

DOI: 10.12737/22763

Завадская Е.П., аспирант,  
Ковальчук О.А., канд. тех. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

## РАСЧЕТ ЧИСЛЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЕЗЕРВУАРЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОСТРОВА САХАЛИН, ЗАЛИВ АНИВА

ZavadskayaEP@mgsu.ru

В настоящее время стал актуальным вопрос сейсмической безопасности объектов особого типа. В России, с 2009 года, вводится в эксплуатацию завод по производству, хранению и транспортировке сжиженного природного газа (далее по тексту СПГ), расположенный в сейсмически опасном районе. Самые катастрофичные последствия возникнут в случае, если от сейсмического воздействия пострадают крупнотоннажные резервуары для хранения сжиженного природного газа, расположенные на территории завода. Чтобы оценить сейсмическую безопасность сооружений особого типа, в первую очередь необходимо определить данные, характеризующие количественные показатели сейсмических воздействий на эти сооружения. Для моделирования сейсмического воздействия по району необходимо задать основополагающие параметры: рассматриваемый район - южная часть острова Сахалин, вблизи залива Анива, город Южно-Сахалинск; изотермический резервуар (далее по тексту ИР) представляет собой двустенную конструкцию объемом 100 тыс. м<sup>3</sup>, высотой 37 м и диаметром 67 м; природный газ, заливаемый в ИР, охлаждается до температуры минус 160 °С. Переходя в жидкое состояние, объём уменьшается более чем в 600 раз. После охлаждения, СПГ хранится при температуре минус 158 °С.

**Ключевые слова:** магнитуда, очаг землетрясения, глубина очага, эпицентрального расстояние, гипоцентрального расстояние, энергия в очаге землетрясения, длина разрыва, вероятность появления сильных землетрясений, оценка сейсмического риска, интенсивность сотрясений, ускорение грунта, размах ускорений грунта.

**Введение.** При землетрясениях в грунтовых породах происходят сложные динамические процессы. Точнее, при упругих деформациях породы, в результате разрушения, накопленная потенциальная энергия переходит в кинетическую, возбуждая сейсмические волны в грунте [1]. Сейсмичность участка землетрясения – это интенсивность сейсмического воздействия на объекты в баллах. А величину, характеризующую выделяемую при землетрясении энергию, называют магнитудой,  $M$ .

На юге острова Сахалин землетрясения с наибольшей магнитудой ( $M_{max} \approx 7$ ) наблюдаются вблизи Анива залива в городе Южно-Сахалинск. Моделируем очаг землетрясения, расположенный именно в этом городе. Так как от Южно-Сахалинска до Анива залива приблизительно 35 км, эпицентрального расстояние  $R$  будет варьироваться от 0 до 35 км. Наибольшая глубина очага, зафиксированная в рассматриваемом районе,  $H = 10$  [км] [7].

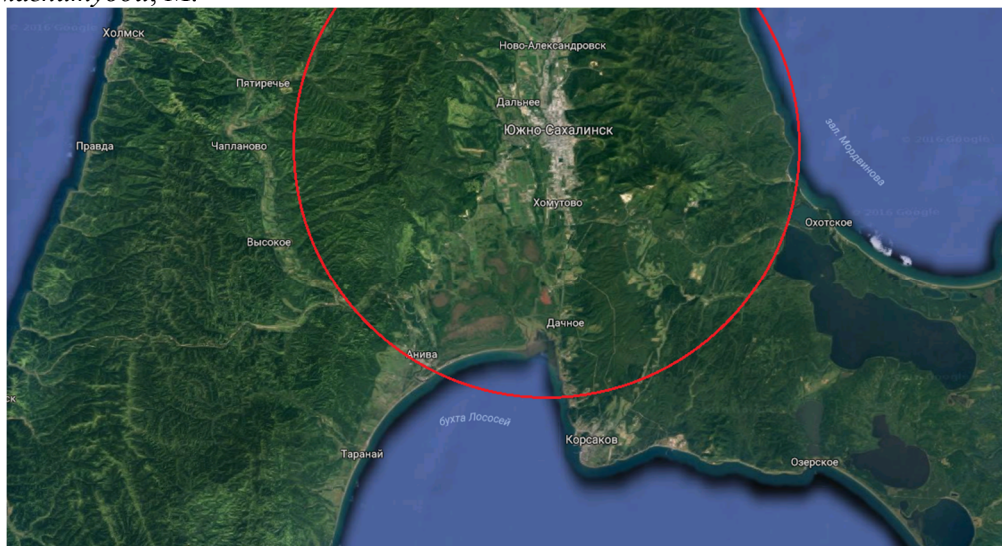


Рис. 1. Карта Южно-Сахалинска с выделенным эпицентрального расстоянием

**Методология.** Энергия в очаге землетрясения определяется по шкале Рихтера. Расчет количественных показателей сейсмических воздействий проводился в соответствии со СНиП II-7-81\*. Для оценки повторяемости сильных землетрясений использовалась модель Пуассона.

**Основная часть.** Интенсивность землетрясения, воздействующая на ИР, зависит от *гипо-*

*центрального расстояния*  $C$ , [км]. Гипоцентральное расстояние – это расчётная характеристика, включающая в себя эпицентральное расстояние и глубину очага. Рассчитывается по формуле:

$$C = \sqrt{R^2 + H^2}.$$

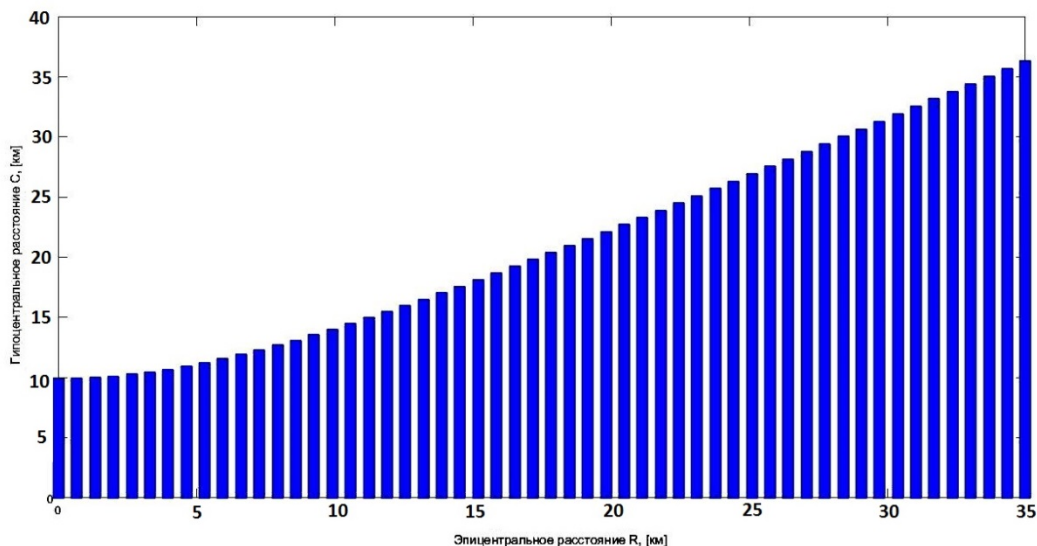


Рис. 2. График зависимости гипоцентрального расстояния от эпицентрального

Рассмотрим статистику сильных землетрясений в Южно-Сахалинске за период 100 лет:

- С 1916 по 1920 гг. в Южно-Сахалинске сильных землетрясений не зафиксировано.
- С 1920 по 1970 гг. в Южно-Сахалинске было зафиксировано 6 сильных землетрясений магнитудами от 5 до 7.
- В 2000 году – одно сильное землетрясение магнитудой 6,7.
- Самым опасным годом для Южно-Сахалинска был 2012 год, когда всего за один месяц произошло 17 землетрясений магнитудами от 4,1 до 6,3.
- В 2013 году было одно сильное землетрясение магнитудой 5.
- Следующее сильное землетрясение было зафиксировано в 2016 году, магнитуда составила 5,8 [7].

Таким образом, в период с 1916 по 2016 года в Южно-Сахалинске зафиксировано 26 сильных землетрясений.

Исходя из имеющихся данных примем в расчетах для ИР СПГ среднее значение магнитуды  $M \approx \frac{148,2}{26} = 5,7$ .

По шкале Рихтера определим энергию в очаге землетрясения,  $E$  [эрг]:

$$\lg E = aM + b,$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные величины; для сильных землетрясений  $a=1,5$ ;  $b=11,8$ . [2]

$$\lg E = 1,5 * 5,7 + 11,8 \rightarrow E \approx 10^{20} \text{ эрг.}$$

Длину разрыва на поверхности земли,  $L$  [км], в среднем, можно определить из соотношения:

$$M = 6,03 + 0,76 \lg L; \rightarrow L \approx 0,2 \text{ км.}$$

Для оценки повторяемости сильных землетрясений воспользуемся моделью Пуассона [6]:

$$P(N, t) = \frac{(\lambda t)^N \exp(-\lambda t)}{N!}, N = 0, 1, 2, \dots, \lambda t > 0.$$

$P(N, t)$  – вероятность появления  $N$  сильных землетрясений в течение временного интервала  $t$ , где  $\lambda$  – среднее число сильных землетрясений в единицу времени.

В период с 1916 года по 2016 год произошло три наиболее сильных землетрясения, магнитудами  $M > 6$ , отсюда, определим  $\lambda = \frac{3}{96} \approx 0,03125$ .

В проекте завода СПГ «Сахалин-2» указаны: срок службы технической составляющей завода СПГ 20 лет; срок службы внутреннего резервуара (далее по тексту ВР) хранения СПГ 30 лет; срок службы защитной ЖБ стенки резервуара для хранения СПГ – 40 лет.

Так как, пролив продукта из ИР произойдет в случае полного разрушения ВР хранения СПГ [4], рассматриваемый период возникновения

землетрясения будет равняться сроку службы ВР, то есть 30 лет.

Следовательно, вероятность того, что не произойдет ни одного землетрясения в период 30 лет, равна  $P(0,30) = \exp(-0.03125 * 30) \approx 0.39$ .

Оценкой сейсмического риска для периода  $t$ , является дополнение вероятности того, что не произойдет ни одного землетрясения, до единицы и вычисляется следующим образом [1]:

$$\bar{R} = 1 - P(0, t) = 1 - \exp(-\lambda t).$$

Оценка сейсмического риска для ИР:

$$\bar{R} = 1 - P(0,30) = 0.61,$$

то есть присутствует сейсмический риск.

Интенсивность сотрясений  $J$  для конкретной площадке, на которой расположен резервуар для хранения СПГ, зависит от магнитуды, эпицентрального расстояния и глубины очага. Рассчитывается по формуле:

$$J = a_3 + b_3 M - c_3 \lg \sqrt{R^2 + H^2},$$

здесь  $a_3, b_3, c_3$  – константы. Региональные константы для РФ:  $a_3 = 3; b_3 = 1.5; c_3 = 3.5$ .

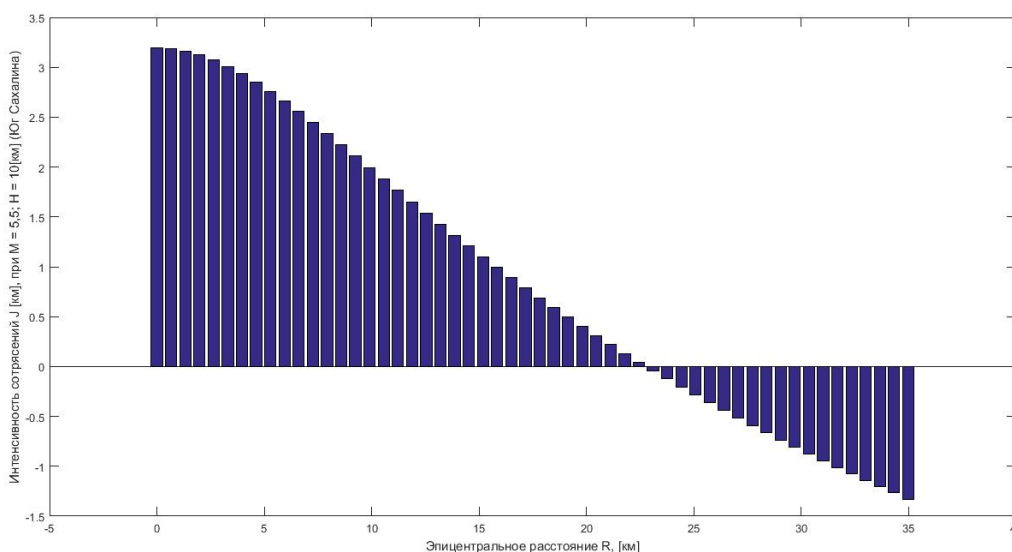


Рис. 3. Зависимость интенсивности сотрясения от расстояния от эпицентра

Максимальные значения ускорения грунта, в зависимости от расстояния эпицентра, вычисляются по формуле [3]:

$$a_m = 0.279g \cdot \exp(0.8M) / R^{1.64}.$$

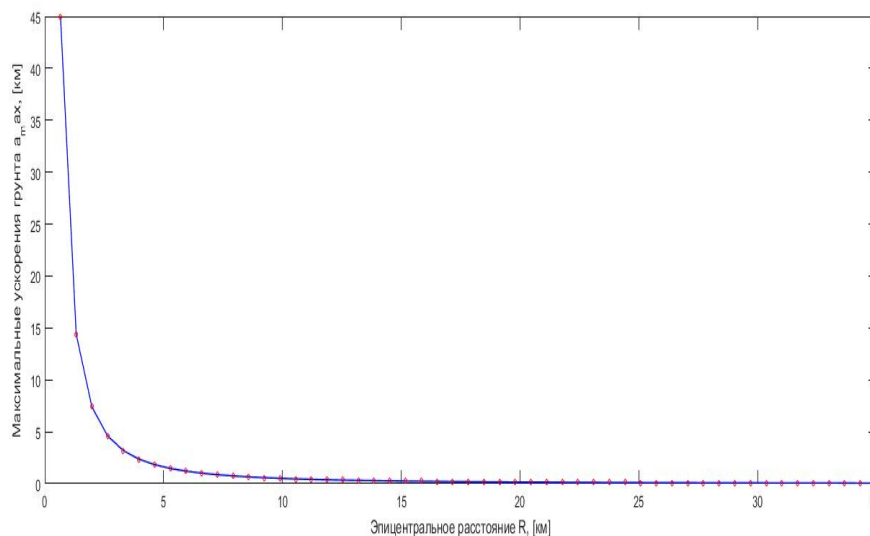


Рис. 4. Зависимость максимальных ускорений грунта от расстояния до эпицентра

Из рис. 4 видно, что максимумы ускорений грунта имеют большой разброс, поэтому более

подходящей для расчетов величиной является размах ускорения  $\sigma$ , т. е. разница между

наибольшим и наименьшим значениями ускорений, на рассматриваемом участке. [4]

Таким образом, чтобы придать статический смысл сейсмическим воздействиям, рассчитывают размах ускорения, по формуле:

$$\sigma = 7.5g[(R + 40)\sqrt{\tau R}]^{-1} \exp(0.4M),$$

где  $\tau = \bar{\tau} + \sigma_{\tau}$ .

При  $15 < R < 100$  км в диапазоне магнитуд  $5.6 < M < 7.2$ , установлены следующие значения  $\bar{\tau} = 9$  с;  $\sigma_{\tau} > 6$  с, следовательно  $\tau \approx 16$  с.

По результатам статистической обработки данных записей ускорений по горизонтальным компонентам при сильных землетрясениях получена корреляция между разбросом ускорения и эпицентральной расстоянием.

Таблица 1

Эпицентральное расстояние, [км]	Разброс ускорений, [м/с <sup>2</sup> ]	Эпицентральное расстояние, [км]	Разброс ускорений, [м/с <sup>2</sup> ]	Эпицентральное расстояние, [км]	Разброс ускорений, [м/с <sup>2</sup> ]
0	0	2	9,6	4	6,5
0,1	44,8	2,1	9,3	4,1	6,4
0,2	31,6	2,2	9,1	4,2	6,3
0,3	25,7	2,3	8,9	4,3	6,2
0,4	22,2	2,4	8,6	4,4	6,1
0,5	19,8	2,5	8,5	4,5	6,0
0,6	18,1	2,6	8,3	4,6	5,9
0,7	16,7	2,7	8,1	4,8	5,8
0,8	15,6	2,8	7,9	4,9	5,7
0,9	14,6	2,9	7,8	5,1	5,6
1	13,9	3	7,6	5,2	5,5
1,1	13,2	3,1	7,5	5,3	5,4
1,2	12,6	3,2	7,4	5,5	5,3
1,3	12,1	3,3	7,2	5,7	5,2
1,4	11,6	3,4	7,1	5,9	5,1
1,5	11,2	3,5	7,0	6	5,0
1,6	10,8	3,6	6,9	6,2	4,9
1,7	10,4	3,7	6,8	6,4	4,8
1,8	10,1	3,8	6,7	6,6	4,7
1,9	9,8	3,9	6,6	7	4,6
7,1	4,5	11	3,4	19	2,2
7,3	4,4	11,5	3,3	20	2,1
7,6	4,3	12	3,2	21	2,0
8	4,2	12,5	3,1	23	1,9
8,1	4,1	13	3,0	24	1,8
8,4	4,0	13,5	2,9	25	1,7
9	3,9	14	2,8	27	1,6
9,1	3,8	14,5	2,7	29	1,5
9,5	3,7	16	2,5	31	1,4
10	3,6	17	2,4	35	1,3
10,2	3,5	18	2,3		

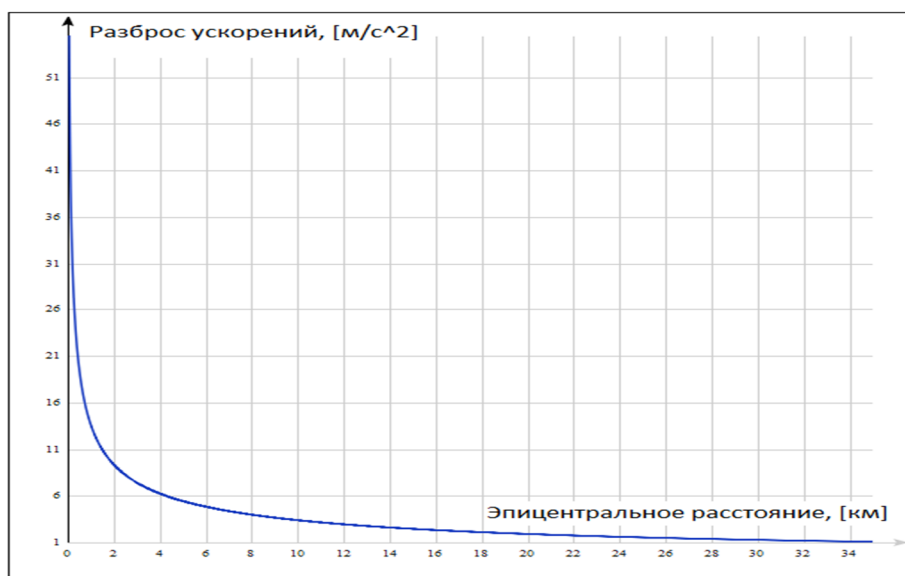


Рис. 5. Зависимость размаха ускорений от расстояния от эпицентра

**Выводы.** Оценка сейсмического риска для ИР, расположенного в южной части острова Сахалин показала, что вероятность сейсмического воздействия на резервуар хранения СПГ высока. Колебания земной коры будут распространяться с размахом ускорения  $44,8 \text{ [м/с}^2\text{]}$ . При волне, магнитудой  $5,7$  с удалением от эпицентра на расстояние больше  $1$  километра колебания стремительно затухают. Из зависимостей количественных показателей от эпицентрального расстояния видно, что реальная угроза для ИР существует в случае, если очаг землетрясения находится на расстоянии до  $15 \text{ км}$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 1. Москва, 1995г. под редакцией чл.кор. РИА К.Е. Коветкова, проф. В.А. Котляревского и проф. А.В. Забегаева

2. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 4. Москва, 1998г. под редакцией В.А. Котляревского и А.В. Забегаева

3. Проект Сахалин-2. Южно-Сахалинск, 2010г.

4. Краткий обзор корпоративного плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов для комплекса в пос. Пригородное при выполнении работ на берегу. 2011г.

5. Общий обзор завода СПГ. Совместный семинар с ассоциацией компаний поставщиков «Мурманшельф». Мурманск, 2012г. Йостейн Петтерсен.

6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А., Теория вероятностей и её инженерные приложения, Высшая школа, 2000г.

7. <https://sakhalin.info/>

**Zavadskaya E.P., Kovalchuk O.A.**

#### CALCULATION OF QUANTITATIVE INDICATORS SEISMIC IMPACT ON STORAGE TANKS FOR LIQUEFIED NATURAL GAS IN SOUTHERN SAKHALIN, ANIVA BAY

*Currently, topical issue of seismic safety of a object of special type. In Russia, in 2009, put into operation a plant for the production, storage and transportation of liquefied natural gas (LNG text below) located in a seismically hazardous area. The most catastrophic consequences will arise if, as a result of the earthquake, there will be large-scale destruction of the LNG storage tank, located on the territory of the plant. To evaluate the seismic safety of a particular type of facilities, it is first necessary to determine the data describing the quantitative indicators of seismic effects on these facilities. To simulate the seismic action is necessary to set the parameters: the area under consideration - the southern part of Sakhalin Island, near the Aniva Bay, the city of Yuzhno-Sakhalinsk; isothermal tank (hereinafter referred IT) is a double-walled construction of  $100 \text{ thousand m}^3$ , the height of  $37 \text{ m}$  and a diameter of  $67 \text{ m}$ .; natural gas, poured into the IT, is cooled to a temperature of minus  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ . Turning to the liquid state, the volume is reduced by more than 600 times. After cooling, the LNG is stored at a temperature of minus  $158 \text{ }^\circ\text{C}$ .*

**Key words:** magnitude, seismic focus, depth of focus, distance of epicenter, hypocentral distance, energy in seismic focus, length of break, the probability of occurrence of large earthquakes, evaluation of seismic risk, ground motion intensity, soil acceleration, sweep of soil acceleration.

**Завадская Елена Петровна**, аспирант, ассистент, зам. начальника УМЦ ИФО.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

Адрес: Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

E-mail: ZavadskayaEP@mgsu.ru

**Ковальчук Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент, директор ИФО НИУ.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

Адрес: Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.