

УДК 550.34

Оценка сейсмической опасности для трассы подводного газопровода в акватории пролива Невельского

С. А. Ковачев*, А. А. Крылов

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: kovachev@ocean.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6097-9746>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
08.01.2021;

получена
после доработки
22.02.2021

Ключевые слова:

пролив Невельского,
зоны ВОЗ,
повторяемость
землетрясений,
затухания пиковых
ускорений с расстоянием,
сейсмическая жесткость,
сейсмическое
микрорайонирование

Наличие сейсмической угрозы многократно усиливает экологическую опасность, особенно это касается нефтегазовых добывающих и транспортных сооружений в акваториях. Нормативные карты общего сейсмического районирования акваторий внутренних и окраинных морей России в настоящее время отсутствуют, тем более практически нет карт детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования для отдельных участков акваторий. С учетом того что началось интенсивное освоение морских месторождений нефти и газа и Северного морского пути, разработка таких карт становится весьма актуальной научно-практической задачей. Оценка сейсмической опасности для трассы подводного перехода трубопровода в акватории пролива Невельского выполнена Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН в 2008 г. Исходные сейсмические воздействия вычислены с использованием вероятностного анализа сейсмической опасности на основе пяти моделей зон возможных очагов землетрясений и трех типов моделей затухания пиковых и спектральных ускорений. Результаты выполненных расчетов, включая деагрегацию, показывают, что исходная сейсмичность района трассы перехода газопровода через пролив Невельского для периода повторения $T = 1\,000$ лет ниже, чем указывается на карте ОСР-2016-В, на которой восточное окончание трассы перехода через пролив характеризуется исходной сейсмичностью 9 баллов. Учет грунтовых условий (сейсмическое микрорайонирование) выполнен тремя разными методами: методом сейсмических жесткостей, расчетным методом и методом, учитывающим мощность четвертичных отложений. Настоящие исследования показывают, что сейсмические воздействия меняются вдоль трассы трубопровода от материка до о. Сахалин от 8,4 до 8,9 балла шкалы MSK-64 для периода повторяемости сейсмических сотрясений $T = 1\,000$ лет и от 9,3 до 9,7 балла для $T = 5\,000$ лет.

Для цитирования

Ковачев С. А. и др. Оценка сейсмической опасности для трассы подводного газопровода в акватории пролива Невельского. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 1. С. 14–34. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-14-34>.

Seismic hazard assessment for the underwater gas pipeline route in the water area of the Nevelskoy Strait

Sergei A. Kovachev*, Artem A. Krylov

*P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia;
e-mail: kovachev@ocean.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6097-9746>

Article info

Received 08.01.2021;
received in revised
22.02.2021

Key words:

Nevelskoy Strait,
seismic zones,
recurrence of earthquakes,
attenuation of peak
accelerations with
distance,
seismic microzoning,
seismic rigidity

Abstract

The presence of seismic threat multiplies the environmental hazard, especially for oil and gas production and transport facilities in water areas. Currently, there are no normative maps of general seismic zoning of the water areas of the inland and marginal seas of Russia, especially since there are practically no maps of detailed seismic zoning and seismic microzoning of even individual parts of the water areas. Taking into account the fact that intensive development of offshore oil and gas fields and the Northern Sea Route has begun, the development of such maps becomes a very urgent scientific and practical task. The seismic hazard assessment for the submerged crossing was carried out in 2008. The initial seismic effects were calculated using a probabilistic seismic hazard analysis based on five models of seismic zones and three types of models of attenuation of peak and spectral accelerations. The results of the performed calculations, including deaggregation, have shown that the initial seismicity of the area of the gas pipeline crossing route through the Nevelskoy Strait for a return period of 1,000 years is lower than indicated on the OSR-2016-B map, where the eastern end of the crossing route through the strait is characterized by the initial seismicity equal to 9 points. The soil conditions (seismic microzoning) have been taken into account by three different methods: the seismic rigidity method, the calculation method, and the method considering the thickness of Quaternary deposits. The present studies show that seismic effects vary along the pipeline route from the mainland to Sakhalin Island from 8.4 to 8.9 on the MSK-64 scale for the recurrence period of seismic shaking $T = 1,000$ years and from 9.3 to 9.7 points for $T = 5,000$ years.

For citation

Kovachev, S. A. et al. 2021. Seismic hazard assessment for the underwater gas pipeline route in the water area of the Nevelskoy Strait. *Vestnik of MSTU*, 24(1), pp. 14–34. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-14-34>.

Введение

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН выполнил комплекс исследований по сейсмическому микрорайонированию трассы перехода в его акватории в связи со строительством перехода магистрального газопровода "Сахалин – Хабаровск – Владивосток" через пролив Невельского.

Необходимая для расчетов сооружений на сейсмостойкость сейсмическая информация может быть получена в результате проведения трех видов работ: 1) общего сейсмического районирования (ОСР), 2) детального сейсмического районирования (ДСР) и 3) сейсмического микрорайонирования (СМР). В результате работ по ОСР и ДСР на основе анализа геолого-геофизических и сейсмологических данных должны быть выделены зоны возможных очагов землетрясений (зоны ВОЗ), оценен сейсмический режим в их пределах и определены параметры сотрясений для стандартного (базового) грунта. Сокращенный вариант ДСР (без проведения полевых работ) получил название УИС (уточнение исходной сейсмичности).

Основным недостатком действующих нормативных карт общего сейсмического районирования ОСР-2016¹ является полное отсутствие данных об интенсивности сейсмических сотрясений в акваториях внутренних и окраинных морей России в отличие от карт общего сейсмического районирования ОСР-97². Что касается морских нефтегазовых сооружений, то современная нормативная база, регламентирующая проектирование объектов нефтегазового комплекса³, содержит целый ряд противоречий (*Стром, 2015*), которые не позволяют однозначно определить критерии проектирования.

Отсутствие карт общего сейсмического районирования для акваторий морей России существенным образом затрудняет разработку карт детального сейсмического районирования и, тем более, сейсмического микрорайонирования отдельных участков шельфовых областей. С учетом того что началось интенсивное освоение морских месторождений нефти и газа и Северного морского пути, разработка таких карт становится весьма актуальной научно-практической задачей.

В настоящей работе изложены методы и результаты оценки сейсмической опасности для трассы морского газопровода, пересекающего Татарский пролив в его наиболее активной в сейсмическом отношении части (пролив Невельского).

Для акваторий при отсутствии донных сейсмографов детальное сейсмическое районирование по методике, описанной, например, в работе (*Казанцев и др., 1995*), выполнить невозможно. Донные сейсмографы позволяют обнаруживать ранее неизвестные особенности сейсмичности и тектоники в исследуемой акватории, которые существенным образом влияют на оценку сейсмической опасности (*Kovachev et al., 1992; Solov'ev et al., 1989; Kovachev и др., 1994; 2009; Соловьев и др., 1989*). Необходимо также учитывать цунамиопасность акватории, которая напрямую связана с сейсмической опасностью (*Кофф и др., 2007; Куликов и др., 2016*).

Исследуемая площадка строительства (трасса перехода) пересекает пролив Невельского в субширотном направлении. Трасса перехода имеет общую протяженность 23,2 км и включает в себя подводный переход через пролив Невельского протяженностью 21,0 км с отнесенными к нему сухопутными прибрежными участками протяженностью 1,8 км на материковом берегу и 0,4 км – на о. Сахалин. Средняя глубина заложения – 1,0 м (до верха трубы).

Для береговых примыканий перехода газопровода через пролив Невельского карты ОСР-2016⁴ дают три оценки исходной (фоновой) сейсмичности для условий стандартного (базового) грунта II категории:

- $I_{MSK} = 8$ баллов – при среднем периоде повторяемости $T = 500$ лет на западе и востоке;
- $I_{MSK} = 8-9$ баллов – при среднем периоде повторяемости $T = 1\ 000$ лет на западе и востоке;
- $I_{MSK} = 9-10$ баллов – при среднем периоде повторяемости $T = 5\ 000$ лет на западе и востоке.

Соотношение балльности I_{MSK} с величиной пиковых ускорений грунта (PGA или A_{max} в единицах g) имеет вид

$$\lg A_{max} = 2 + \lg 2 \times (I_{MSK} - 7). \quad (1)$$

¹ СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением № 1) / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2018.

² Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. 1999 г. Гл. редакторы: В. Н. Страхов, В. И. Уломов / Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. 4 листа. URL: http://neotec.ginras.ru/neomaps/M080_Russia_1997_Seism-region_Komplekt-kart-osr-97-territorii-rossiyskoy-federacii.html.

³ СП 358.1325800.2017 Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах / АО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева", 2018; СП 378.1325800.2017 Морские трубопроводы. Правила проектирования и строительства, 2017.

⁴ Пояснительная записка к комплекту карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122.

Учитывая повышенную ответственность объекта (две нитки газопровода, прокладываемые по дну пролива Невельского на протяжении 21 км), исходная (фоновая) сейсмичность района трассы перехода определялась в двух вариантах периода повторения сейсмических сотрясений: по карте ОСР-2016-В⁵ (8–9 баллов, $T = 1\,000$ лет) и по карте ОСР-2016-С⁶ (9–10 баллов, $T = 5\,000$ лет).

Вследствие мелкого масштаба карты ОСР-2016 в ней не могут быть отражены местные особенности возникновения и проявления землетрясений, важные для оценки ожидаемых сейсмических воздействий. Поэтому при проектировании ответственных сооружений на первом этапе проводится уточнение исходной (фоновой) сейсмичности района строительства (УИС), а на втором этапе выполняется сейсмическое микрорайонирование площадки (СМР) строительства.

Материалы и методы

В настоящей работе было выполнено уточнение исходной сейсмичности (УИС) района предполагаемого строительства трубопровода, которое основывалось на вероятностном анализе сейсмической опасности (ВАСО) по алгоритму, описанному в работе (*Bender et al., 1987*).

Входными данными для проведения ВАСО служат модели зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), модели повторяемости землетрясений разных магнитуд и модели затухания движений грунта (ускорения, скорости колебаний или баллов сотрясений) в зависимости от магнитуды землетрясения M и расстояния R до пункта наблюдения. Выходными результатами ВАСО обычно являются оценки максимальных амплитуд ускорений A_{\max} движения грунта при заданном периоде повторения T и/или оценки спектров реакции по ускорению $SA(\tau)$, моделирующих реакцию простых колебательных систем на внешние сейсмические воздействия.

Для вероятностного расчета сейсмической опасности использована программа SEISRISK III (*Bender et al., 1987*). В этой программе расчет величин ожидаемых максимальных ускорений на площадке производится по средним значениям логарифма ускорения $\ln A$. Разброс ускорений относительно их средних значений учитывается путем задания стандартного отклонения $\sigma_{\ln A}$ для $\ln A$. В программе рассчитывается среднегодовое число превышений $Ex(A_{\max})$ значения максимального ускорения A_{\max} для целого набора значений A_{\max} . Если задать вероятность $p(0, t)$ непревышения заданного уровня A_{\max} в течение определенного периода времени ожидания t , то искомое значение A_{\max} находится из уравнения

$$Ex(A_{\max}) = -\{\ln p(0, t)\} / t. \quad (2)$$

На входе программы SEISRISK III задается значение вероятности $p(0, t)$ и набор значений времени ожидания t , а соответствующие значения максимального ускорения A_{\max} находятся расчетным путем из уравнения (2). A_{\max} – максимальное ускорение, которое с вероятностью $p(0, t)$ не будет превышено в течение периода времени t .

Величина, обратная $Ex(A_{\max})$, имеет размерность времени и называется средним периодом $T(A_{\max})$ повторения движений грунта с максимальным ускорением A_{\max} на данной площадке. При обычно задаваемой вероятности $p(0, t) = 0,90$ (вероятность непревышения значения A_{\max} за время t составляет 90 %) расчет ожидаемых значений A_{\max} проводится для целого набора значений времен ожидания t или для набора значений среднего периода повторяемости $T(A_{\max})$. Это делается из-за того, что для разных объектов требуется определять максимальные ускорения движений грунта при различных значениях $T(A_{\max})$.

В данной работе вероятностный расчет значений A_{\max} проводился для 7 значений среднего периода повторяемости, однако в дальнейшем использовались значения A_{\max} для периодов повторяемости 1 000 и 5 000 лет.

По той же схеме, что и для максимальных ускорений A_{\max} , производится расчет ожидаемых спектров реакции $SA(\tau, 5\%)$ для линейных осцилляторов с 5%-м демпфированием (затуханием). В этом случае для каждой входной модели расчет повторяется для всех заданных периодов τ спектра. В результате расчетов получаем однородный спектр реакции $SA(\tau, 5\%)$, где τ – период колебаний частиц грунта для тех же значений средних периодов T повторяемости воздействий.

После завершения ВАСО полученные результаты расчетов обычно подвергаются процедуре так называемой деагрегации (*Bazzurro et al., 1999*). В результате деагрегации определяются основные параметры (магнитуда M_{II}^* и расстояние R^* до источника) таких сейсмических событий, которые вносят наибольший вклад в рассчитанные уровни сейсмических воздействий для исследуемой площадки или трассы.

⁵ Пояснительная записка к комплекту карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122.

⁶ Там же.

С помощью параметров M_{LH}^* и R^* в дальнейшем подбираются акселерограммы – аналоги из доступных банков или баз данных по сильным движениям грунта. Эти же значения основных параметров наиболее опасных для данной площадки землетрясений используются для моделирования ожидаемых колебаний на площадке вследствие землетрясений, т. е. для расчетов синтетических акселерограмм со спектром реакции, близким к расчетному $SA(\tau, 5\%)$.

Найденные акселерограммы-аналоги и рассчитанные синтетические акселерограммы далее могут непосредственно использоваться для моделирования поведения сооружения и для определения расчетных сейсмических нагрузок на стадии проектирования.

Входными данными для проведения вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) служат модели зон источников сотрясений (ВОЗ), модели повторяемости землетрясений в этих зонах и подходящие модели затухания для вычисляемых параметров движений грунта (ускорений или спектров реакции). Эти модели подготавливаются на основе анализа имеющихся геолого-геофизических и сейсмологических данных по исследуемому району.

В основе расчетов сейсмической опасности для конкретного района лежит сеймотектоническая модель – модель зон источников сейсмических колебаний (зон возможных очагов землетрясений), представляющих опасность для района площадки строительства.

Задачей создания сеймотектонической модели (сеймотектонического районирования) территории (акватории) является определение местоположения источников землетрясений и их сейсмических параметров. В сейсмоактивных областях различают сосредоточенную (структурированную) и рассеянную (диффузную) сейсмичность. Соответственно, при проведении ОСП территорий России (ОСП-97) и Северной Евразии⁷ в пределах крупного региона с его интегральной характеристикой сейсмического режима выделялись три группы источников землетрясений (сейсмоопасные зоны). Это – линеаменты, соответствующие зонам ВОЗ в их традиционном понимании, представляющие в генерализованном виде оси верхних кромок трехмерных сейсмоактивных разломных зон, отражающие структурированную сейсмичность и образующие основной каркас сеймотектонической модели; домены, сплошь покрывающие всю территорию, охватывающие квазигомогенные в тектоническом и геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся рассеянной (диффузной) сейсмичностью; потенциальные очаги землетрясений, указывающие на наиболее опасные участки и, как правило, приуроченные к линеаментным структурам. При сейсморайонировании территории России потенциальные очаги выделялись лишь в исключительных случаях.

Важнейшим параметром, характеризующим сейсмический источник, является максимальная возможная магнитуда землетрясений M_{max} и период ее повторяемости T_{max} . Эти характеристики различаются для разных интервалов времени, на чем основаны вероятностные оценки сейсмической опасности за разные периоды повторения сотрясений.

Оценка сейсмического потенциала зон ВОЗ, т. е. M_{max} и период их повторения T_{max} , производится по совокупности сейсмологических данных и геолого-геофизических сведений об активных разломах. Определяющей чаще является сейсмологическая оценка. Она основана, прежде всего, на изучении сейсмического режима, графика повторяемости землетрясений и формы его правого края, характеризующего сильные события.

В настоящей работе было использовано пять моделей зон возможных очагов землетрясений (зон ВОЗ):

- 1) **М-1** – модель зон ВОЗ, которая использовалась при составлении карты ОСП-97⁸;
- 2) **М-2** – модель зон ВОЗ для юга Дальнего Востока Л. С. Оскорбина (*Оскорбин, 1977; 1997*);
- 3) **М-3** – модель для района Северного и Среднего Сахалина, разработанная в 2003 г. в Институте морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН (рис. 1) (*Кочф и др., 2007*);
- 4) **М-4** – модель, представляющая собой модификацию модели 3 и учитывающая наличие активных разломов в акватории Татарского пролива;
- 5) **М-5** – модель, представляющая собой модификацию модели 3 с учетом рекомендаций, изложенных в отчете Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН⁹.

⁷ Уломов В. И., Шумилина Л. С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСП-97. М. 1:8 000 000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.

⁸ Там же.

⁹ Рогожин Е. А. и др. Сейсмическое микрорайонирование участка транспортного перехода через пролив Невельского в составе инженерно-геологических изысканий по объекту: "Строительство железнодорожной линии Сахалин – Ныш с переходом пролива Невельского". Транспортный переход через пролив Невельского. Отчет / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. 2018. ИФЗ-2018/08-701. 390 с.

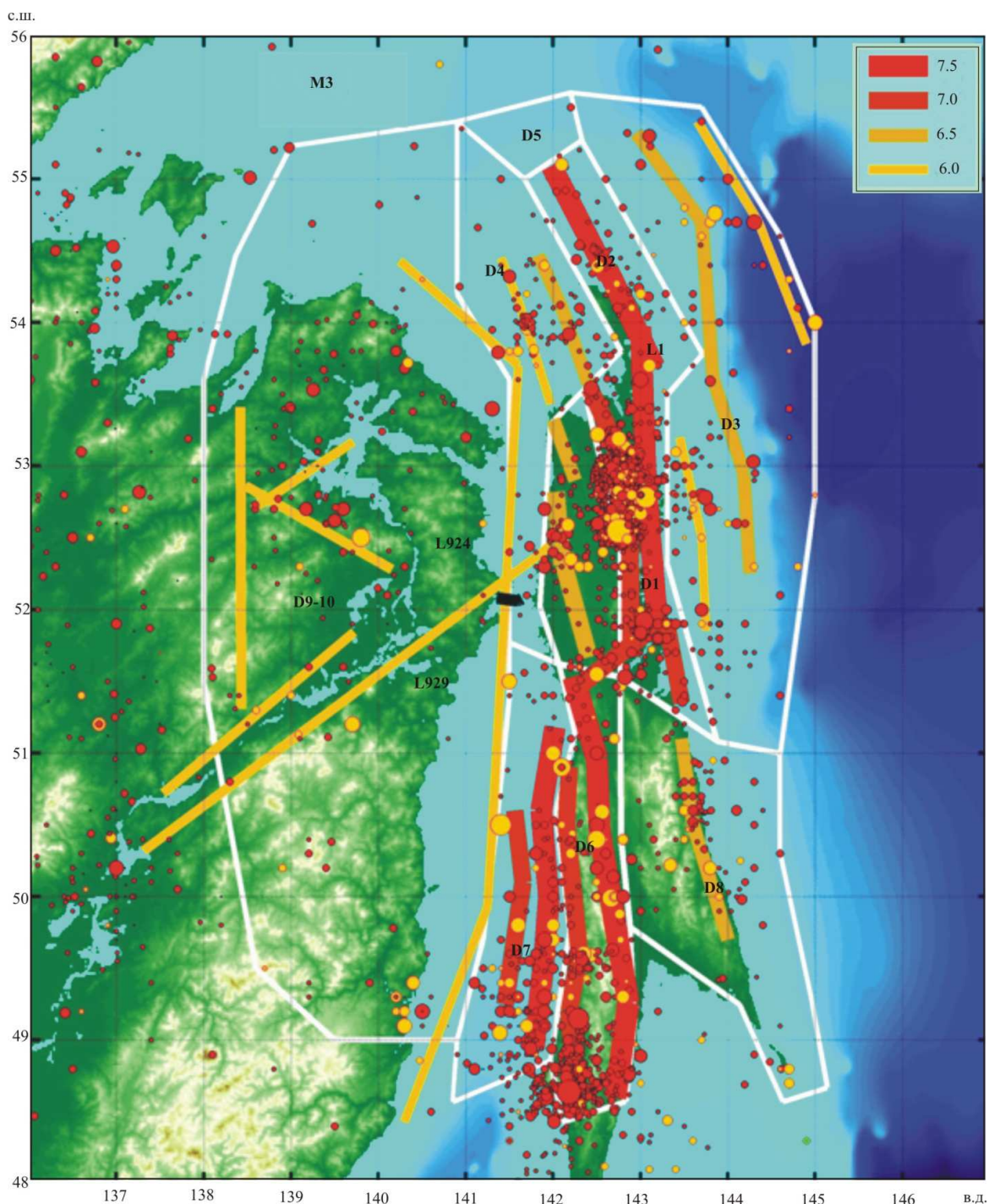


Рис. 1. Модель М-3 зон ВОЗ, разработанная в ИМГиГ (Ковф и др., 2007). Модель М-3 представляет собой дальнейшую детализацию модели М-1 для района о. Сахалин, выполненную для целей детального сейсмического районирования острова. В пределах материковой части рассматриваемой области выделена единая площадная зона ВОЗ, а линеаменты даны в соответствии с моделью М-1. Жирные линии – линеаменты; цвет линий и их толщина обозначают максимальную возможную магнитуду M_{\max} на линеаменте – разломе (см. легенду). Белые линии – границы площадных зон ВОЗ (доменов) с $M_{\max} < 6,0$. Черная линия – положение трассы перехода газопровода через пролив Невельского

Fig. 1. Model M-3 of seismic zones (possible sources of earthquakes) developed at IMGG (Koff et al., 2007). M-3 model is a further detailing of M-1 model for the Sakhalin region made for the purpose of detailed seismic zoning of the island. Within the continental part of the considered part, a single areal zone of the possible sources of earthquakes is identified, and the lineaments are given in accordance with M-1 model. Bold lines are lineaments; the color of the lines and their thickness indicate the maximum possible magnitude M_{\max} on the lineament – fault (see legend). White lines – borders of the possible sources of earthquakes areal zones (domains) with $M_{\max} < 6,0$. Black line – position of the gas pipeline crossing route through the Nevel'skoy Strait

М-1 – это линеаментно-доменная модель зон источников (зон ВОЗ), которая полностью следует идеологии, принятой при создании новой карты сейсмического районирования России (карты ОСР-97¹⁰).

В модели М-2 линеаменты не выделялись, в ней выделены только площадные зоны ВОЗ. Их подробная характеристика содержится в работах (*Оскорбин и др., 1997; Кофф и др., 2007*). Здесь приведены краткие данные только по 3 зонам ВОЗ, ближайшим к трассе перехода через пролив Невельского:

- *Нижне-Амурская сейсмогенная зона* охватывает ряд морфоструктур северной части Сихотэ-Алинской области поднятий и разделяющей их Удыль-Кизинской системы впадин. Наиболее сильное землетрясение с $M = 6,0$ произошло в 1914 г.

- *Сихотэ-Алинская (Сх-Ал) сейсмогенная зона* располагается полностью в пределах Сихотэ-Алинской геосинклинальной складчатой системы. Среди структур этой системы главное место занимают Сихотэ-Алинский антиклинорий и Сихотэ-Алинский синклинорий. Наиболее сильное землетрясение с $M_s = 4,7$ произошло в 1980 г.

- *Прибрежная Приморско-Приамурская (Пр-ПП) сейсмогенная зона* включает в себя: на юге – Прибрежный антиклинорий, на севере – узкую прибрежную полосу Сихотэ-Алинского синклинория, а также подводные структуры зоны сочленения горной системы Сихотэ-Алиня и бассейна Японского моря. Наиболее сильные сейсмические события – Ванинские землетрясения с $M_s = 4,7–5,0$ 1968 года.

М-3 была разработана в 2003 г. в ИМГиГ РАН, в основном для районов Северного и Центрального Сахалина (рис. 1). Характеристики зон ВОЗ приводятся в работе (*Кофф и др., 2007*):

D1 – северо-восток о. Сахалин. Площадная зона *D1* характеризуется наивысшей сейсмической активностью в пределах Северного Сахалина. Выделяемый внутри нее сейсмолинеамент *L1* отвечает осевой линии зоны активного скалывания шириной 20–25 км, протянувшейся в меридиональном направлении от района Набильского залива на юге до Охинского перешейка на севере.

D2 – полуостров Шмидта с прилегающим шельфом. Площадную зону *D2* можно рассматривать как северное продолжение зоны *D1*. Сейсмическая активность зоны *D2* достаточно высокая, но в отличие от зоны *D1* сильные исторические землетрясения здесь не регистрировались.

D3 – северо-восточный шельф о. Сахалин. Площадная зона *D3* включает в себя практически весь северо-восточный шельф о. Сахалин за исключением небольших участков, примыкающих к побережью и включенных в зоны *D1* и *D2*. По уровню сейсмической активности зона *D3* значительно уступает зонам *D1* и *D2*.

D4 – северо-западный шельф о. Сахалин. *D4* включает в себя две синклинальные зоны Татарского синклинория (Лангскую и Погибинскую), а также Поморскую синклинальную зону Байкальско-Нышского синклинория и восточную половину депрессии Сахалинского залива.

D5 – северо-запад о Сахалин. Площадная зона *D5* примыкает с запада к зоне *D1* и включает в себя в основном северное продолжение Западно-Сахалинского антиклинория и примыкающие к нему с востока и запада узкие участки синклинальных зон соответственно Байкальско-Нышского и Татарского синклинориев.

D6 – западная часть Центрального Сахалина. Площадная зона *D6* по уровню сейсмической активности сопоставима с зоной *D1*. Она включает в себя всю северную часть новообразованного Западно-Сахалинского поднятия, а также область контрастного сочленения структур поднятия с Тымь-Поронайской низменностью. Выделяемый в пределах зоны *D6* сейсмолинеамент *L6* – это осевая линия Центрально-Сахалинской (другое название – Тымь-Поронайской) зоны.

D7 – западный шельф Центрального Сахалина. Площадная зона *D7* охватывает западный шельф о. Сахалин, традиционно отличающийся высокой сейсмической активностью, практически такой же, как в зоне *D6*. Но в отличие от последней, *D7* включает структуры Татарского синклинория с наибольшими значениями амплитуд неотектонических опусканий.

D8 – восточная часть Центрального Сахалина и прилегающий шельф. Площадная зона *D8* включает в себя весь видоизмененный реликтовый Восточно-Сахалинский антиклинорий с п-овом Терпения, а также часть Тымь-Поронайского синклинория на западе и прилегающий участок шельфа на востоке и отличается низкой сейсмической активностью. В этой зоне зарегистрировано лишь одно землетрясение с магнитудой $M_{LN} = 5,0$.

D9-D10 – область материка с прилегающим шельфом. Зоны источников в пределах интересующей нас области материка можно приближенно охарактеризовать с помощью двух площадных зон (доменов): *D9* – в прибрежной части материка и *D10* – в области нижнего течения Амура. Учитывая, что максимальная магнитуда фоновых землетрясений в пределах доменов *D9* и *D10* одна и та же ($M = 5,5$), мы объединили эти домены в единую площадную зону *D9-D10*.

¹⁰ Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. 1999 г. Гл. редакторы: В. Н. Страхов, В. И. Уломов / Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. 4 листа. URL: http://neotec.ginras.ru/neomaps/M080_Russia_1997_Seism-region_Komplekt-kart-osr-97-territorii-rossiyskoy-federacii.html.

Наибольшую опасность для объектов трубопровода на трассе перехода представляют сильные землетрясения, которые могут возникнуть на сейсмолинеаментах $L924$ и $L929$ (рис. 1).

Модели М-4 и М-5 представляют собой модификацию модели М-3, выполненную с учетом мнения экспертов-геологов о возможном продолжении активных разломов из зоны Татарского пролива далее на север, под пролив Невельского, высказанные в отчете по активным разломам¹¹ и в отчете ИФЗ РАН¹².

Каждой из охарактеризованных выше моделей зон ВОЗ необходимо сопоставить графики повторяемости землетрясений разных магнитуд. Разумеется, что в разных моделях зон ВОЗ графики (или уравнения) повторяемости землетрясений разные. Так, в модели М-1 (ОСР-97¹³) графики повторяемости (зависимость числа землетрясений определенного магнитудного интервала в год от магнитуды) – это нелинейные зависимости $\lg(n)$ от M в области магнитуд $M \geq 6$. Тогда как в модели М-2 зон ВОЗ Л. С. Оскорбина эти зависимости линейны во всем диапазоне изменения магнитуд, т. е. имеют вид графика Гуттенберга – Рихтера.

Графики повторяемости землетрясений для второй модели зон ВОЗ заимствованы из работы (Оскорбин и др., 1997), где они вычислялись по данным многолетних наблюдений для всех зон ВОЗ Приморья, Приамурья и о. Сахалин. Для моделей 3, 4 и 5 графики повторяемости рассчитывались в виде комбинации усеченного экспоненциального распределения Гуттенберга – Рихтера – для площадных зон ВОЗ и так называемого "характеристического" распределения – для сейсмолинеаментов (рис. 2).

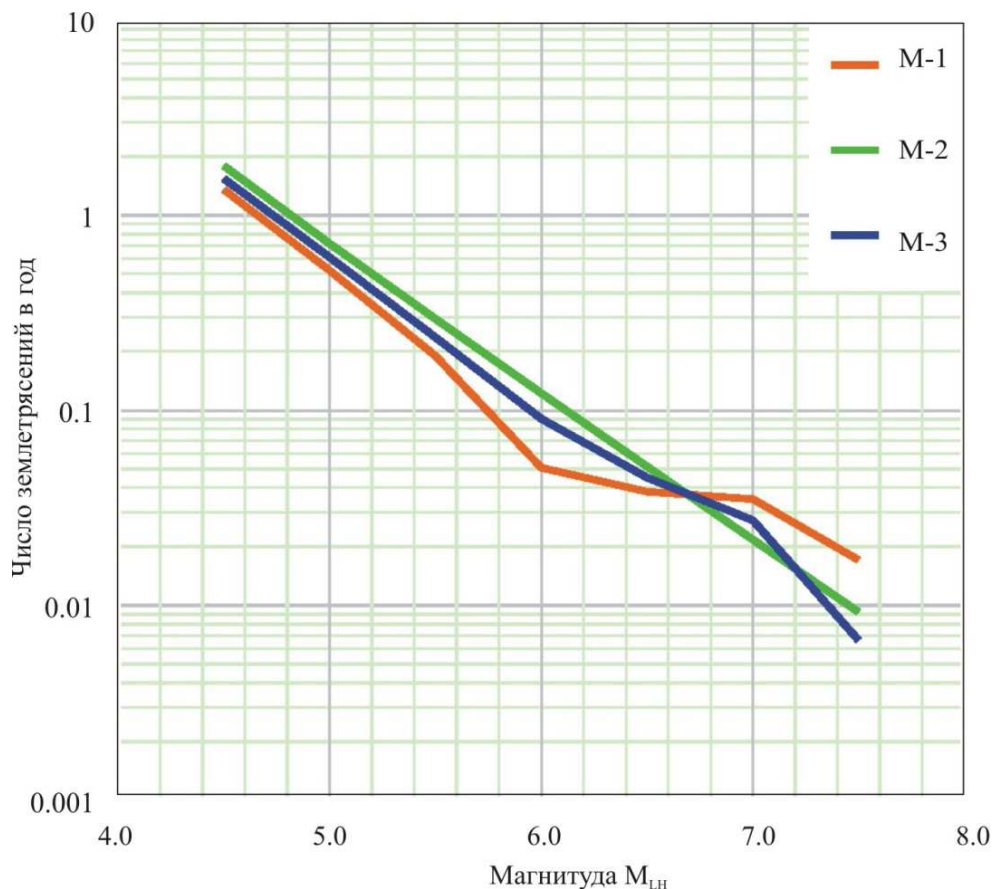


Рис. 2. Графики повторяемости землетрясений для вариантов моделей зон ВОЗ о. Сахалин и примыкающих районов

Fig. 2. Plot of earthquake recurrence for variants of models of seismic zones for Sakhalin and adjacent areas

¹¹ Стром А. Л. и др. Выявление и картирование активных тектонических разломов (сейсмогенных разрывных смещений и сейсмоактивных тектонических разломов в районе пролива Невельского). Отчет / Институт океанологии им. П. П. Ширшова. 2009. 28 с.

¹² Рогожин Е. А. и др. Сейсмическое микрорайонирование участка транспортного перехода через пролив Невельского в составе инженерно-геологических изысканий по объекту: "Строительство железнодорожной линии Сахалин – Ныш с переходом пролива Невельского". Транспортный переход через пролив Невельского. Отчет / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. 2018. ИФЗ-2018/08-701. 390 с.

¹³ Уломов В. И., Шумилина Л. С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. М. 1:8 000 000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М. : ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.

В принципе для расчетов сейсмической опасности по максимальным ускорениям грунта для всех моделей зон ВОЗ можно использовать одну и ту же модель затухания движений грунта, например модель, принятую для всей Северной Евразии при создании карты ОСР-97 (Гусев и др., 1999) (рис. 3).

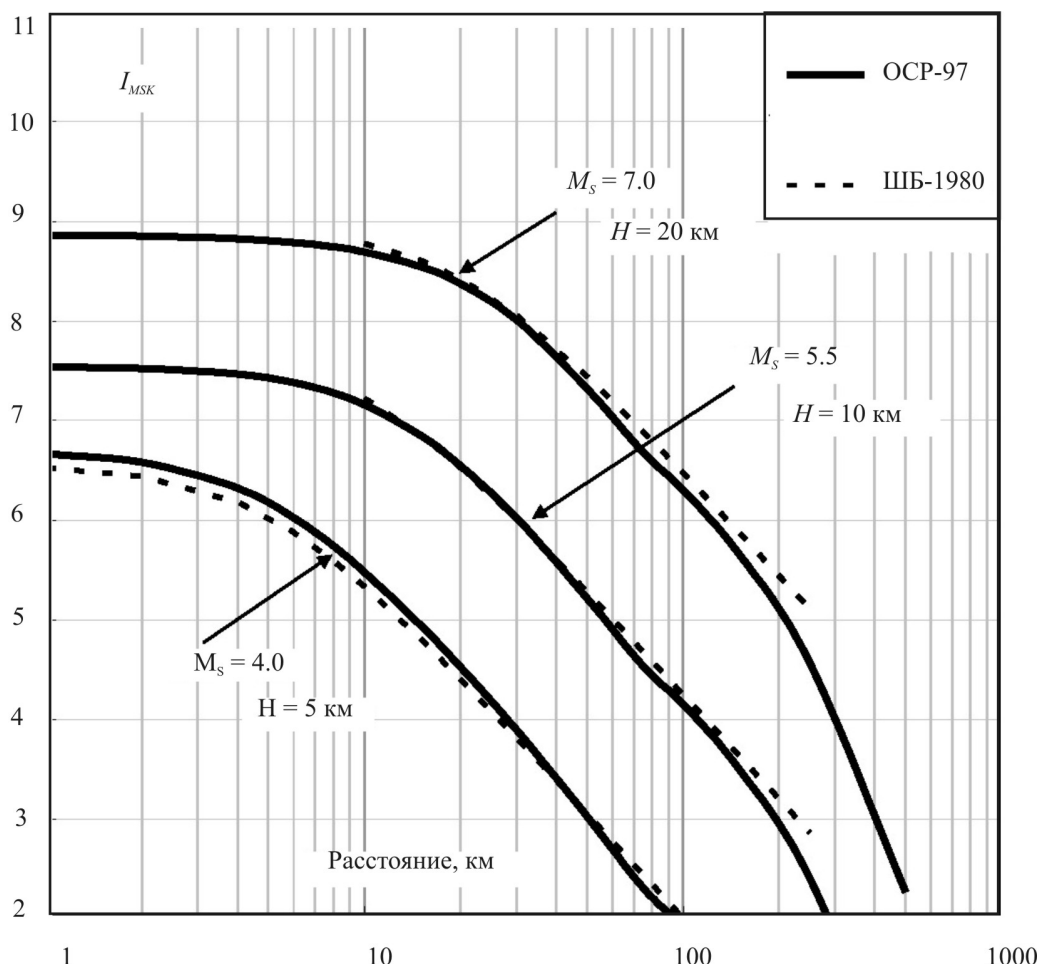


Рис. 3. Спадание балльности с расстоянием в модели затухания для Северной Евразии, принятой при составлении карты ОСР-97 (Гусев и др., 1999). Пунктирными линиями показаны кривые затухания балльности, рассчитанные для тех же значений параметров очага по формуле Н. В. Шебалина. M_S – магнитуда землетрясений, определяемая по поверхностным волнам.

M_{LH} – российский вариант шкалы M_S . I_{MSK} – балльность сейсмических сотрясений
 Fig. 3. Decay of the seismic intensity with distance in the attenuation model for Northern Eurasia used when compiling the OSR-97 map (Gusev et al., 1999). The dashed lines show the attenuation curves of the seismic intensity calculated for the same values of the source parameters according to the formula of N. V. Shebalin. M_S is the magnitude of earthquakes determined from surface waves. M_{LH} – the Russian version of the M_S scale. I_{MSK} – the seismic intensity

Для района о. Сахалин макросейсмических данных вполне достаточно для построения регионального уравнения затухания балльности с расстоянием, что и было сделано в работе (Оскорбин, 1977):

$$I_{MSK} = 1,6 M_{LH} - 4,3 \cdot \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3,3, \quad (3)$$

Для описания имеющихся данных макросейсмических наблюдений в регионе Приамурья Н. В. Шебалиным (СП-78, 1980) предложено другое уравнение (рис. 3):

$$I_{MSK} = 1,5 M_{LH} - 3,5 \cdot \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3,0, \quad (4)$$

которое в целом не противоречит принятой позднее модели затухания балльности для всей Северной Евразии (Гусев и др., 1999).

В уравнениях 3, 4 – Δ – эпицентральное расстояние в км, h – глубина очага землетрясения в км.

Различие между этими двумя уравнениями состоит в том, что коэффициент, определяющий спадание балльности с расстоянием, оказывается заметно больше по абсолютной величине для о. Сахалин (4,3),

чем для Приамурья и всей Северной Евразии (3,5). Это означает, что на о. Сахалин спадание балльности (соответственно, пиковых ускорений грунта) с расстоянием происходит гораздо быстрее, чем на материке, что можно объяснить различиями в геологическом строении, возрасте и вещественном составе пород, слагающих земную кору в этих регионах. Это означает также, что уравнение затухания для Северной Евразии не вполне подходит для расчетов сейсмической опасности на о. Сахалин, так как оно будет приводить к некоторому завышению опасности.

В то же время в результате многолетних работ по шельфовым проектам о. Сахалин выяснилось, что для описания затухания интенсивности сотрясений грунта на о. Сахалин хорошо подходят уравнения, разработанные для Калифорнии и других тектонически активных регионов земного шара, кроме зон субдукции и стабильных континентальных районов. Сравнение калифорнийских моделей и модели для Северной Евразии с наблюдениями на о. Сахалин показано на рис. 4 на примере данных по затуханию интенсивности после Нефтегорского землетрясения 1995 г. Видно, что калифорнийские модели лучше описывают сахалинские наблюдения, чем обобщенная модель затухания для Северной Евразии. Уравнение для Северной Евразии предсказывает значения I_{MSK} в интервале магнитуд $M_{LH} \geq 6$, которые на 0,4–0,5 балла больше, чем реально наблюдаемые на о. Сахалин.

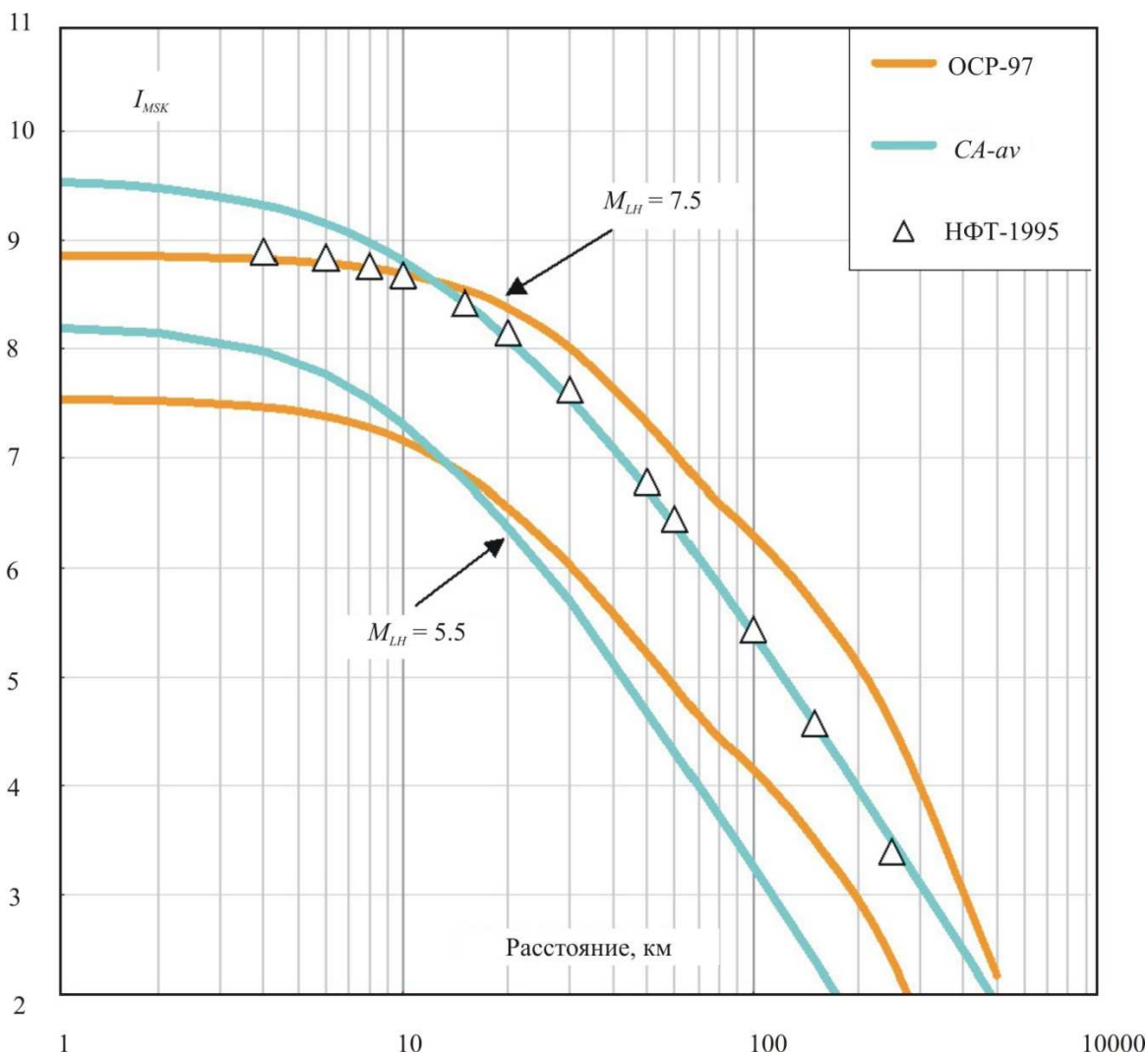


Рис. 4. Сравнение данных наблюдений на о. Сахалин по затуханию сейсмической интенсивности I_{MSK} с расстоянием с моделями затухания для Северной Евразии (ОСР-97), Калифорнии (CA_{av}) и Нефтегорска (НФТ-1995)

Fig. 4. Comparison of observation data on Sakhalin on attenuation of seismic intensity I_{MSK} with distance with attenuation models for Northern Eurasia (OSR-97), for California (CA_{av}) and Neftegorsk (NFT-1995)

С учетом вышесказанного были использованы 3 вида моделей затухания пиковых и спектральных ускорений движения грунта (рис. 5): а) модель для Северной Евразии (Гусев и др., 1999); б) три модели затухания, разработанные для Калифорнии и других тектонически активных регионов земного шара: A&S, CAM, SAD (Abrahamson et al., 1993; Campbell et al., 2003; Sadigh et al., 1997); в) модель затухания,

предложенная в работе (Аптикаев и др., 2002), разработанная на основе анализа общемировых данных по сильным движениям грунта (АПТ на рис. 5).

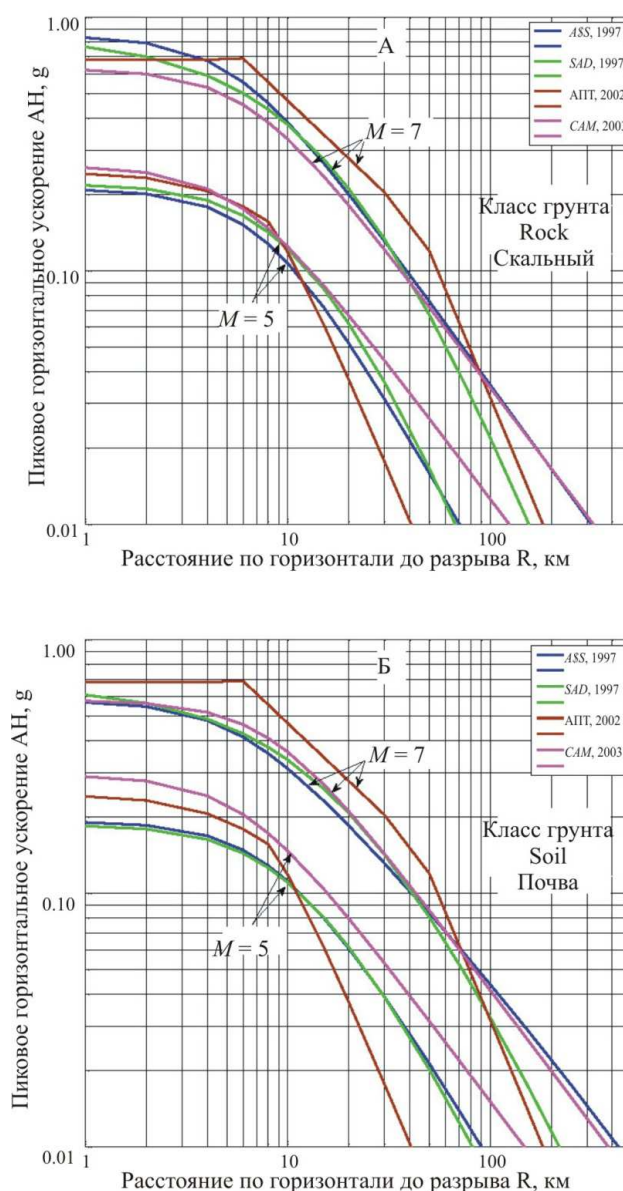


Рис. 5. Модели затухания пиковых ускорений с расстоянием R , которые использовались в данной работе для расчетов сейсмической опасности трассы перехода газопровода через пролив Невельского (Abrahamson et al., 1993; Campbell et al., 2003; Sadigh et al., 1997). Для сравнения показана также модель АПТ (Аптикаев и др., 2002), которая также использовалась нами в расчетах. А – для скального грунта, Б – для грунта второй категории в соответствии со СНиП II-7-81*¹⁴

Fig. 5. Models of the attenuation of peak accelerations with distance R used in this work to calculate the seismic hazard of the pipeline crossing the Nevelskoy Strait (Abrahamson et al., 1993; Campbell et al., 2003; Sadigh et al., 1997). For comparison, the model from the paper (Aptikaev et al., 2002) also used in our calculations is shown. A – for rock, B – for soil of the second category in accordance with SNiP II-7-81*

Результаты и обсуждение

Расчеты сейсмической опасности по программе SEISRISK III проведены для 22 точек, выбранных с равномерным шагом 1 км по всей длине трассы перехода, включая оба наземных конца трассы.

Расчеты пиковых ускорений выполнялись для всех 5 моделей зон ВОЗ, описанных выше, в сочетании с соответствующими им графиками повторяемости землетрясений и для всех принятых моделей затухания пиковых и спектральных ускорений движения грунта.

¹⁴ СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением N 1) / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2018.

Расчеты спектральных ускорений проводились по 3 оптимальным моделям зон ВОЗ и 3 моделям затухания амплитуд спектров реакции с 5%-м демпфированием (затуханием). Таким образом, для каждой из 22 расчетных точек и для каждого из 7 периодов повторяемости T (от 200 до 5 000 лет) было получено по 20 оценок пиковых ускорений и по 9 оценок амплитуд спектров реакции с 5%-м затуханием на спектральных периодах от 0,01 до 4,0 сек, т. е. во всем частотном диапазоне возможных сейсмических воздействий.

Все расчеты проводились для базового грунта класса SOIL (осадочные породы), примерно отвечающего грунту II категории по классификации СНиП II-7-81*. Все полученные расчетные значения ускорений и амплитуд спектров реакции с 5%-м затуханием следует относить к указанному далее на рисунках и в таблицах типу базового грунта (II категории по СНиП II-7-81*). Учитывая значительные мощности осадочных отложений в исследуемом районе, мы полагаем, что этот тип грунта может служить в качестве опорного для проведения работ по СМР трассы.

Расчеты пиковых и спектральных ускорений дают далеко не идентичные результаты для 22 выбранных точек. Наибольшие и наименьшие расчетные значения параметров по трассе могут отличаться до 25 %. Различия в полученных значениях ускорений и амплитуд спектров реакции между точками превышают погрешности метода, поэтому далее все результаты мы приводим, как правило, для нескольких точек. В качестве характерных точек выбрано 4 точки, расположенные по трассе с шагом 7 км друг от друга: № 1 (крайнюю восточную точку), № 8, 15 и 22 (крайнюю западную точку).

Прежде всего, поскольку при использовании множества альтернативных входных моделей мы получаем не одну оценку параметра (ускорения или амплитуды спектра реакции), а целое распределение оценок, продемонстрируем, как выглядит это распределение.

В подавляющем большинстве случаев оно имеет вид, показанный на рис. 6. Каждая входная расчетная модель представляет собой комбинацию из модели зон ВОЗ плюс модель затухания PGA (пиковое ускорение грунта). В предварительных расчетах использовано 5 альтернативных моделей зон ВОЗ и 5 различных моделей затухания, что дает 25 различных моделей для вероятностного расчета сейсмической опасности. Распределение получаемых оценок PGA по совокупности всех 25 моделей показано желтым цветом. В окончательных расчетах использовалось от 9 до 15 наиболее реалистичных и дающих внутренне согласованные результаты моделей, которые мы назвали оптимальными моделями (распределение оценок для случая из 15 оптимальных моделей показано на рис. 6 голубым цветом).

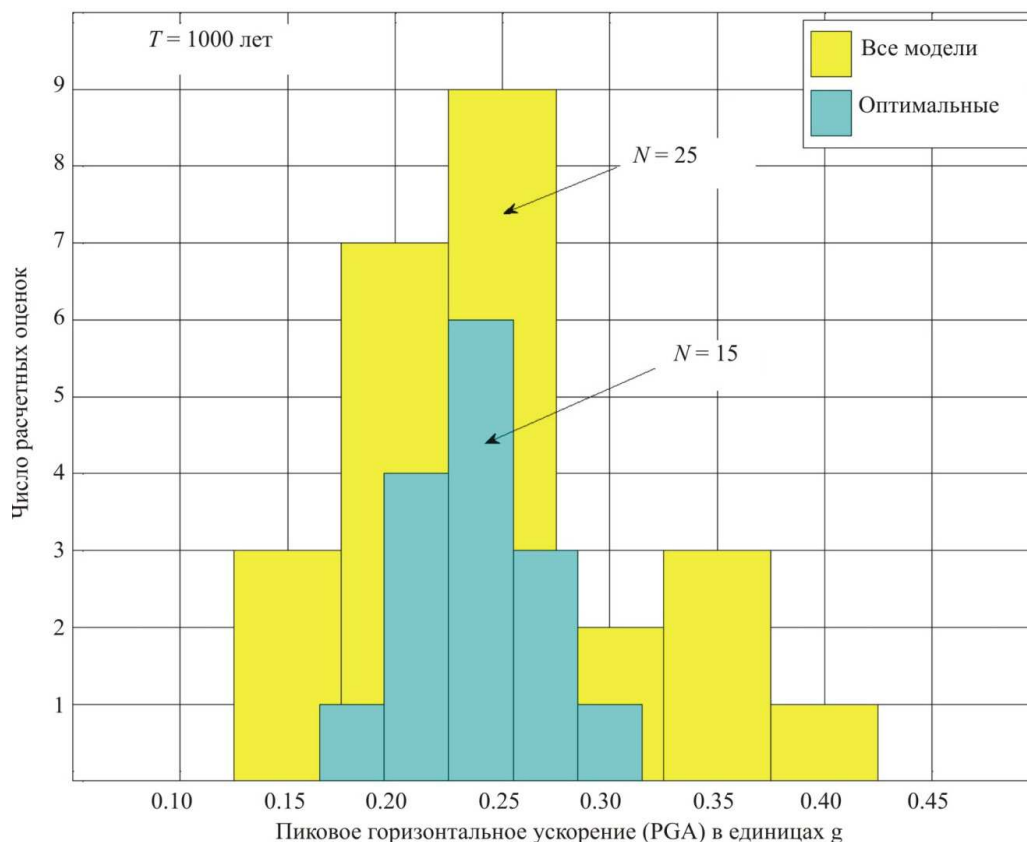


Рис. 6. Типичный вид распределения расчетных оценок пикового ускорения PGA для двух наборов входных расчетных моделей

Fig. 6. Typical distribution of the calculated peak acceleration PGA estimates for two sets of input calculation models

Нас интересуют две оценки – среднее по распределению и дисперсия. Видно, что оценка среднего расчетного значения PGA по двум этим распределениям практически одна и та же, тогда как дисперсия существенно меньше при использовании только оптимальных моделей. Проведя серию предварительных расчетов, мы убедились в том, что аналогичная картина наблюдается и в остальных случаях почти без исключений.

В численном виде расчеты были выполнены по нескольким точкам для 7 значений периодов повторяемости T (от 200 до 5 000 лет). Данные значений A_{\max} или PGA (пиковое ускорение) для $T = 1\,000$ лет представлены в табл. 1 (точки № 1, 8, 15 и 22). Здесь же приводятся рассчитанные значения макросейсмической интенсивности I_{MSK} . Значения I_{MSK} получены пересчетом из вычисленных значений A_{\max} по формуле (1), основанной на рекомендациях СНиП II-7-81*. Пересчет ускорений в балльность по этой формуле дает наибольшие значения по сравнению со всеми другими рекомендуемыми формулами. Данные значений A_{\max} и I_{MSK} для $T = 5\,000$ лет представлены в табл. 2.

Таблица 1. Расчетные оценки сейсмической опасности для трассы перехода газопровода через пролив Невельского. Точки № 1, 8, 15, 22. Базовый грунт II категории по СНиП II-7-81*.

В единицах пикового горизонтального ускорения грунта A_{\max} (g)
и в баллах шкалы МСК-64 I_{MSK} (баллы) для периода повторения 1 000 лет

Table 1. Estimated seismic hazard values for the route of the gas pipeline crossing through the Nevelskoy Strait. Points No. 1, 8, 15, 22. Basic soil of category II according to SNiP II-7-81*.

In units of the geometric mean peak ground acceleration A_{\max} (g) and in points of the MSK-64 I_{MSK} scale (points) for a return period of 1,000 years

Модель зон ВОЗ	Модель затухания	Период повторения 1 000 лет			
		№ 1 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$	№ 8 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$	№ 15 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$	№ 22 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$
М-1 (ОСР-97)	A&S	0,213/8,2	0,211/8,2	0,212/8,2	0,208/8,2
	CAM	0,191/8,1	0,193/8,1	0,196/8,1	0,194/8,1
	SAD	0,200/8,2	0,200/8,2	0,201/8,2	0,197/8,1
	АПТ	0,189/8,1	0,189/8,1	0,191/8,1	0,189/8,1
М-2 (Оскорбин, 1997)	A&S	0,182/8,0	0,163/7,9	0,158/7,8	0,159/7,8
	CAM	0,155/7,8	0,136/7,6	0,132/7,6	0,136/7,6
	SAD	0,172/7,9	0,151/7,7	0,145/7,7	0,146/7,7
	АПТ	0,159/7,8	0,131/7,5	0,127/7,5	0,132/7,6
М-3 (ИМГиГ, 2003)	A&S	0,236/8,4	0,227/8,3	0,207/8,2	0,184/8,0
	CAM	0,219/8,3	0,211/8,2	0,185/8,0	0,158/7,8
	SAD	0,230/8,4	0,220/8,3	0,199/8,1	0,173/7,9
	АПТ	0,237/8,4	0,229/8,3	0,203/8,2	0,176/8,0
М-4 (М-3 + разлом с $M_{\max} = 7,0$)	A&S	0,344/8,9	0,315/8,8	0,264/8,6	0,221/8,3
	CAM	0,322/8,8	0,288/8,7	0,231/8,4	0,185/8,0
	SAD	0,336/8,9	0,307/8,8	0,260/8,5	0,215/8,3
	АПТ	0,411/9,2	0,370/9,0	0,304/8,8	0,249/8,5
М-5 (М-3 + разлом с $M_{\max} = 5,5$)	A&S	0,272/8,6	0,255/8,5	0,221/8,3	0,191/8,1
	CAM	0,260/8,5	0,238/8,4	0,197/8,1	0,163/7,9
	SAD	0,263/8,5	0,246/8,5	0,214/8,2	0,182/8,0
	АПТ	0,292/8,7	0,269/8,6	0,221/8,3	0,178/8,0
Среднее по всем		0,244/8,4	0,227/8,3	0,203/8,2	0,182/8,0
Станд. отклонение		0,069/0,4	0,062/0,4	0,043/0,3	0,029/0,2
Среднее по выделенным		0,232/8,4	0,222/8,3	0,204/8,2	0,183/8,0
Станд. отклонение		0,029/0,2	0,021/0,1	0,011/0,1	0,016/0,1

Примечания. 1. Характеристики зон ВОЗ приведены выше.

2. Модели затухания: A&S (Abrahamson et al., 1993); CAM (Campbell et al., 2003); SAD (Sadigh et al., 1997); АПТ (Антюкаев и др., 2002).

3. Жирным шрифтом выделены модели, для которых проводился расчет спектров реакции.

Таблица 2. Расчетные оценки сейсмической опасности для трассы перехода газопровода через пролив Невельского. Точки № 1, 8, 15, 22. Базовый грунт II категории по СНиП II-7-81*.

В единицах среднегеометрического пикового горизонтального ускорения грунта $A_{\max}(g)$ и в баллах шкалы МСК-64 I_{MSK} (баллы) для периода повторения 5 000 лет

Table 2. Estimated seismic hazard values for the route of the gas pipeline crossing through the Nevelskoy Strait. Points No. 1, 8, 15, 22. Basic soil of category II according to SNiP II-7-81*.

In units of the geometric mean peak horizontal ground acceleration $A_{\max}(g)$ and in points of the MSK-64 I_{MSK} scale (points) for a return period of 5,000 years

Модель зон ВОЗ	Модель затухания	Период повторения 5 000 лет			
		№ 1 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$	№ 8 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$	№ 15 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$	№ 22 $A_{\max}(g)/I_{MSK}$
М-1 (ОСР-97)	A&S	0,335/8,9	0,342/8,9	0,357/9,0	0,349/9,0
	CAM	0,308/8,8	0,318/8,8	0,337/8,9	0,326/8,9
	SAD	0,320/8,8	0,328/8,9	0,343/8,9	0,336/8,9
	АПТ	0,317/8,8	0,334/8,9	0,365/9,0	0,352/9,0
М-2 (Оскорбин, 1997)	A&S	0,287/8,7	0,254/8,5	0,258/8,5	0,273/8,6
	CAM	0,245/8,4	0,207/8,2	0,220/8,3	0,244/8,4
	SAD	0,275/8,6	0,241/8,4	0,244/8,4	0,261/8,5
	АПТ	0,281/8,6	0,238/8,4	0,253/8,5	0,279/8,6
М-3 (ИМГиГ, 2003)	A&S	0,375/9,1	0,383/9,1	0,392/9,1	0,356/9,0
	CAM	0,345/8,9	0,352/9,0	0,356/9,0	0,307/8,8
	SAD	0,365/9,0	0,371/9,0	0,381/9,1	0,346/8,9
	АПТ	0,379/9,1	0,401/9,2	0,457/9,3	0,409/9,2
М-4 (М-3 + разлом с $M_{\max} = 7,0$)	A&S	0,703/10,0	0,591/9,7	0,489/9,4	0,402/9,2
	CAM	0,637/9,8	0,515/9,5	0,422/9,2	0,333/8,9
	SAD	0,695/9,9	0,578/9,7	0,488/9,4	0,399/9,1
	АПТ	0,864/10,3	0,711/10,0	0,583/9,7	0,464/9,4
М-5 (М-3 + разлом с $M_{\max} = 5,5$)	A&S	0,457/9,3	0,429/9,3	0,405/9,2	0,360/9,0
	CAM	0,442/9,3	0,390/9,1	0,362/9,0	0,308/8,8
	SAD	0,439/9,3	0,414/9,2	0,394/9,1	0,350/9,0
	АПТ	0,497/9,5	0,449/9,3	0,459/9,4	0,408/9,2
Среднее по всем		0,428/9,3	0,392/9,1	0,378/9,1	0,343/8,9
Станд. отклонение		0,170/0,5	0,128/0,5	0,092/0,4	0,056/0,2
Среднее по выделенным		0,376/9,1	0,370/9,0	0,370/9,0	0,338/8,9
Станд. отклонение		0,056/0,2	0,038/0,1	0,024/0,1	0,020/0,1

Анализ этих результатов показывает, что среднее значение PGA (или A_{\max}) определяется достаточно надежно и характеризуется сравнительно небольшим разбросом, если его определять по выборке из 9 наиболее реалистичных (оптимальных) входных моделей. В число оптимальных моделей мы включили модели М-1, М-3 и М-5 зон ВОЗ и модели A&S, CAM и SAD затухания пиковых и спектральных ускорений, разработанные для Калифорнии и других тектонически активных регионов земного шара. Все эти модели хорошо согласуются друг с другом и дают близкие результаты.

Модель М-2 зон ВОЗ в сочетании с любыми моделями затухания систематически дает оценки PGA ниже среднего значения по всей выборке, а модель М-4 в таких же сочетаниях – систематически выше среднего по выборке из всех моделей, поэтому мы исключили обе эти модели из окончательного расчета пиковых и спектральных ускорений. Модель затухания АПТ (Антикаев и др., 2002) в сочетании с различными моделями зон ВОЗ дает результаты, близкие к среднему по выборке из всех моделей для периода повторяемости $T = 1\ 000$ лет, но для других значений периодов повторяемости полученные с ее помощью оценки заметно отклоняются от средних значений. Поэтому модель АПТ также была исключена из окончательных расчетов.

В соответствии с проведенным отбором оптимальных моделей окончательные расчеты проводились по 9 сочетаниям из моделей М-1, М-3 и М-5 зон ВОЗ и моделей A&S, CAM и SAD затухания пиковых и спектральных ускорений.

Оказалось, что на западном конце трассы значения A_{\max} примерно на 20 % ниже, чем на восточном конце.

Деагрегация результатов расчетов сейсмической опасности имеет целью выяснить, землетрясения какой магнитуды M и на каком расстоянии R от исследуемой трассы перехода вносят наибольший вклад

в расчетные значения пиковых и спектральных ускорений по трассе (*Bazzurro et al., 1999*). Чтобы выяснить влияние всех входных параметров на итоговые оценки значений M и R для всех выбранных точек на трассе, нужно провести тысячи отдельных расчетов: 22 точки на трассе; 3 модели зон ВОЗ; 3 модели затухания; 7 значений периода повторяемости T ; 20 значений спектрального периода τ . Невозможно в сжатом виде представить результаты этих расчетов, поэтому мы ограничимся отдельными наиболее выразительными примерами.

Общий вывод из анализа результатов проведенной деагрегации состоит в том, что опасность для разных точек трассы перехода газопровода через пролив Невельского обусловлена землетрясениями с очень широким набором основных параметров M и R . Тем не менее все потенциально опасные события для трассы перехода можно, по-видимому, разделить на три основные группы:

- 1) местные толчки умеренной силы ($M = 4,5-5,5$) на расстояниях $R = 5-10$ км;
- 2) довольно сильные землетрясения ($M = 6,0-6,5$) на расстояниях $R = 10-40$ км;
- 3) очень сильные землетрясения ($M = 7,0-7,5$) на расстояниях $R = 70-100$ км.

Наибольшая опасность для трассы перехода через пролив, скорее всего, исходит от потенциально возможных событий второй группы. Это подтверждается и расчетами по программе SEISRISK III и результатами деагрегации этих расчетов: ближайшие к трассе линеаменты – разломы характеризуются значениями $M_{\max} = 6,0-6,5$ и на этот же диапазон магнитуд приходится большая часть значений M для опасных событий, определяемых по результатам деагрегации расчетов сейсмической опасности.

Вероятность возникновения событий первой группы ($M = 4,5-5,5$) в непосредственной близости от трассы перехода в целом ниже. Хотя они повторяются чаще, чем землетрясения с $M = 6,0-6,5$, но они распределены в значительно более широкой области площадной зоны ВОЗ. Землетрясения третьей группы происходят гораздо реже, к тому же соответствующие линеаменты удалены на значительное расстояние от трассы (70–100 км). Основной вклад этих событий в сейсмическую опасность для трассы перехода проявляется только в низкочастотной области спектра – на периодах спектра $\tau \geq 1$ сек (рис. 7).

Исходя из результатов деагрегации расчетных значений пиковых и спектральных ускорений, можно моделировать характер ожидаемых колебаний грунта, т. е. рассчитывать синтетические акселерограммы.

Для моделирования характера ожидаемых движений грунта на исследуемом объекте существуют различные методы (например, *Штейнберг и др., 1993*). Одним из наиболее полезных для целей проектирования является метод расчета синтетических (искусственных) сейсмограмм (в ускорениях, скоростях и смещениях), спектр реакции которых совпадает с расчетным.

Метод расчета (*Sabetta et al., 1996*) основан на суммировании ряда Фурье, состоящего из синусоидальных колебаний с амплитудами, изменяющимися по логнормальному закону во времени и по частоте, и со случайными фазами, равномерно распределенными в интервале $[0, 2\pi]$. Основная трудность состоит в адекватном выборе закона распределения изменяющихся во времени амплитуд отдельных гармоник по частотам спектра. Вид закона распределения известен (он близок к логнормальному), однако его параметры зависят от целого ряда факторов: магнитуды землетрясения M , расстояния R от источника колебаний до пункта наблюдений, типа грунта, механизма очага землетрясения. В упомянутой статье зависимость этих параметров от названных факторов исследована на примере базы данных по сильным движениям грунта в Италии, в результате чего построены корреляционные зависимости параметров от различных влияющих факторов. Мы приняли эту методику и построенные корреляционные зависимости за основу для расчета синтетических акселерограмм для исследуемой трассы перехода.

В результате предварительных расчетов корреляционные зависимости были несколько модифицированы, чтобы учесть различия в затухании сейсмических колебаний и в распределении энергии колебаний по частотам между районами о. Сахалин – Нижнее Приамурье и Италии. Для района Приамурья закон затухания принят таким же, как в модели затухания для Северной Евразии, использованной при построении карты ОСР-97. Для о. Сахалин использовались зависимости, полученные для Калифорнии, которые хорошо описывают данные наблюдений на о. Сахалин по затуханию макросейсмической интенсивности с расстоянием. Кроме того, учитывались эмпирические зависимости для уровня и продолжительности интенсивных колебаний, рекомендованные в работе (*Антикаев и др., 2002*). Все это позволило построить синтетические акселерограммы для наиболее опасных землетрясений в районе трассы со спектром реакции, достаточно близким к расчетному спектру.

Для СМР (учет грунтовых условий) использованы три метода: метод сейсмических жесткостей, расчетный метод и метод оценки приращения балльности по мощности четвертичных отложений.

По данным инженерно-геологических и геофизических исследований вдоль трассы трубопровода выделены три отдельных участка: береговое примыкание м. Уанги (о. Сахалин), область канала (центральная часть трассы) и береговое примыкание м. Каменный (материк).

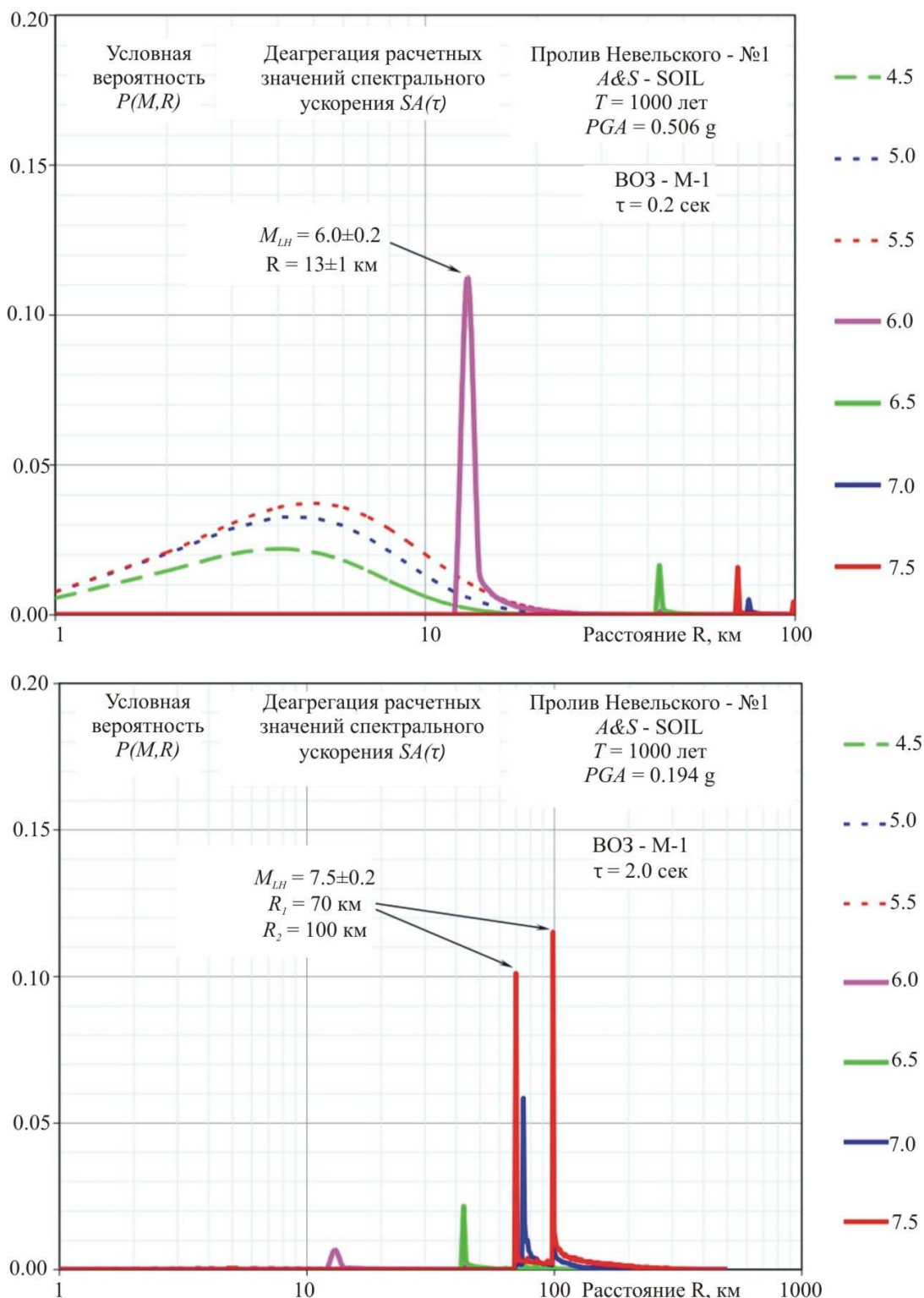


Рис. 7. Сравнение результатов деагрегации расчетных значений спектра реакции для периодов $\tau = 0,2$ сек (вверху) и $\tau = 2,0$ сек (внизу) для крайней восточной точки (№ 1) трассы газопровода
 Fig. 7. Comparison of the results of deaggregation of the calculated values of the response spectrum for the periods $\tau = 0.2$ sec (above) and $\tau = 2.0$ sec (below) for the easternmost point (No. 1) of the gas pipeline route

Литологические разрезы всех трех участков трассы однотипны: верхний сейсмоакустический комплекс (САК3) представлен преимущественно песками пылеватыми, мелкими с линзами песков до средней крупности; нижележащий комплекс (САК4) – в основном суглинки и супеси от текучих до мягкопластичных с песками различной степени крупности до гравелистых; его подстилает комплекс (САК5), представленный предположительно песками различной крупности, гравийниками с линзами глин и суглинков (рис. 8).

Мощность четвертичных отложений по всей трассе трубопровода на переходе через пролив Невельского приблизительно составляет 30 м.

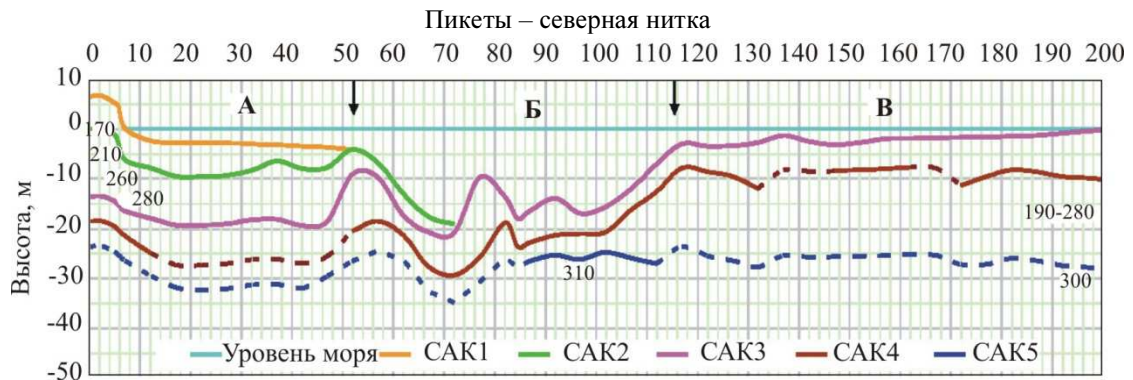


Рис. 8. Строение грунтового разреза на трассе подводного трубопровода через пролив Невельского по данным сейсмических исследований МОВ-ОГТ. Показаны значения скоростей V_S в м/с.
 Положение пикетов показано на рис. 10

Fig. 8. The structure of the soil cross section on the route of the underwater pipeline across the Nevelskoy Strait according to seismic data by the reflection seismic method.

The values of the velocities V_S are shown in m/s. The location of the pickets is shown in Fig. 10

Для области канала положение кровли коренного основания (нутовской свиты) можно считать примерно известным и совпадающим с положением кровли сейсмоакустического комплекса САК-5. Скорости распространения поперечных волн V_S в коренном основании были оценены с помощью различных корреляционных соотношений, связывающих V_S с такими параметрами грунтов, как модуль общей деформации E и угол внутреннего трения ϕ . Они приводят к значениям V_S в диапазоне 275–350 м/с. Поэтому породы, слагающие нутовскую свиту, приняты нами за эталонный грунт $V_{S0} \approx 310$ м/с и $\rho_0 \approx 2,16$ т/м³.

Для реализации метода сейсмических жесткостей использована известная формула С. В. Медведева (1962), при этом анализировалась толща грунта мощностью не менее 10 м.

Как видно на рис. 9, интенсивность сейсмических воздействий (балльность), полученная методом сейсмических жесткостей, изменяется в узких пределах: от 8,9 до 8,4 балла. Наибольшее значение получено для пикета 0 на м. Уанги, где на поверхности залегает 2-метровый слой торфяника.

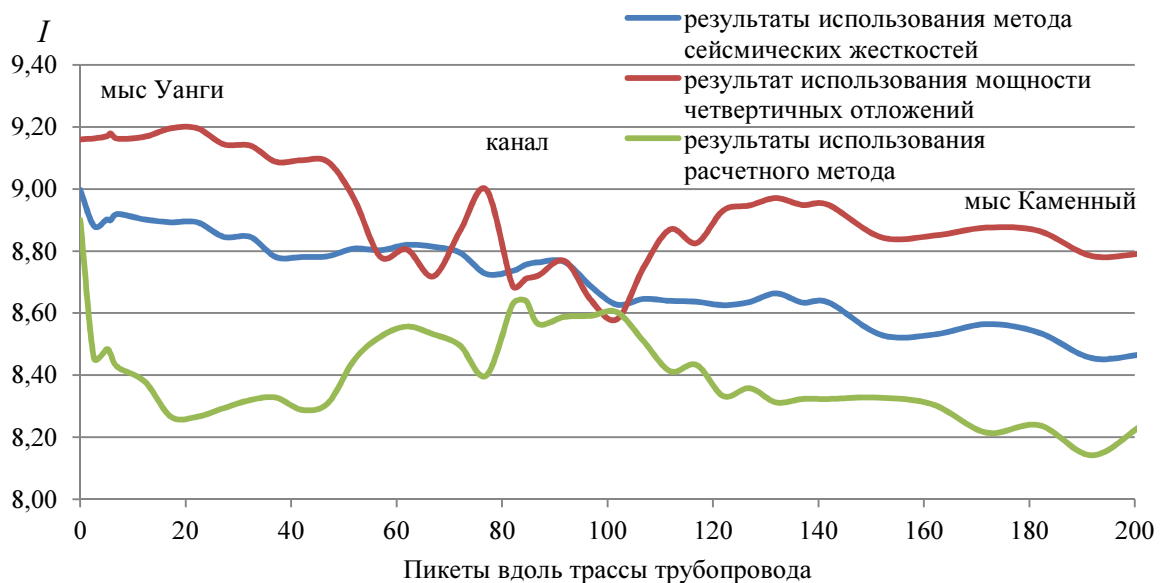


Рис. 9. Результаты расчетов сейсмических воздействий вдоль трассы трубопровода через пролив Невельского с учетом грунтовых условий, выполненных разными методами.

Положение пикетов показано на рис. 10

Fig. 9. Results of calculations of seismic effects along the pipeline route through the Nevelskoy Strait accounting soil conditions performed by different methods. The picket location is shown in Fig. 10

Для численного моделирования распространения сейсмических волн в грунтовой толще на трассе перехода через пролив Невельского использовалась программа NERA (Nonlinear Earthquake Site Response Analyses) (Bardet et al., 2001). Моделирование сводится к численному решению конечно-разностного волнового уравнения для поперечных SH-волн. Входной сигнал задается в виде акселерограммы, сгенерированной искусственным способом.

Помимо входного сигнала (акселерограммы) для запуска программы NERA задавались также свойства среды: мощность, плотность и скорость V_S для всех слоев грунта в данном пункте; тип материала среды (песчаный, глинистый, скальный и т. п.). Результаты расчетов представлены на рис. 9 (зеленая кривая).

Третий метод СМР использует связь приращения балльности с мощностью четвертичных отложений по трассе строительства трубопровода в виде соотношения

$$dI = -0,0009h^2 + 0,055h - 0,0417, \quad (5)$$

где dI – приращение балльности, h – мощность четвертичных отложений (Миронюк и др., 2020). Результаты использования данного метода представлены на рис. 9 (красная кривая).

Заключение

1. Общий вывод из анализа результатов УИС и проведенной деагрегации состоит в том, что опасность для разных точек трассы перехода газопровода через пролив Невельского обусловлена землетрясениями с очень широким набором основных параметров M и R . Тем не менее потенциально опасные события для трассы перехода можно, по-видимому, разделить на три основные группы:

- местные толчки умеренной силы ($M = 4,5-5,5$) на расстояниях $R = 5-10$ км – могут происходить в пределах доменов $D4$ и $D9-D10$ (рис. 1);
- довольно сильные землетрясения ($M = 6,0-6,5$) на расстояниях $R = 10-40$ км – возможны на линеаментах $L924$ и $L929$ (рис. 1);
- очень сильные землетрясения ($M = 7,0-7,5$) на расстояниях $70-100$ км – могут происходить на линементе $L1$ (рис. 1).

Наибольшая опасность для трассы перехода через пролив исходит от потенциально возможных событий второй группы. Вероятность возникновения событий первой группы ($M = 4,5-5,5$) в непосредственной близости от трассы перехода в целом ниже. Землетрясения третьей группы происходят гораздо реже, и соответствующие линементы удалены на значительное расстояние от трассы ($70-100$ км). Основной вклад этих событий в сейсмическую опасность для трассы перехода проявляется только в низкочастотной области спектра – на периодах спектра $\tau \geq 1$ сек.

2. Результаты выполненных расчетов, включая деагрегацию, показывают, что исходная сейсмичность района перехода газопровода через пролив Невельского для периода повторения $T = 1000$ лет существенно ниже, чем указывается на карте ОСР-2016-В, на которой восточная точка перехода через пролив характеризуется исходной сейсмичностью 9 баллов. В нашем случае исходные сейсмические воздействия для м. Уанги (восточное окончание трассы перехода газопровода через пролив Невельского) определены в 8,4 балла шкалы MSK-64. Результаты расчетов показали, что в акватории пролива Невельского исходные сейсмические воздействия возрастают с запада на восток и составляют 8,2–8,3 балла шкалы MSK-64 в центральной части залива для периода повторения сейсмических сотрясений $T = 1000$ лет и грунта II категории по сейсмическим свойствам в соответствии со СНиП II-7-81*.

Для периода повторения сейсмических сотрясений $T = 5000$ лет и грунта II категории расчеты по УИС также дают меньшие значения интенсивности сейсмических сотрясений для береговых примыканий трассы газопровода, чем данные ОСР-2016. Для м. Каменный – 8,9 балла шкалы MSK-64 в отличие от 9 баллов по ОСР-2016, м. Уанги – 9,1 балла в отличие от 10 баллов согласно ОСР-2016.

3. Для учета влияния грунтовой толщи на параметры сейсмических воздействий (СМР) использованы три различных метода: метод сейсмических жесткостей, расчетный метод и метод оценки приращения балльности по мощности четвертичных отложений.

Карты СМР, построенные с помощью метода сейсмических жесткостей, представлены на рис. 10.

Разброс полученных тремя различными методами значений интенсивности сейсмических воздействий вдоль трассы трубопровода составляет приблизительно $\pm 0,3$ балла. Причем результаты метода сейсмических жесткостей дают средние значения и показывают, что вдоль трассы трубопровода от материка до о. Сахалин интенсивность сейсмических сотрясений изменяется от 8,4 до 8,9 балла шкалы MSK-64 для периода повторения сейсмических сотрясений 1000 лет и от 9,3 до 9,7 для периода повторения 5000 лет.

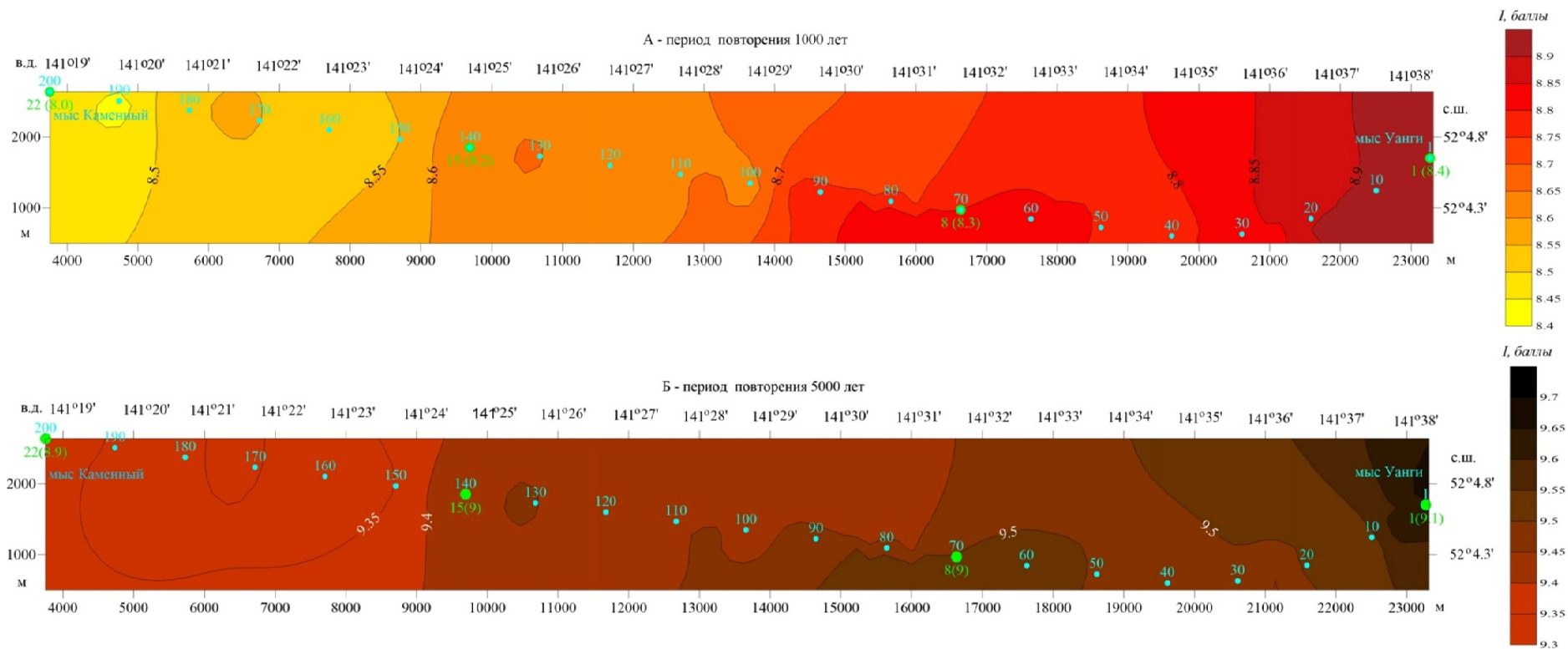


Рис. 10. Карты-схемы сейсмического микрорайонирования пролива Невельского, построенные методом сейсмических жесткостей:

А – для периода повторения сейсмических сотрясений 1 000 лет, Б – для периода повторения 5 000 лет. Положение пикетов показано голубыми точками с указанием номера пикета. Положение расчетных точек УИС показано салатowymi кружками с указанием номера точки и исходной сейсмичности (в скобках) в соответствии с табл. 1 и 2

Fig. 10. Schematic maps of seismic microzoning of the Nevel'skiy Strait, constructed by the method of seismic rigidity: A – for the return period of seismic shaking 1,000 years, B – for the return period equal to 5,000 years. The location of the pickets is shown by blue dots with the station number. The position of the calculated points of the initial seismicity is shown with light green circles indicating the point number and the initial seismicity (in brackets) in accordance with Tables 1 and 2

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО "Питергаз", а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00533А, описание методики расчетов сейсмических воздействий для морских участков), Российского научного фонда (грант № 20-77-00034, моделирование сейсмического отклика грунтов) и по государственному заданию № 0128-2021-0004 (построение грунтовых моделей).

Библиографический список

- Аптикаев Ф. Ф., Эртелева О. О. Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей // *Физика Земли*. 2002. № 7. С. 39–45.
- Гусев А. А., Шумилина Л. С. Моделирование связи балл – магнитуда – расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4–5. С. 29–40.
- Казанцев Ю. В., Казанцева Т. Т., Камалетдинов М. А., Ковачев С. А. [и др.]. Первая тектоносейсмическая карта Восточного Башкортостана. Уфа : Гилем, 1995. 44 с.
- Ковачев С. А., Кузин И. П., Лобковский Л. И. Морские сейсмологические наблюдения в районе Центральных Курил перед катастрофическими землетрясениями в ноябре 2006 г. ($M = 8.3$) и январе 2007 г. ($M = 8.1$) // *Физика Земли*. 2009. № 9. С. 48–65.
- Ковачев С. А., Кузин И. П., Соловьев С. Л. Кратковременное изучение микросейсмичности губы Буор-Хая, море Лаптевых, с помощью донных сейсмографов // *Физика Земли*. 1994. № 7–8. С. 65–76.
- Кофф Г. Л., Ганзей К. С. Оценка риска цунами. Владивосток : Дальнаука, 2007. 91 с.
- Куликов Е. А., Иващенко А. И., Яковенко О. И., Ковачев С. А. [и др.]. К вопросу о цунамиопасности арктического региона // *Арктика: экология и экономика*. 2016. № 3(23). С. 38–49.
- Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М. : Госстройиздат, 1962. 284 с.
- Миронюк С. Г., Иващенко А. И., Ковачев С. А. Сейсмическое микрорайонирование Амурского залива по трассе подводного перехода трубопровода // *Сб. тезисов науч.-практ. конф. "Инженерная сейсморастворка и сейсмология – 2020. Георадар – 2020. Теперь вместе"*. М., 2020. С. 175–179.
- Оскорбин Л. С. Районирование юга Дальнего Востока по сейсмогенным зонам // *Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией*. В 8 т. Т. 6. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск, 1997. С. 111–153.
- Оскорбин Л. С. Сейсмичность Приморья и Приамурья // *Сейсмическое районирование Курильских островов, Приамурья и Приморья : сб. ст. Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 128–142.*
- Оскорбин Л. С., Бобков А. О. Сейсмический режим сейсмогенных зон юга Дальнего Востока // *Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией*. В 8 т. Том 6. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск, 1997. С. 179–198.
- Соловьев С. Л., Ковачев С. А., Мишарина Л. А., Уфимцев Г. Ф. Сейсмоактивность поперечных нарушений в Ольхоно-Святоносской зоне озера Байкал // *Доклады Академии наук СССР*. 1989. Т. 309, № 1. С. 61–64.
- СР-78. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Отв. ред.: В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. М. : Наука, 1980. 307 с.
- Стром А. Л. О противоречиях в нормативной базе, применяемой для проектирования объектов нефтегазового комплекса в сейсмоопасных регионах // *Инженерные изыскания*. 2015. № 3. С. 20–23.
- Штейнберг В. В., Сакс М. В., Аптикаев Ф. Ф. [и др.]. Методы оценки сейсмических воздействий // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 1993. Вып. 34 : Задание сейсмических воздействий. С. 5–94.
- Abrahamson N. A., Silva W. J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes // *Seismological Research Letters*. 1993. Vol. 68, N 1. P. 94–127. DOI: <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94>.
- Bardet J. P., Tobita T. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Los Angeles, California, USA: University of Southern California, 2001. 44 p.
- Bazzurro P., Cornell C. A. Disaggregation of seismic hazard // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1999. Vol. 89, Iss. 2. P. 501–520.
- Bender B., Perkins D. M. SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation // *U.S. Geological Survey Bulletin* 1772. 1987. 48 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/b1772>.
- Campbell K. W., Bozorgnia Y. Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2003. Vol. 93, N 1. P. 314–331. DOI: <http://dx.doi.org/10.1785/0120020029>.
- Kovachev S. A., Kuzin I. P., Soloviev S. L. Microseismicity of the frontal Hellenic arc according to OBS observations // *Tectonophysics*. 1992. Vol. 201, Iss. 3–4. P. 317–327. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90239-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90239-3).

- Sabetta F., Pugliese A. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions // *Bulletin of the Seismological Society of America* 1996. Vol. 86, Iss. 2. P. 337–352.
- Sadigh K., Chang C.-Y., Egan J. A., Makdisi F. [et al.]. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data // *Seismological Research Letters*. 1997. Vol. 68, N 1. P. 180–189.
- Solov'ev S. L., Kovachev S. A., Kuzin I. P., Tassos S. Earth crust seismicity of the Aegean Sea south part (from the results of bottom seismological observations) // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1989. Vol. 305, Iss. 5. P. 1085–1089.

References

- Aptikayev, F. F., Erteleva, O. O. 2002. Generation of artificial accelerograms by scaling real records. *Fizika Zemli*, 7, pp. 39–45. (In Russ.)
- Gusev, A. A., Shumilina, L. S. 1999. Modeling the connection the point – magnitude – distance based on the concept of an incoherent extended source. *Vulkanologiya i seysmologiya*, 4–5, pp. 29–40. (In Russ.)
- Kazantsev, Yu. V., Kazantseva, T. T., Kamaletdinov, M. A., Kovachev, S. A. et al. 1995. The first tectonic seismic map of Eastern Bashkortostan. Ufa. (In Russ.)
- Kovachev, S. A., Kuzin, I. P., Lobkovsky, L. I. 2009. Marine seismological observations in the region of the Central Kuriles before catastrophic earthquakes in November 2006 (M = 8.3) and January 2007 (M = 8.1). *Fizika Zemli*, 9, pp. 48–65. (In Russ.)
- Kovachev, S. A., Kuzin, I. P., Solov'yev, S. L. 1994. Short-term study of microseismicity in Buor-Khaya Bay, the Laptev Sea, using bottom seismographs. *Fizika Zemli*, 7–8, pp. 65–76. (In Russ.)
- Koff, G. L., Ganzey, K. S. 2007. Tsunami risk assessment. Vladivostok. (In Russ.)
- Kulikov, Ye. A., Ivashchenko, A. I., Yakovenko, O. I., Kovachev, S. A. et al. 2016. On the issue of tsunami hazard in the Arctic region. *Arctic: Ecology and Economy*, 3(23), pp. 38–49. (In Russ.)
- Medvedev, S. V. 1962. Engineering seismology. Moscow. (In Russ.)
- Mironyuk, S. G., Ivashchenko, A. I., Kovachev, S. A. 2020. Seismic microzoning of the Amur Bay along the route of the underwater passage of the pipeline. *Theses of scientific-practical conf. "Engineering seismic survey and seismology – 2020. Georadar – 2020. Now together"*. Moscow, pp. 175–179. (In Russ.)
- Oskorbin, L. S. 1997. Zoning of the south of the Far East by seismogenic zones. In *Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia*. In 8 vols. V. 6. Problems of seismic hazard of the Far East region. Yuzhno-Sakhalinsk, pp. 111–153. (In Russ.)
- Oskorbin, L. S. 1977. Seismicity of Primorye and Priamurye. In *Seismic zoning of the Kuril Islands, Priamurye and Primorye*: coll. of articles. Vladivostok, pp. 128–142. (In Russ.)
- Oskorbin, L. S., Bobkov, A. O. 1997. Seismic regime of seismogenic zones in the south of the Far East. In *Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia*. In 8 vols. V. 6. Problems of seismic hazard of the Far East region. Yuzhno-Sakhalinsk, pp. 179–198. (In Russ.)
- Solov'yev, S. L., Kovachev, S. A., Misharina, L. A., Ufimtsev, G. F. 1989. Seismic activity of transverse faults in the Olkhon-Svyatonos zone of Lake Baikal. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 309(1), pp. 61–64. (In Russ.)
- SR-78. 1980. Seismic zoning of the territory of the USSR. Methodological foundations and regional description of the 1978 map. Eds: V. I. Bune, G. P. Gorshkov. Moscow. (In Russ.)
- Strom, A. L. 2015. On contradictions in the normative base that regulated design of the oil-and-gas facilities situated in earthquake-prone regions and on ways of its improvement. *Inzhenernyye izyakaniya*, 3, pp. 20–23. (In Russ.)
- Shteynberg, V. V., Saks, M. V., Aptikayev, F. F. et al. 1993. Methods for assessing seismic impacts. *Voprosy inzhenernoy seysmologii*, 34 (Setting the seismic actions), pp. 5–94. (In Russ.)
- Abrahamson, N. A., Silva, W. J. 1993. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), pp. 94–127. DOI: <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94>.
- Bardet, J. P., Tobita, T. 2001. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Los Angeles, California, USA: University of Southern California.
- Bazzurro, P., Cornell, C. A. 1999. Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), pp. 501–520.
- Bender, B., Perkins, D. M. 1987. SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation. U.S. Geological Survey Bulletin 1772. DOI: <https://doi.org/10.3133/b1772>.
- Campbell, K. W., Bozorgnia, Y. 2003. Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), pp. 314–331. DOI: <http://dx.doi.org/10.1785/0120020029>.
- Kovachev, S. A., Kuzin, I. P., Soloviev, S. L. 1992. Microseismicity of the frontal Hellenic arc according to OBS observations. *Tectonophysics*, 201(3–4), pp. 317–327. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90239-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90239-3).
- Sabetta, F., Pugliese, A. 1996. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(2), pp. 337–352.

- Sadigh, K., Chang, C.-Y., Egan, J. A., Makdisi, F. et al. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, 68(1), pp. 180–189.
- Solov'ev, S. L., Kovachev, S. A., Kuzin, I. P., Tassos, S. 1989. Earth crust seismicity of the Aegean Sea south part (from the results of bottom seismological observations). *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 305(5), pp. 1085–1089.

Сведения об авторах

Ковачев Сергей Анатольевич – Нахимовский пр., 36, г. Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, вед. науч. сотрудник, канд. физ.-мат. наук; e-mail: kovachev@ocean.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6097-9746>

Sergei A. Kovachev – 36 Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997; P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Leading Scientist, Cand. Sci. (Phys.-Math.); e-mail: kovachev@ocean.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6097-9746>

Крылов Артем Александрович – Нахимовский пр., 36, г. Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, науч. сотрудник, канд. физ.-мат. наук; e-mail: artyomkrlyv@ocean.ru

Artem A. Krylov – 36 Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997; P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Scientist, Cand. Sci. (Phys.-Math.); e-mail: artyomkrlyv@ocean.ru