждаемости сооружений являются грунтовые условия в основании их заложения и с увеличением глубины заложения фундамента сейсмостойкость сооружений повышается [3]. В итоге, учитывая сказанное, оценка проявлений прогнозной сейсмичности сводилась к дифференцированию горных пород в основании сооружения по скоростям распространения сейсмических волн, амплитудам и частоте колебаний слоев с учетом их состава и состояния. Именно они определяют степень ее проявления на прогнозируемые сильные землетрясения.

В методическом плане работа сводилась к следующим выбранным нами этапам исследований: обоснование сейсмических свойств основных типов грунтов, служащих основанием линейного сооружения, с учетом их состояния, по данным геофизических измерений; формирование модели эталона, задание исходного сигнала; построение наиболее вероятных сейсмических моделей, проведение теоретических расчетов основных параметров сейсмических воздействий и районирование по ним сейсмической опасности трассы нефтепровода. Использовались известные и полученные нами ранее данные по оценке влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность в баллах [9] с учетом состояния грунтов и их эффективной мощности. Особое внимание уделяется формированию расчетных сейсмогрунтовых моделей и исходных сигналов [1], спектральному составу и их трансформации при использовании частотных

характеристик грунтовых слоев различного состояния [2].

Особое внимание уделяется количественному обоснованию проявлений прогнозной сейсмичности изучаемых площадок в зависимости от грунтовых условий в их основаниях по прогнозируемым максимальным ускорениям.

Наиболее конкретно изложенный подход и использованная методика, по предложенным выбранным этапам исследований, представляется далее при их анализе. Это является вполне оправданным изложением полученных результатов, в направлении их достоверности, связанной с прогнозом сейсмических воздействий сильных землетрясений на участке линейного сооружения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Решение поставленной задачи требует формирования сейсмогрунтовых моделей для участка строительства нефтепровода и задания исходного сигнала. Для этого дается краткое обобщение имеющихся сведений по характеристикам и параметрам сейсмических свойств грунтовых слоев, которые необходимы для оценки изменения сейсмической опасности по трассе нефтепровода. Это, прежде всего, данные по скоростям сейсмических волн, объемной массе, их обводненности и рельефу местности. Учитывая это, нами дан краткий анализ инженерно-геологических особенностей трех участков нефтепровода на основе анализа данных по геодезии, геологии и геофизике, представленных ЗАО ВНИИСТ-Диагностика при обосновании инженерно-сейсмологических условий его строительства. Основное внимание уделялось отбору величин тех параметров, которые непосредственно использовались для проведения расчетов сейсмических воздействий.

Участок «Лазарев». Протяженность участка 1700 м, и он, в связи с неглубоким залеганием коренных пород, характеризуется быстрым увеличением скоростей сейсмических волн с глубиной. Верхний слой рыхлых отложений имеет низкие значения скоростей продольных волн (V_p), равные 700 м/с, с глубины 5–16 м V_p быстро увеличивается до значений 1400 м/с. В подстилающем слое объемная масса грунтов составляет более 2.0 г/см³, а V_p возрастает до 1800–1900 м/с, в интервале глубин с 11 до 28 м V_p достигает 2300 м/с и быстро увеличивается до 3100 м/с. Учитывая сказанное, на участке по пределам изменения V_p в слоях (h м) с глубиной и с учетом их дальнейшего использования для построения расчетных моделей приняты следующие значения: $V_p = 600$ –1700 м/с, $h = 8$ –16 м; $V_p = 1700$ –2300 м/с, $h = 3$ –12 м; $V_p = 2300$ –3100 м/с, $h > 10$ м.

Участок Пролив. На этом участке протяженностью 6380 м сверху залегают илы, пески, суглинки ($V_p = 1500\text{--}1600$ м/с). Ниже идут пески пылеватые и мелкие с прослоями торфа, они характеризуются пластовыми скоростями от 1600 до 1700–1800 м/с, мощность этого слоя составляет 30–40 м. Далее с глубиной залегают отложения, представленные переслаиванием песков мелко- и среднезернистых с суглинками и торфом. Подошва слоя прослеживается на границе скорости 1700 м/с на глубине 40 м в западной части и погружается на 110 м – в восточной. Осадки, расположенные ниже, представлены песками среднезернистыми и крупнозернистыми с прослоями гравелитов. Полная мощность слоя 150 м. Основанием осадочно-го разреза являются выветрелые породы складчатого фундамента, скорость продольных волн в них увеличивается от 2400 до 3600 и более м/с.

Участок Погиби (протяженность 1200 м). Прослеживаются отложения со значениями V_p более 1700 м/с и объемной массой более 2.04 г/см³. Глубина залегания этого слоя 14–26 м от поверхности. Перекрывающий слой, представленный песками различной крупности, имеет V_p от 600 до 1000 м/с, с глубиной скорость возрастает до 1200–1400 м/с. Уровень грунтовых вод по скоростям сейсмических волн четко не выделяется. Подстилающие суглинки, образующие водоупорный горизонт, имеют $V_p = 1400\text{--}1600$ м/с. В итоге для построения расчетных моделей приняты следующие их значения: $V_p = 600\text{--}1700$ м/с, $h = 16\text{--}22$ м; $V_p = 1700\text{--}2500$ м/с, $h > 10$ м.

Основываясь на представленных выше обобщенных сведениях о распределении скоростей сейсмических волн для трех участков нефтепровода, выбор эталона для расчетов сейсмической опасности в баллах и формирование сейсмогрунтовых моделей, до относительно сохранных коренных пород, не вызвал затруднений (табл. 1).

В итоге за эталон при расчетах сейсмической опасности в баллах принято среднее значение скоростей для грунтов I-категории [10], скорости сейсмических волн в которых для трех отмеченных выше участков меняются от 2300 до 2500 м/с. Это относительно сохранные коренные породы со средними значениями скоростей сейсмических волн, равными 2400 м/с – V_p , 1450 м/с – V_s и объемной массой 2.5 г/см³. Скорости поперечных волн, также необходимые для проведения расчетов, определялись по установленным ранее зависимостям $V_s = f(V_p)$ для определенного состава и состояния грунтов [11].

Расчет сейсмической опасности проводился согласно нормативным документам [11] по формуле:

$$\Delta I = 1.67 \text{Lg} (p_s V_s / p_i V_i) + R \cdot e^{-0.04h}, \quad (1)$$

где ΔI – расчетные значения приращений балльности, $p_s V_s$ и $p_i V_i$ сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов, h – глубина залегания уровня грунтовых вод, коэффициент R для территорий, где преобладают песчаные и глинистые грунты, принимается равным 1, а где гравийно-галечные и крупнообломочные – 0.5. При расчетах по формуле 1 средняя скорость для водонасыщенных грунтов бралась в таких же по составу грунтах, но находящихся в воздушно-сухом состоянии.

Средняя скорость в 10-ти метровом слое неводонасыщенных грунтов для отмеченных трех участков может меняться от 600 до 1300 м/с. Для 30-ти метрового слоя, в соответствии с методическим руководством по сейсмическому микрорайонированию и ОСР-2016 [10, 11], – от 800 до 1400 м/с. Расчеты приращений балльности к эталонному «скальному» грунту, с учетом глубины залегания уровня грунтовых вод, показывают, что для участков трассы, представленных моделями 2–6, они находятся в пределах: в первом случае от 0.7 до 2.3 баллов и во втором – от 0.6 до 2.1 баллов. При округлении до 1 балла сейсмичность участка нефтепровода оценивается в 9 и 10 баллов (табл. 1).

В настоящее время кроме оценки проявлений сейсмичности в баллах основное внимание уделяется изменению спектрального состава колебаний грунтов для исследуемых территорий в виде сейсмических характеристик (акселерограммы, спектры, частотные характеристики) и их параметров (максимальные ускорения, преобладающие частоты, коэффициенты динамичности). Возможная их реализация связана с необходимостью формирования модели эталона, заданию исходного сигнала и проведению теоретических расчетов. В комплексе они реализуются в следующем образом.

При проведении теоретических расчетов использовались известные программы COEF-10 и EERA, основанные на использовании метода тонкослоистых сред [11] и эквивалентной линейной модели [18]. Исходными данными для расчетов служили мощности слоев, скорости продольных и поперечных волн, плотность, а также зависимости модуля сдвига и коэффициента затухания от деформации сдвига [19].

В настоящее время существуют несколько программ, которые возможно использовать в направлении решения поставленных нами задач. Их анализ и по возможности сравнение расчетных данных приводятся во многих работах [4, 6, 12], приоритетность программ практически не рассматривается, кроме исходных данных для их расчетов. По словам авторов,

Таблица 1. Параметры обобщенных сейсмических моделей для участков нефтепровода: материк, пролив и островной.

№ модели	Категория грунтов для сформированных моделей по сейсмическим свойствам	Мощность слоя h (м)	Vp (м/с)	Vs (м/с)	ρ (т/м ³)	ΔI (баллы) I (баллы)
1	2	3	4	5	6	7
№ 1 Модель эталона	I	10	2400	1300	2.5	0
		∞	3600	1600	2.6	8
№ 2 (материк)	II	2	600	290	1.7	0.9
		3	800	400	1.8	
		3	1000	500	1.85	
		9	1400	740	1.9	
		10	2050	1100	2.1	
		20	2400	1300	2.4	
№ 3 (материк)	II	∞	3600	1600	2.5	9
		2	600	290	1.7	
		3	800	400	1.8	
		5	1200	650	1.87	
		6	2000	1100	2.1	
		20	2400	1300	2.4	
№ 4 (пролив)	III	∞	3600	1600	2.5	2.1
		5	1550	400	1.8	
		10	1600	470	1.86	
		15	1700	510	1.95	
		20	1900	600	2.04	
		20	2400	1300	2.4	
№ 5 (пролив)	III	∞	3600	1600	2.5	10
		5	1550	400	1.8	
		35	1600	470	1.86	
		70	1700	510	1.95	
		90	1900	600	2.04	
		20	2400	1300	2.4	
№ 6 островной	III	∞	3600	1600	2.5	1.8
		2	600	290	1.7	
		8	1600	470	1.86	
		10	1800	560	1.97	
		20	2000	700	2.1	
		20	2400	1300	2.4	

научные публикации и нормативные документы лишь частично охватывают проблемы расчета сейсмических эффектов [6], это существенно усложняет как расчеты, так и оценку их результатов. Для достоверности получаемых данных (частотных характеристик) сравниваются расчеты по отмеченным программам, которые рекомендуются согласно нормативным и опубликованным материалам [9, 11] для расчетов сейсмических воздействий на строящиеся сооружения на случай прогнозируемого сильного землетрясения. Оценить приоритетность использованных и имеющихся программ практически невозможно, поскольку для этого необходимы как основа экспериментальные данные по записям набора относительно сильных зем-

летрясений, включая и исходные данные для реализации расчетов по каждой использованной программе.

Построение модели эталона направлено на решение двух задач. Первая – это наиболее обоснованно отнести исходную сейсмичность в баллах к определенным грунтовым условиям, представленным сейсмической моделью; вторая связана с возможностью расчета «эталонных» спектральных характеристик колебаний грунтов при землетрясениях, по интенсивности соответствующих исходной сейсмичности [2]. Это позволяет при надежной изученности территории и при использовании расчетных и экспериментальных методов оценивать изменение параметров колебаний грунтовой толщи и приводит к выходу на ко-

личественную оценку его сейсмической опасности по профилю нефтепровода.

При таком подходе модель «эталона» представляется верхним 10-ти метровым слоем грунтов первой категории, по сейсмическим свойствам принятым за эталон (2400 м/с – V_p и 1450 м/с – V_s). Подстилается этот слой, по данным сейсморазведки, относительно сохранными коренными породами со значениями скоростей сейсмических волн, равными 3600 м/с – V_p и 1600 м/с – V_s (табл. 1, М. № 1). При построении модели учитывался градиент изменения скоростей сейсмических волн с глубиной и, при принятой мощности верхнего слоя, отсутствие влияния резонансных свойств в интервале частот до 30 Гц.

В отношении задания исходного сигнала специальных исследований по регистрации землетрясений на участке нефтепровода не проводилось, а записи сильных землетрясений отсутствуют. Поэтому, в нашем случае, его формирование отвечало требованиям, изложенным в нормативных документах [14] и методике, изложенной в работах [1, 2]. Реально, согласно сведениям о прошедших землетрясениях, полученным Сахалинским филиалом ГС РАН, распределение эпицентров землетрясений по отношению к участкам работ показывает представленная карта очагов землетрясений (рис. 1). Она свидетельствует о необходимости задания исходного сигнала, имеющего относительно широкополосный спектр, и чтобы он отвечал близким и относительно далеким землетрясениям, согласно основным параметрам зон ВОЗ для 8–9-ти балльных землетрясений [10].

Такая акселерограмма нами была синтезирована и масштабирована для модели эталона с учетом принятой исходной сейсмичности и использовалась как исходная для расчетов параметров сейсмических воздействий для участков, представляемых сейсмогрунтовыми моделями. Она отвечает следующим очаговым параметрам: эпицентральное расстояние от 0–50 до 150 км, магнитуда 6–7.8, глубина очага 10–30 км, механизм сбросо-сдвиг. В итоге исходный сигнал для модели эталона (рис. 2, М1) имеют следующие значения сейсмических параметров: максимальные ускорения NS – 210 см/с², Z – 102 см/с², максимум спектра NS – 46.3 см/с, Z – 24.3 см/с, ширина максимума спектров для двух компонент лежит в интервале от 2.39 до 10.84 Гц, продолжительность записи на уровне 0.3 от максимума – 20 с, основной максимум приходится на частоту 4.35 Гц.

Акселерограмма (рис. 2, а) по своим параметрам соответствует, согласно нормативным документам, 8-ми балльному сотрясению коренных пород и может использоваться, в качестве исходного сигнала для рас-

четов проявления прогнозной сейсмичности на участках трассы нефтепровода, представленных моделями 2–6 (табл. 1).

Расчёты акселерограмм, их спектров и частотных характеристик, по выбранной методике и сформированному исходному сигналу, для горизонтальной и вертикальной компонент показывают, что верхняя пачка слоев для моделей 2–6 увеличивает интенсивность колебаний исходного сигнала и ускорения достигают значений 430–842 см/с² для NS компоненты и от 210 до 460 см/с² для компоненты Z (табл. 2).

Максимумы спектров ускорений лежат в интервале частот 1.22–4.39 Гц и 2.78–18.31 Гц для NS и Z компонент, соответственно, и достигают значений 95.1–222 см/с – NS и 39.1–112 см/с² – Z (рис. 2, табл. 2).

Частотные характеристики пачек слоев, представленных моделями 2–6, рассчитаны для сравнения по двум, указанным выше программам [11, 18], и представлены на рисунке 2, в. Расчеты проведены с учетом угла выхода сейсмической радиации (30°) и двойного отражения от дневной поверхности [11].

Они показывают, что по частотному составу хорошее согласие отмечается для первых основных (резонансных) максимумов сейсмических колебаний и удовлетворительное – для относительно высокочастотных колебаний. По значению уровней основных максимумов их отношения меняются от 1.1 до 1.55, наибольшие увеличения для всех моделей отмечаются при расчетах, проведенных по программе COEF-10, и наименьшие – по EERA. С увеличением мощности рыхлых отложений различия уменьшаются, а максимум частотной характеристики сдвигается в сторону низких частот (рис. 2, в).

Для участка «Пролив» с увеличением мощности водонасыщенных отложений, залегающих на коренных породах (М. №4 и № 5), максимальные значения ускорений на NS и Z компонентах несколько снизились. Но зато они проявляются на более низких частотах (рис. 2). На эти частоты приходится большая часть энергии землетрясений, и поэтому они являются более опасными, чем относительно высокочастотные, но с такими же амплитудами колебаний (в нашем случае по ускорениям).

Это подтверждается при проведении расчетов спектров реакции и коэффициентов динамичности (β_i) для сформированных моделей, которые также отвечают за проявления прогнозной сейсмичности по профилю нефтепровода. Поскольку различия по максимальным ускорениям для некоторых построенных сейсмических моделей незначительны, для расчетов выбраны модели 1, 2, 5 и 6 (табл. 2, рис. 2), как ох-

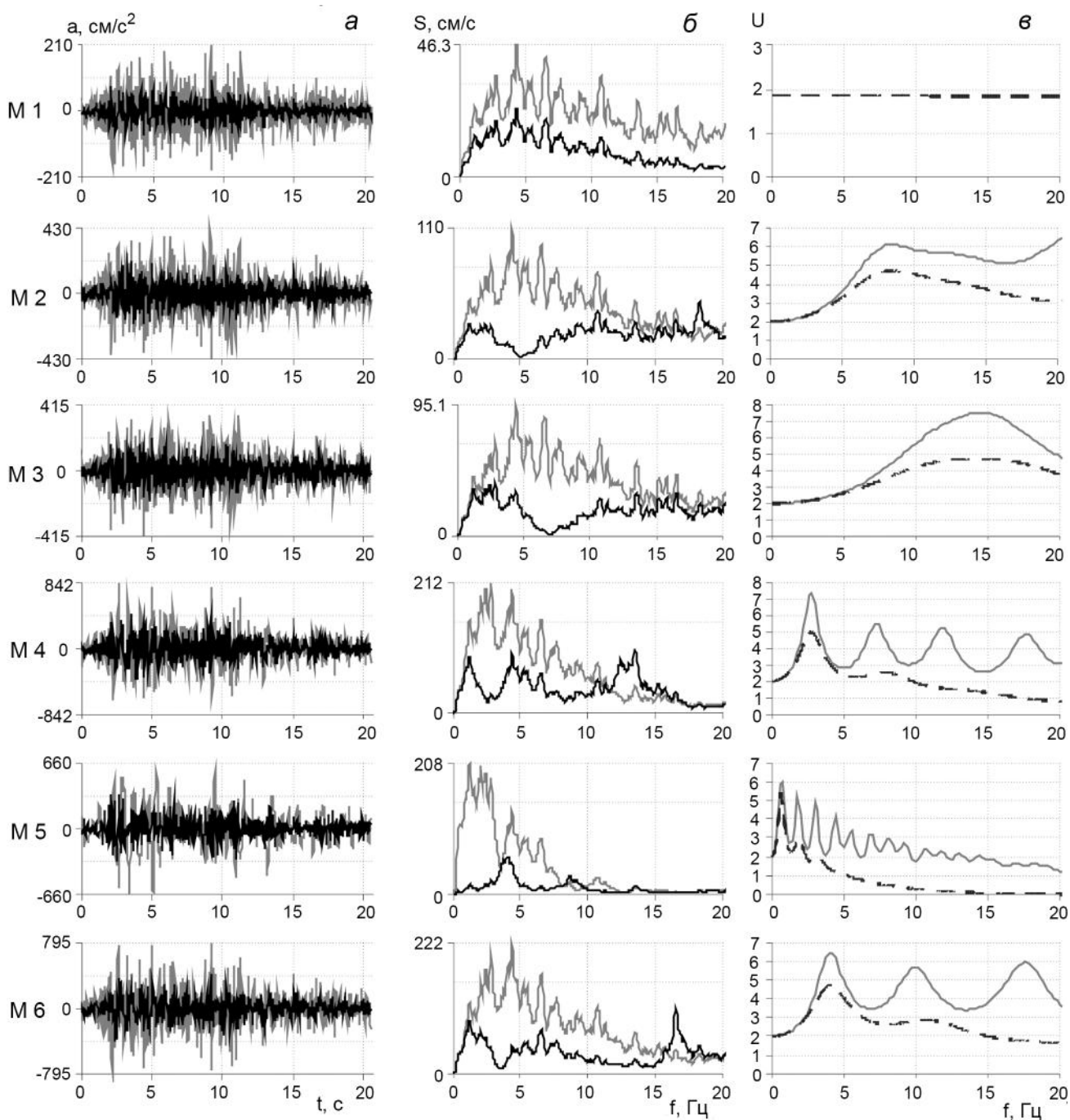


Рис. 2. Расчетные акселерограммы (а), их спектры (б) для NS-компоненты (темные кривые) и Z-компоненты (светлые) и частотные характеристики (в) для моделей 2–6 (кривая пунктирная – по программе COEF-10, сплошная – по программе EERA).

ватывающие все особенности сейсмогрунтовых условий участка.

Коэффициент динамичности используется для оценки расчетной сейсмической нагрузки на сооружение в выбранном направлении. Согласно действующим нормам, он в обобщенном виде определяется по

экспериментальным формулам в зависимости от периода собственных колебаний здания или сооружения и категории грунтов по сейсмическим свойствам [10]. Для нашего случая, в пределах периодов колебаний от 0.1 до 0.4 с и мощности рыхлого слоя меньше 30 м, для грунтов I и II категории β_i не должен превышать

Таблица 2. Основные параметры расчетных акселерограмм и соответствующих им спектров для моделей 1–6.

№ модели	Максимальное ускорение \ddot{A}_{\max} , (см/с ²)	Максимальное значение спектра S_{\max} , (см/с)	Частота основного максимума спектра F , (Гц)	Интервал частот для $0.7 \cdot S_{\max}$ (f), (Гц)	Резонансная частота рыхлых слоев, (Гц)
1	2	3	4	5	6
Горизонтальная компонента – NS					
1	210	46.3	4.35	2.73–10.84	–
2	430	110	4.35	2.78–7.67	8.35
3	415	95.1	4.39	2.78–10.79	14.36
4	842	212	2.78	1.22–6.59	2.78
5	660	208	1.22	0.93–2.93	0.68
6	795	222	4.35	2.05–6.64	4.1
Вертикальная компонента – Z					
1	102	24.3	4.35	2.39–6.69	–
2	220	47.9	18.31	10.55–18.51	8.35
3	210	39.1	2.78	1.12–16.55	14.36
4	460	107	13.48	1.03–13.67	2.78
5	350	58.7	3.96	3.56–4.44	0.68
6	440	112	16.5	1.12–16.65	4.1

значения, равного 2.5. Для грунтов III–IV категорий в пределах периодов колебаний от 0.1 до 0.8 β_i так же не должно превышать значений, равных 2.5. Нижний предел коэффициента динамичности во всех случаях принимается не менее 0.8.

Результаты расчетов спектров реакции и β_i проведены при использовании записей максимальных горизонтальных компонент для выбранных моделей (рис. 3, а). Расчеты показывают, что на случай воздействий, соответствующих расчетным акселерограммам на периодах колебаний от 0.1 до 0.4–0.8 с, максимальные значения спектров реакции меняются для выбранного уровня исходной сейсмичности, равной 9 баллам (рис. 1), от 710 до 2700 см/с² (рис. 3, а, табл. 3). Период основного максимума спектра находится в интервале 0.11–0.43 с, максимальное значение коэффициента динамичности меняется от 3.1 до 3.5. Если брать на уровне 0.7 $\beta_i(T)$, то его значение будет находиться в пределах 2.17–2.45. Наибольшее значение соответствует участку «Пролив», и оно хорошо согласуется с нормативной кривой (рис. 3, M5). Показательным параметром здесь является интервал периодов на уровне 0.7 $\beta_i(T)$. С ростом мощности рыхлых отложений этот показатель увеличивается и сдвигается в сторону больших периодов от 0.05–0.18 с для модели эталона (M1), до 0.18–0.85 с для модели «пролив» (M5), представляющей наибольшую мощность рыхлых отложений (рис. 3).

Несоответствие расчетных и нормативных кривых β (рис. 3, б) связано со стороны расчетных методов с несовершенством методики теоретических расчетов, которые не учитывают потерю энергии колебаний при возникновении неупругих деформаций.

Со стороны нормативных документов – это сильное усреднение (β) по категориям грунтов, не связанное с их общей мощностью до глубин залегания коренных пород, в особенности превышающих 10–30 м с расчетными максимальными ускорениями, установленными выше с учетом их связей с частотой сейсмических колебаний и мощностью рыхлых отложений. Эти показатели важны при проектировании строительства, а, следовательно, и при выявлении проявлений сейсмичности по трассе нефтепровода.

Итогом выполненных исследований является реализация построения инженерно-сейсмологического разреза по участку строительства нефтепровода (рис. 4). Технология его построения основывается на данных количественной оценки параметров сейсмических воздействий, полученных при использовании экспериментальных и расчетных методов, и комплекс доступных программ, необходимых для подготовки цифровых данных, представленных нами в табличной форме (табл. 2, 3).

Кратко их результаты для нашего участка представляются следующими значениями параметров сейсмических воздействий для выделенных зон. Десятибалльная зона расположена только на материке – «участок Лазарев», и он характеризуется неглубоким залеганием коренных пород и глубиной залегания УГВ более 7 м. В 10-ти метровом слое они представлены суглинками, прослой супесей и глин. Десятибалльные зоны охватывают небольшой участок основания нефтепровода на материке и полностью пролив. Прежде всего это связано с водонасыщенностью рыхлых отложений – практически с поверхности или в редких случаях с глубины 3–4 м на островном участке.

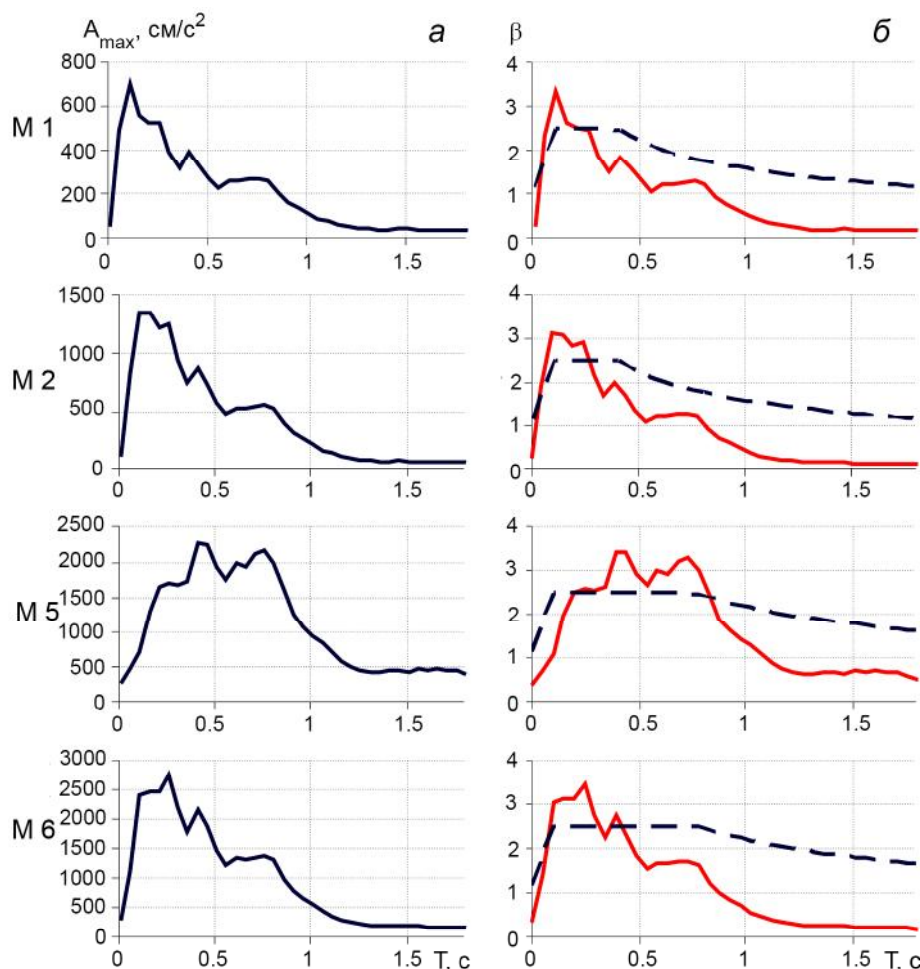


Рис. 3. Спектры реакции (а), коэффициенты динамичности β (б) для моделей 1, 2, 5 и 6 (сплошная линия – расчетный коэффициент динамичности, пунктирная линия – согласно СНиП II-7-81*).

Положительным моментом при построении разреза (рис. 4) является возможность районирования трассы нефтепровода по расчетным параметрам сейсмических воздействий, в том числе, и с учетом резонансных свойств рыхлых отложений, которые полностью определяются расчетными акселерограммами, их спектрами и частотными характеристиками (рис. 2) и дополняются спектрами реакции и коэффициентами динамичности (рис. 3).

Каждая модель отвечает участкам с одинаковыми грунтовыми и гидрогеологическими условиями строительства, расположенным на исследуемой трассе нефтепровода, и обосновываются набором сейсмических характеристик и их параметров для прогнозируемых сильных землетрясений, представленных в табличной форме (табл. 2, 3). При таком подходе к районированию проявлений прогнозной сейсмичности лучшими участками трассы являются участки, представленные моделями 2–3, средними – 4 и 6, и худшими – 5.

Отмечается, что для исследуемого участка рекомендуется при оценке проявлений прогнозной сейсмичности для грунтовых оснований проектируемого

строительства использовать максимальные значения указанных основных параметров сейсмических воздействий: сейсмическая опасность в баллах, максимальные ускорения для NS и Z компонент и величины резонансных частот. Кроме того, необходимо учитывать, что расчеты сейсмических воздействий проведены в предположении упругого деформирования, и величины остаточных деформаций могут определяться по шкалам балльности с учетом расчетных значений максимальных ускорений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по оценке проявлений прогнозной сейсмичности на участке материк–Сахалин, выполненные для критически важного линейного сооружения, связаны с разработкой методики прогноза сейсмических воздействий для территорий, подверженных прогнозируемым сильным землетрясениям. Для конкретного сооружения построен набор наиболее вероятных сейсмогрунтовых моделей до эталонных коренных пород, задан исходный сигнал, соответствующий уровню сейсмичности района, проведен расчет

Таблица 3. Расчетные параметры спектров реакции (A_{\max}) и коэффициентов динамичности (β_i) для обобщенных сейсмогрунтовых моделей участков нефтепровода: материк, пролив и островной.

№ модели	Категория грунтов	Максимальное значение спектра реакции, A_{\max} (см/с ²)	Период основного максимума спектра реакции, T (с)	Максимальное значение β_i	0.7 $\beta_i(T)$	Интервал периодов для 0.7 $\beta_i(T)$ (с)
1	2	3	4	5	6	7
№ 1 (эталон)	I	710	0.11	3.4	2.38	0.05–0.18
№ 2 (материк)	II	1350	0.15	3.1	2.17	0.08–0.32
№ 5 (пролив)	III	2300	0.43	3.5	2.45	0.18–0.85
№ 6 (остров)	III	2700	0.26	3.4	2.38	0.1–0.44

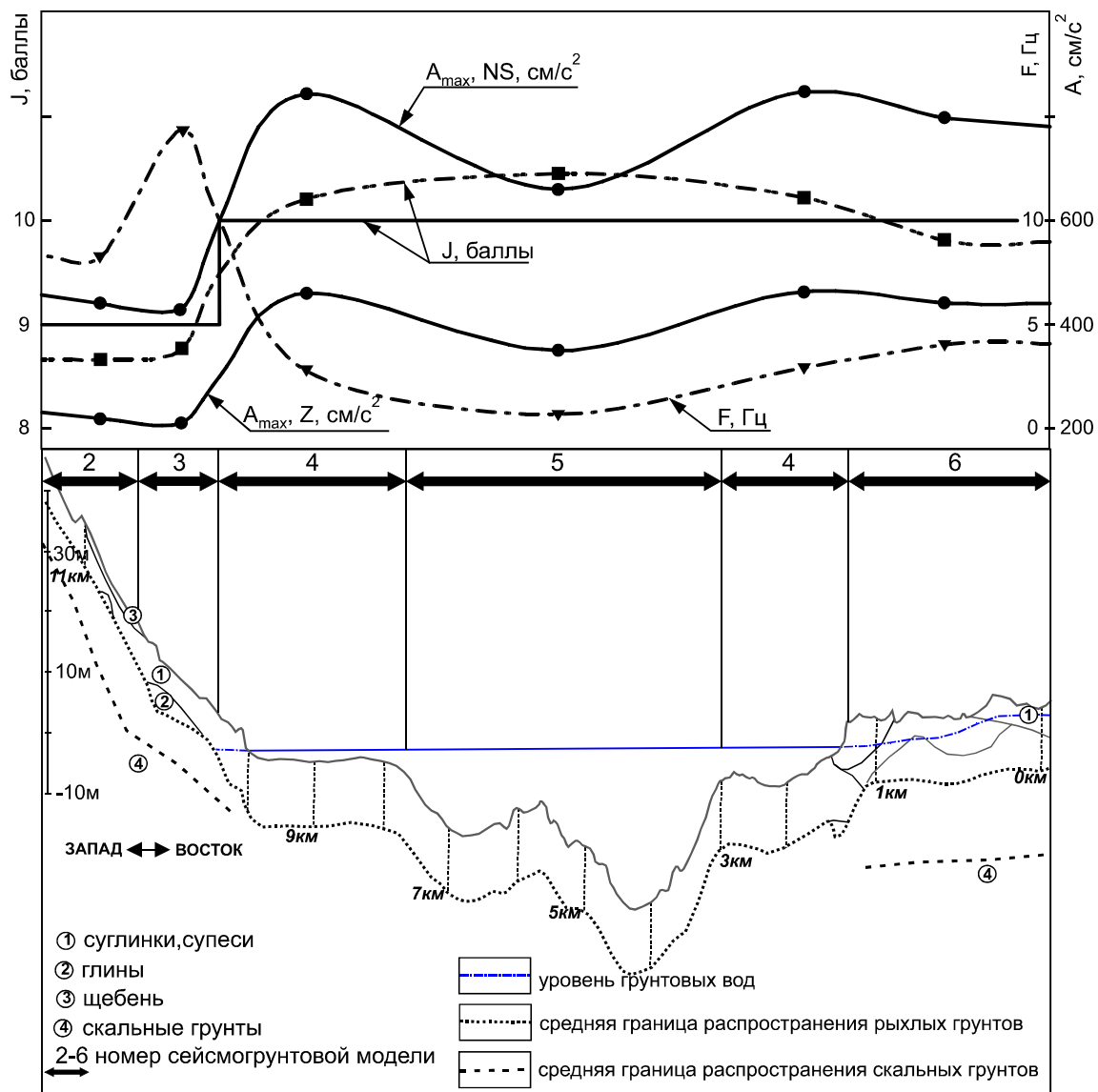


Рис. 4. Инженерно-сейсмологический разрез по створу нефтепровода.

I – сейсмическая опасность в баллах, A_{\max} – максимальные значения ускорений для Ns и Z компонент в см/с², F – резонансные частоты в Гц.

для них основных параметров сейсмических воздействий и далее, в первом приближении, реализована технология построения инженерно-сейсмологического разреза по участку строительства нефтепровода.

Использование для расчетов всей мощности рыхлых отложений до эталонных коренных пород дает возможность прогнозировать проявления прогнозной сейсмичности по расчетным параметрам на относительно низких частотах, которые являются наиболее опасными для линейных сооружений, пересекающих русла рек и крупные впадины.

Отмечается, что предложенные подходы основаны на определенных ограничениях, связанных с заданием исходного сигнала, выбором расчетных методов и несовершенством нормативных документов. Однако они позволили, на современном уровне исследований, дать прогноз набору параметров сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений, которые необходимы для проектирования и строительства подводного сейсмостойкого линейного сооружения. Достоинство такого подхода связано, при усовершенствовании методов расчета и в случае мониторинга сейсмического состояния строительного объекта, с возможностью использования полученных результатов, которые могут быть полезными и служить основой для пересчета сейсмических воздействий на другие планируемые в дальнейшем надводные или подземные сооружения через пролив Невельского.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта №20-55-44011

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. 1–11.
2. Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н. Районирование проявления прогнозной сейсмичности в пределах Танлу-Курского линейного (Дальний Восток) // Тихоокеан. геология. 2016. Т. 35, № 5. С. 116–129.
3. Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. Комплексная инженерно-сейсмологическая оценка условий строительства тоннеля в умеренной сейсмическом климатической зоне Сибири // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 10-1. С. 38–44.
4. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М.: Наука, 2009. 352 с.
5. Закупин А.С., Каменев П.А., Воронина Т.Е., Богинская Н.В. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2, № 1. С. 52–56.
6. Кауркин М.Д., Романов В.В. Расчет сейсмических воздействий в специализированных программах NERA и EERA // Инженерные изыскания. 2017. № 4. С. 54–62.
7. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 5. С. 93–103.
8. Муравьева Л.В., Тимофеев О.Я. Сейсмостойкость и безопасность специальных сооружений // Сейсмостойкое строительство: Безопасность сооружений. 2013 № 1. С. 55–60.
9. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 г. / Отв. ред. Б.В. Левин, И.Н. Тихонов. М.: Янус-К, 2000. 204 с.
10. ОСП-2016 Изменение № 1 к СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» 2020. 72 с.
11. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 224 с.
12. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Науч. мир, 2009. 260 с.
13. Рашидов Т.Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. Ташкент: Изд-во «Фан» Уз.ССР, 1973. 182 с.
14. СП-269.1382800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования. М.: Стандартинформ, 2017. 70 с.
15. Тараканов Р.З., Тихонов И.Н. Сахалинская сейсмология: развитие и некоторые результаты // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 34–28.
16. Тихонов И.Н. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе острова Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 года // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 22–29.
17. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 1. С. 5–14.
18. Bardet J.P., Ichii K., Lin C.H. EERA. A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits // Univ. Southern California, Department of Civil Engineering, 2000. 98 p.
19. Seed H. B., Idriss I. M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December 1970. 48 p.

*Рекомендована к печати В.Г. Быковым
после доработки 29.03.2021 г.
принята к печати 27.05.2021 г.*

V.I. Dzhurik, S.P. Serebrennikov, E.V. Bryzhak, A.Yu. Eskin

Preliminary seismic hazard assessment of the Sakhalin-Mainland area for a critical linear structure

The article presents the findings of seismic hazard zoning of the submerged crossing of the pipeline in the Nevelskoy Strait, between the village Lazarev of the Nikolaevsky district, Khabarovsk Krai, and the Cape Pogibi near the Pogibi village, Sakhalin Oblast. Along the water area, this section of the submerged crossing is limited by the zone which is 500 m wide by 11 km long. It follows from the stock of geological documents of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences and the OSP-2015 map that the highest seismic activity in the Okhotsk region is observed in the area of the Kuril Islands, and the central seismically prone zone of northern Sakhalin is closest to the construction site. Large earthquakes are recorded by a number of seismological stations in the immediate vicinity of the construction site. The foci of nearby earthquakes occur east of the construction site and are mostly confined to the systems of deep faults resulting from the juncture between the West Sakhalin synclinorium and the Sikhote-Alin volcanic belt.

The main purpose of the research is related to the development of a methodology for prognosticating seismic effects for the strong earthquake prone areas. In this context, an approach is proposed for the specific structure, which is based on the construction of a set of seismic models to reach the reference bedrock, setting of the pickup signal corresponding to the initial seismicity of the area, calculating the main parameters of seismic effects for them, and then, in a first approximation, the implementation of the technology for constructing engineering-seismological cross-section along the pipeline construction site.

The proposed approaches to prognosticating seismic events for that part of the pipeline submerged crossing in the Nevelskoy Strait are based on certain constraints that made it possible to obtain a set of parameters of seismic effects for prognosticated strong earthquakes necessary for designing and constructing an earthquake-resistant linear structure. Given improved calculation methods and critical object monitoring, the advantage of this approach is the ability to recalculate seismic effects to the structure using the constructed seismic ground motion models.

***Key words:* seismic effects, seismic ground motion models, accelerograms, spectra, response characteristics, predominant frequencies, Nevelskoy Strait, Sakhalin.**