

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.34

КАРТЫ ДЕТАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЮЖНОЙ ЧАСТИ О. САХАЛИН

© 2020 г. А. В. Коновалов^{1,*}, А. А. Степнов¹

Представлено академиком РАН А.И. Ханчуком 13.03.2020 г.

Поступило 13.03.2020 г.

После доработки 30.06.2020 г.

Принято к публикации 01.07.2020 г.

Впервые для Сахалина реализована методика вероятностного анализа сейсмической опасности с использованием регионального соотношения затухания сейсмических ускорений. Для юга о. Сахалин построены карты нормативных пиковых ускорений, соответствующие 475- и 975-летним периодам повторяемости сейсмических воздействий.

Ключевые слова: сейсмическое районирование, вероятностный анализ сейсмической опасности, модель затухания сейсмических воздействий, модель сейсмических источников

DOI: 10.31857/S2686739720090108

В отношении методологии сейсмического районирования территории РФ взгляды ученых в настоящее время различаются. Некоторые являются сторонниками западных подходов, основанных на использовании сейсмических воздействий [1, 2]. При этом, не имея эмпирически обоснованных моделей затухания сейсмических ускорений в исследуемом районе, специалисты предлагают заимствовать такие модели из регионов с хорошей обеспеченностью сейсмологическими данными. Их оппоненты [3, 4] указывают на то, что выраженные особенности региональных аналогов могут вносить непредсказуемые искажения в расчеты и предлагают использовать макросейсмический балл, как это традиционно делается в России [5].

На практике переход от балла к ускорению происходит дискретно, т.е. 7, 8 и 9 баллам соответствуют инженерные значения пиковых ускорений грунта 100, 200 и 400 см/сек².

Здесь сложно заранее предугадать, что может в большей степени исказить расчет: эпистемическая неопределенность импортированной модели затухания сейсмических ускорений или случайная неопределенность в переходной зависимости балл–ускорение.

Одна из первых попыток сейсмического районирования в физических единицах для городов о. Сахалин была предпринята в [1]. В схему расчета были импортированы модели затухания нового поколения, разработанные в 2008 г. в США в рамках проекта NGA. Однако результаты вычислений были представлены в целочисленных баллах, из-за чего теряется смысл детального районирования.

Сегодня огромное внимание уделяется промышленному развитию Сахалинской области. Наибольшая часть всех реализуемых инфраструктурных проектов в регионе сконцентрирована на юге острова Сахалин. Поэтому именно эта часть территории выбрана в качестве полигона для детального картирования сейсмической опасности.

В настоящей работе использовалась программа CRISIS [6], которая прошла серьезную апробацию в различных сейсмоактивных районах Земли, в том числе на Сахалине [7]. Принципиально новым является использование эмпирически обоснованного соотношения затухания сейсмических ускорений и метода расчета, основанного на теореме о полной вероятности [2, 7].

Модель сейсмических источников для о. Сахалин построена таким образом (рис. 1), что возможные события с наибольшей магнитудой отнесены к сейсмолинеаментам, в то время как фоновые — к доменам (площадным источникам).

В основу линеаментно-доменной модели положены результаты предшествующих исследований [1, 5]. Сейсмические характеристики площадных источников актуализированы по результатам современных исследований [8]. Основная

¹ Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

*e-mail: a.kononov@geophystech.ru

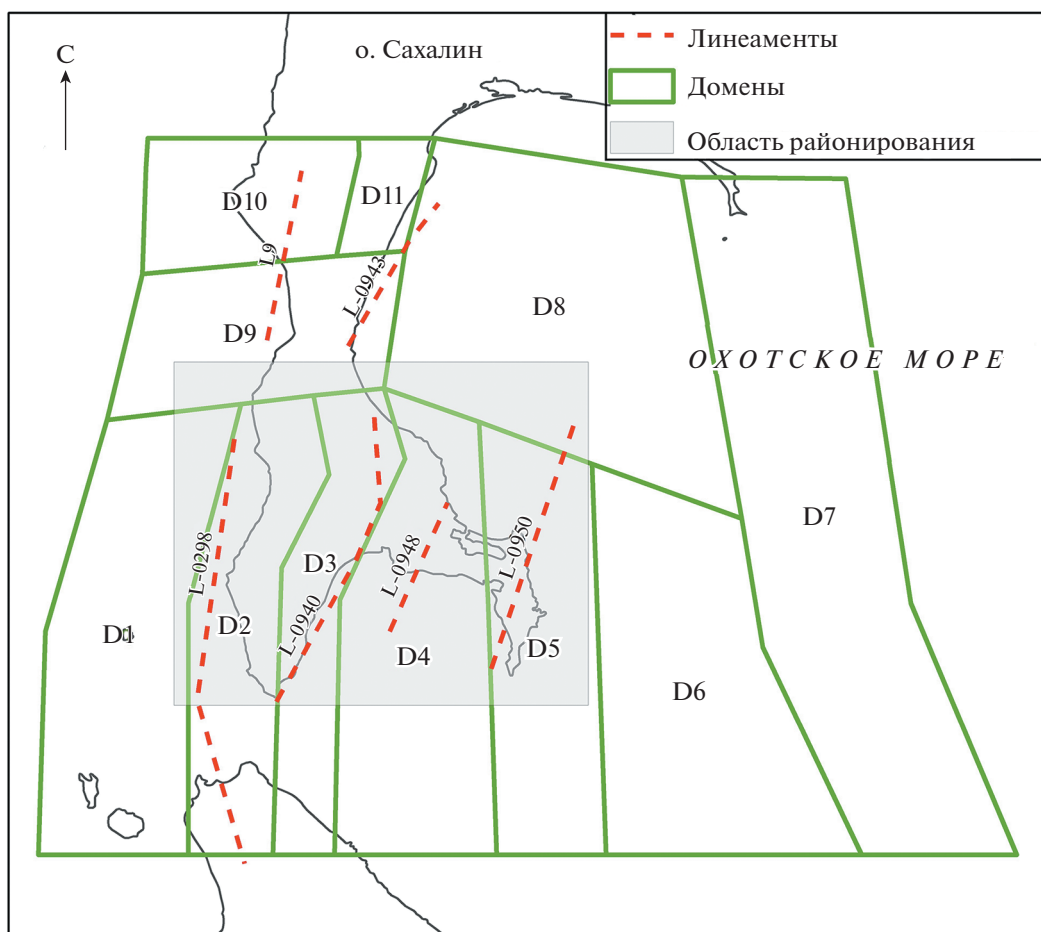


Рис. 1. Положение сейсмических источников, используемых в расчетах.

корректировка параметров линейных источников заключалась в повышении значения максимальной магнитуды $m_{\max}$, уточнения их повторяемости и положения. Повторяемость оценивалась по данным палеосейсмических исследований древних землетрясений, следы которых сохранились в смещениях поверхностных отложений [9], а также по результатам высокоточных геодезических наблюдений [10]:

$$\lambda_0 = \frac{\dot{u}}{\bar{u}_0}, \quad (1)$$

где λ_0 — уровень сейсмической активности, $\dot{u}$ — скорость перемещения по разлому, $\bar{u}_0$ — средняя подвижка в очаге землетрясения с магнитудой m_0 .

Для параметризации повторяемости сейсмических источников использовались магнитудно-частотные соотношения, основанные на усеченном (для доменов) и характеристическом (для линеаментов) распределениях Гутенберга–Рихтера (табл. 1):

$$\lambda_B(m) = \lambda_0 \frac{\exp(-\beta m) - \exp(\beta m_{\max})}{\exp(-\beta m_0) - \exp(-\beta m_{\max})}, \quad (2)$$

$$m_0 \leq m \leq m_{\max}$$

$$\lambda_C(m) = \lambda_0 \frac{\Phi\left(\frac{m_{\max} - em}{s}\right) - \Phi\left(\frac{m - em}{s}\right)}{\Phi\left(\frac{m_{\max} - em}{s}\right) - \Phi\left(\frac{m_0 - em}{s}\right)}, \quad (3)$$

$$m_0 \leq m \leq m_{\max}$$

где $\lambda_B(m)$ и $\lambda_C(m)$ — соответственно усеченная и характеристическая формы кумулятивного распределения повторяемости, зависящего от моментной магнитуды источника (m); m_0 — минимальная магнитуда; β — наклон графика повторяемости (в единицах натурального логарифма); em — ожидаемая магнитуда характеристического землетрясения, s — стандартное отклонение ожидаемой магнитуды.

Эпистемическая неопределенность максимальной магнитуды для доменов учитывалась путем введения нескольких значений $m_{\max}$ в интер-

Таблица 1. Актуализированные характеристики сейсмических источников для южного Сахалина

Сейсмический источник	Средняя глубина, км	Параметры графика повторяемости					
		λ_0	m_0	$m_{\max}$	Усеченное распределение	Характеристическое распределение	
					β	em	s
D1	12	0.7586	4	7.3	1.934		
D2	11	0.7943	4	6.2	2.303		
D3	10	0.8128	4	6	2.234		
D4	12	0.4266	4	5.5	2.556		
D5	14	0.2291	4	5.5	1.566		
D6	17	0.1514	4	5.7	1.681		
D7	17	0.1514	4	5.7	1.681		
D8	18	0.2818	4	5.7	2.395		
D9	13	0.2042	4	5.5	3.085		
D10	12	0.4896	4	6	2.072		
D11	13	0.1001	4	6	1.635		
L-0928	10	0.00129	6.8	7.2		7	0.5
L-0948	12	0.00246	5.8	6.2		6	0.5
L-0940	10	0.00039	7.3	7.7		7.5	0.5
L-0950	14	0.00386	5.8	6.2		6	0.5
L-0943	12	0.00023	7.3	7.7		7.5	0.5
L9	12	0.00213	6.8	7.2		7	0.5

вале от $m_{\max} - 0.2$ до $m_{\max} + 0.2$ с весами, задаваемыми равномерным распределением.

В качестве входной модели затухания сейсмических ускорений использовалось региональное соотношение, разработанное по записям местных землетрясений [7]:

$$\log \overline{PGA} = 0.87m' - \log(R_{\text{гип}} + 0.006 \times 10^{0.5m'}) - 0.0038R_{\text{гип}} - 1.726 \pm 0.336, \quad (4)$$

где $m' = \min(m, 7)$; $R_{\text{гип}}$ — наикратчайшее расстояние до разрыва (в км). Пиковое ускорение грунта $\overline{PGA}$ в (4) представлено в см/сек².

В расчетах использовались также модифицированные модели затухания нового поколения NGA 2.0 [11–13], прошедшие апробацию в задачах инженерной сейсмологии в рассматриваемом регионе [7].

Весовые коэффициенты для моделей затухания принимались в пропорциях 0.4, 0.2, 0.2 и 0.2 для регионального и трех импортированных соотношений соответственно.

Все расчеты приведены к эталонным грунтам со скоростью поперечных волн в верхнем 30-метровом слое 350 м/с. Вычисления воспроизводились на пространственной сетке с шагом 0.05 градуса.

Результаты нормирования сейсмических ускорений, соответствующих 10-процентной вероятности превышения в ближайшие 50 лет (или 475-летнему периоду повторяемости), проиллюстрированы на рис. 2а. Можно отметить, что в центральной части южного Сахалина расчетные значения нормативных ускорений (PGA) соответствуют уровню 0.2 g (где g — ускорение свободного падения), что в общих чертах согласуется с генерализированными оценками по результатам общего [5] и детального [1] сейсмического районирования, если принять, что 8 баллов это 0.2 g для грунтов средней категории. На западном побережье юга о. Сахалин эти значения соответствуют уровню 0.3 g. Если бы переход от баллов к ускорению (и обратно) осуществлялся с шагом 0.5, как это рекомендуется А.А. Гусевым [3], то исходная сейсмичность юга о. Сахалин нигде бы не превышала 8.5 балла, в то время как по текущим нормативным документам юго-западное побережье отнесено к 9-балльной зоне [14].

Согласно глобальным картам международного проекта GEM [15] юг о. Сахалин отнесен к зоне с проектными значениями пиковых ускорений грунта от 0.2 g до 0.5 g. В целом глобальные карты показывают относительно завышенные значения нормативных ускорений. Это может быть связано как с консервативными оценками максимальной

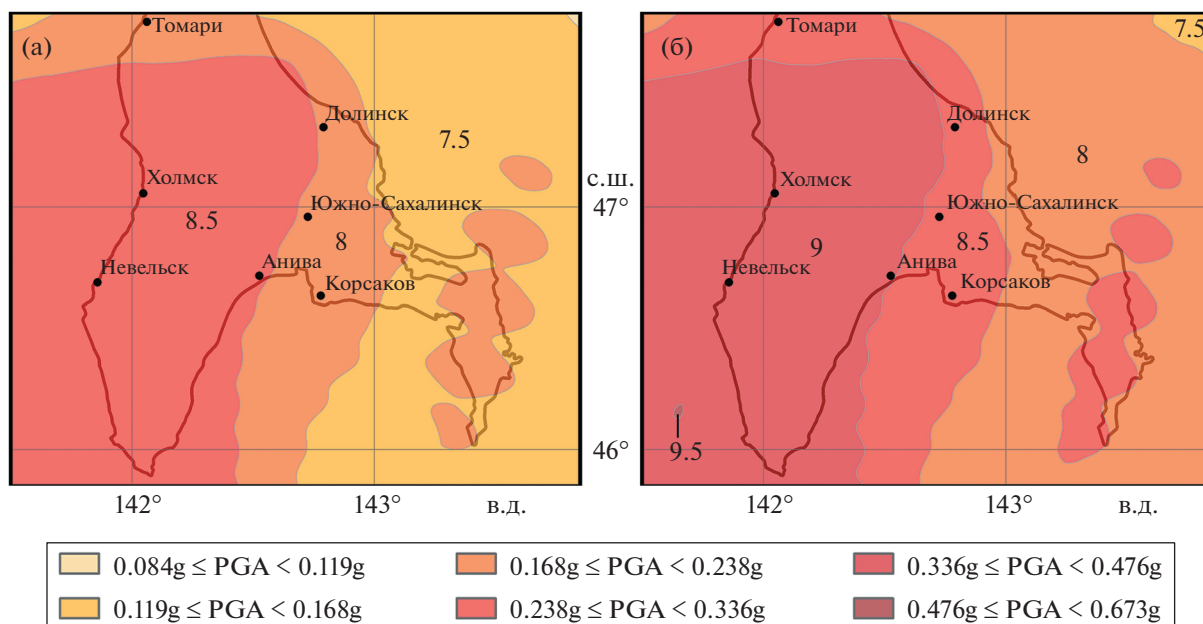


Рис. 2. Карты детального сейсмического районирования южного Сахалина для (а) 475- и (б) 975-летних периодов повторяемости.

магнитуды сейсмических источников глобальной модели, так и сайт-эффектом, обусловленным разными категориями грунтов, принятыми в расчетных методах.

Таким образом, впервые для Сахалина построены карты детального сейсмического районирования (рис. 2), основанные на современном уровне сейсмологической изученности региона. Методы и подходы, примененные в настоящей работе, следуют идеологии сбалансированной оценки риска, которая учитывает возможные эпистемические и случайные неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 5. С. 93–103.
2. Bindi D., Parolai S. Total Probability Theorem versus Shakeability: A Comparison between Two Seismic-hazard Approaches Used in Central Asia // Seismol. Res. Lett. 2015. V. 86. № 4. P. 1178–1184.
3. Гусев А.А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений. Часть 1 // Инженерные изыскания. 2011. № 10. С. 20–29.
4. Gusev A.A. Comment on “Total probability theorem versus shakeability: A comparison between two seismic-hazard approaches used in central Asia” by D. Bindi and S. Parolai // Seismol. Res. Lett. 2016. V. 87. № 5. P. 1120–1124.
5. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1 : 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999.
6. Aguilar-Meléndez A., Ordaz Schroeder M.G., De la Puente J., et al. Development and Validation of Software CRISIS to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment with Emphasis on the Recent CRISIS2015 // Computacion y Sistemas. 2017. V. 21. № 1. P. 67–90.
7. Коновалов А.В., Сычев А.С., Манайчев К.А., Степнов А.С., Гаврилов А.В. Апробация новой модели затухания пиковых ускорений грунта в вероятностном анализе сейсмической опасности для Сахалинского региона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 3. С. 5–14. <https://doi.org/10.21455/VIS2018.3-1>
8. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин / Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А.; Кожурин А.И., ред. Владивосток: Дальнаука, 2014.
9. Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов) // Автореф. дис. д. геол.- мин. наук. http://www.ifz.ru/uploads/media/Kozhurin_Avtoreferat_dgmn_sv_01.pdf.
10. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А. и др. Начало формирования единой сети геодинамических наблюдений ДВО РАН // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.

11. *Abrahamson N.A., Silva W.J., Kamai R.* Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions // *Earthquake Spectra*. 2014. V. 30. № 3. P. 1025–1055.
12. *Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., et al.* NGA-West 2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes // *Earthquake Spectra*. 2014. V. 30. № 3. P. 1057–1085.
13. *Campbell K.W., Bozorgnia Y.* NGA-West 2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-damped Linear Acceleration Response Spectra // *Earthquake Spectra*. 2014. V. 30. № 3. P. 1087–1115.
14. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСП-2015 / отв. ред. Е.А. Рогожин. <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/a3b/izm-1-k-sp-14.pdf>.
15. *Pagani M., Garcia-Pelaez J., Gee R., et al.* Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2018.1 – December 2018). <https://maps.openquake.org/map/global-seismic-hazard-map/#6/49.944/143.503>

NEW GENERATION SEISMIC HAZARD MAPS FOR SOUTHERN SAKHALIN

A. V. Konovalov^{a,#} and A. A. Stepnov^a

^a*Sakhalin Department of Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation*

[#]*e-mail: a.konovalov@geophysitech.ru*

Presented by Academician of the RAS A.I. Hanchuk March 13, 2020

For the first time for Sakhalin Island the probabilistic seismic hazard assessments applied using regional ground motion prediction equation in terms of the peak ground acceleration. The 475-year and 975-year seismic hazard maps are designed for the southern part of Sakhalin Island.

Keywords: seismic hazard zonation, probabilistic seismic hazard assessment, ground motion prediction equation, seismic source model