

УДК 550.34.06

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.36.1.009](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.36.1.009)

Моделирование соответствия строительных нормативных требований величинам сейсмического риска (часть 3)

Р.О. Степанов

*Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*

Резюме: Статья завершает серию из трех авторских публикаций, связанных с моделированием сейсмических рисков в геологической среде при проектировании и строительстве объектов критической инфраструктуры. Подготовка серии направлена на достижение цели нахождения количественного соответствия сейсмических рисков, рассчитанных по математическим моделям, сейсмическим воздействиям, регламентированным в Своде правил (СП) 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Для этого решены задачи: в первой статье обоснованы критерии выбора тестовых территорий, и в качестве тестового региона выбрана территория Армении и смежных государств; во второй – на примере тестовой территории с помощью специально разработанных математических моделей на региональном и локальном масштабных уровнях выполнена оценка вероятностного сейсмического риска; в третьей – разработаны математические модели и программное обеспечение определения соответствия расчетных сейсмических воздействий, регламентированных СП, величинам вероятностного сейсмического риска, полученным с помощью математического моделирования. В финальной статье сделан вывод о том, что перспективы продолжения исследований связаны с построением новой шкалы сейсмической интенсивности возможных землетрясений как функции от рассчитанного вероятностного сейсмического риска и глубины залегания очага возможного землетрясения, а также построением специальной нормировочной шкалы, позволяющей переводить вероятностный сейсмический риск, рассчитанный для любого региона, в интенсивность как меру сотрясения в баллах единой макросейсмической шкалы. Построение аналогичных шкал весьма актуально для ныне применяемых в СП расчетных кинематических параметров – пиковые ускорение, скорость смещения и собственно смещение грунта.

Ключевые слова: моделирование, сейсмический риск, геологическая среда, тестовая территория, строительные нормы и правила.

Для цитирования: Степанов Р.О. Моделирование соответствия строительных нормативных требований величинам сейсмического риска (часть 3). *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1065>
DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.009

Model for assessing the compliance of building regulations with seismic risk values (part 3)

R.O. Stepanov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian
Federation*

Abstract: The article completes a series of three original publications, related to the modeling of seismic risks in the geological environment in design and construction of critical infrastructure facilities. The preparation of the series is aimed at achieving the goal of finding a quantitative correspondence of seismic risks, calculated according to mathematical models, with seismic impacts, regulated in the Seismic building design code (SP 14.13330.2018). For this purpose, the tasks are solved: in the first

article the criteria for choosing test territories are justified, and the territory of Armenia and neighboring states is selected as a test region; in the second - by the example of the test area, an assessment of the probabilistic seismic risk was performed with the help of specially created mathematical models at the regional and local scale levels; in the third - mathematical models and software were developed to determine the compliance of the calculated seismic effects, regulated by the design code with the values of the probabilistic seismic risk, obtained using mathematical modeling. The final article concludes that the prospects for further research are associated with the construction of a new seismic intensity scale of possible earthquakes as a function of the calculated probabilistic seismic risk and the depth of the possible earthquake source, as well as the creation of a special normalization scale that enables to transfer the probabilistic seismic risk, calculated for any region, into intensity as a measure of shaking in points of a single macro seismic scale. The construction of similar scales is highly relevant for the calculated kinematic parameters, currently employed in the design code – peak acceleration, displacement velocity and the actual displacement of the ground.

Keywords: modeling, seismic risk, geological environment, test area, building codes and regulations.

For citation: Stepanov R. O. Model for assessing the compliance of building regulations with seismic risk values (part 3). *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1065> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.009 (In Russ).

Введение

Проблема оценки сейсмических и геодинамических рисков весьма актуальна в настоящее время, занимая значимую часть исследований земных аномалий [1-4]. Среди них выделяются исследования вопросов современного строительства в условиях неустойчивых характеристик геологической среды, которыми, в частности, характеризуются зоны горообразования и Арктические территории [5-7].

Настоящая статья завершает серию авторских публикаций по результатам моделирования сейсмических рисков в геологической среде в процессе проектирования и строительства объектов.

В первой статье серии описана вероятностная модель оценки параметров энергетических переходов в напряженно-деформированной геологической среде, во второй – разработаны две детерминированные модели (региональная, учитывающая влияние аномального гравитационного поля, и локальная, отражающая современные тектонические движения), примененные комплексно для оценки напряжений и смещений в геологической среде.

В настоящей статье, завершающей серию, приведена методика расчета зависимости магнитуд землетрясений M от величин сейсмического риска R , оцененного с помощью комплекса вероятностной, региональной и локальной моделей для всех исследованных глубинных уровней тестовой территории (8, 9, 10, 11, 13, 15, 17 и 33 км). Для этого построены регрессионные уравнения, позволяющие по значениям сейсмического риска определять магнитуды землетрясений.

Материалы и методы

Результаты модельных оценок соответствия магнитуд землетрясений величинам сейсмического риска.

На первом этапе для всех глубинных уровней тестовой территории, указанных выше, построены регрессионные уравнения, позволяющие по значениям геодинамического риска R определить магнитуды M , а затем различными методами оценены ошибки определения.

Приведем полученные результаты в виде регрессионных уравнений (1), а также графического отображения полученных зависимостей (Рисунки 1-8) и Таблица 1 оценок

отклонений рассчитанных значений от экспериментальных данных.

$$\left\{ \begin{array}{l} H = 8 \text{ км}; \quad M(R) = 11.22R^2 - 3.203R + 3.563; \\ H = 9 \text{ км}; \quad M(R) = 591.6R^3 - 808.9R^2 + 374R - 53.95; \\ H = 10 \text{ км}; \quad M(R) = -392.5R^4 + 903.4R^3 - 759R^2 + 283.3R - 35.71; \\ H = 11 \text{ км}; \quad M(R) = 1658R^3 - 2254R^2 + 1024R - 151.2; \\ H = 13 \text{ км}; \quad M(R) = 9.456R^2 - 2.925R + 3.496; \\ H = 15 \text{ км}; \quad M(R) = 247.9R^3 - 406.6R^2 + 223.9R - 36.97; \\ H = 17 \text{ км}; \quad M(R) = -3787R^4 + 8932R^3 - 7793R^2 + 2987R - 420.8; \\ H = 33 \text{ км}; \quad M(R) = 23.37R^3 - 43.24R^2 + 31.53R - 3.283. \end{array} \right. \quad (1)$$

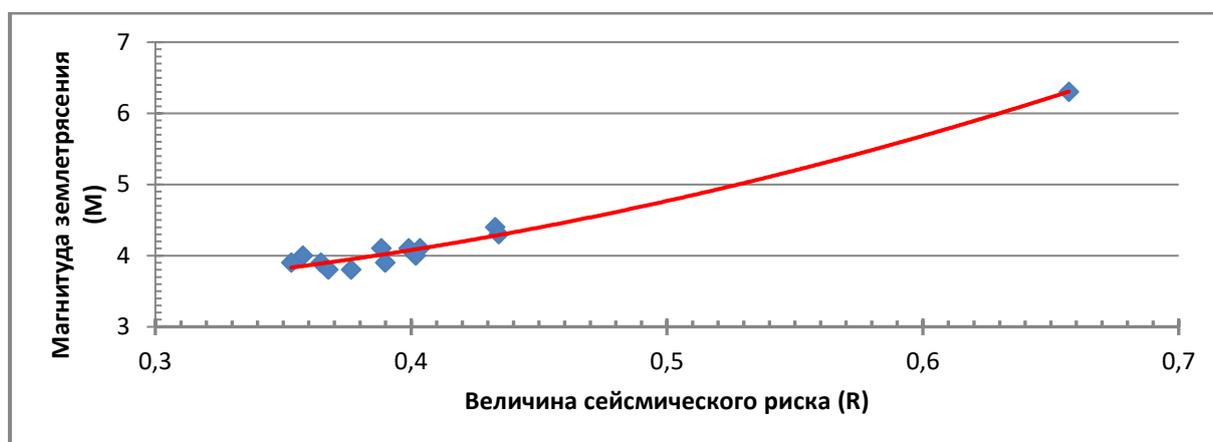


Рисунок 1 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 8 км
Figure 1 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 8 km

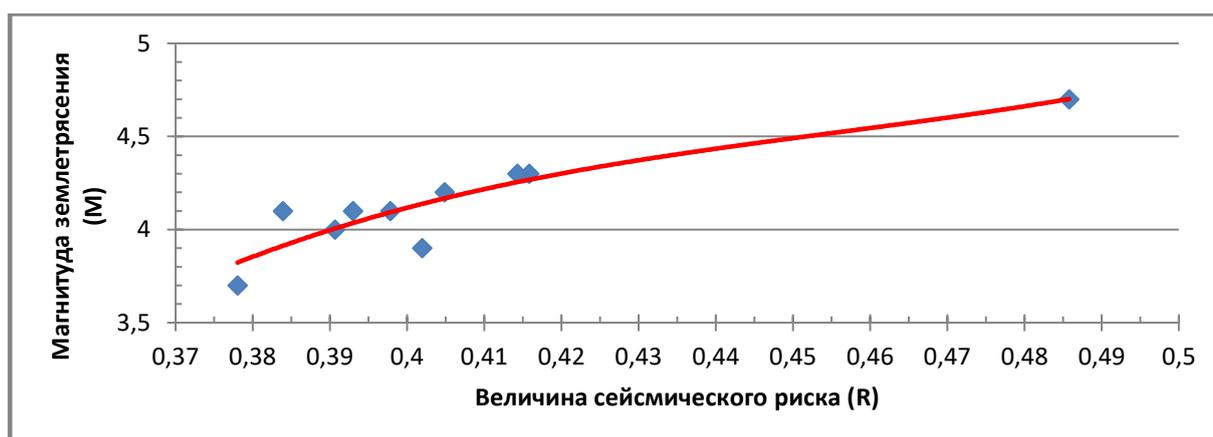


Рисунок 2 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 9 км
Figure 2 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 9 km

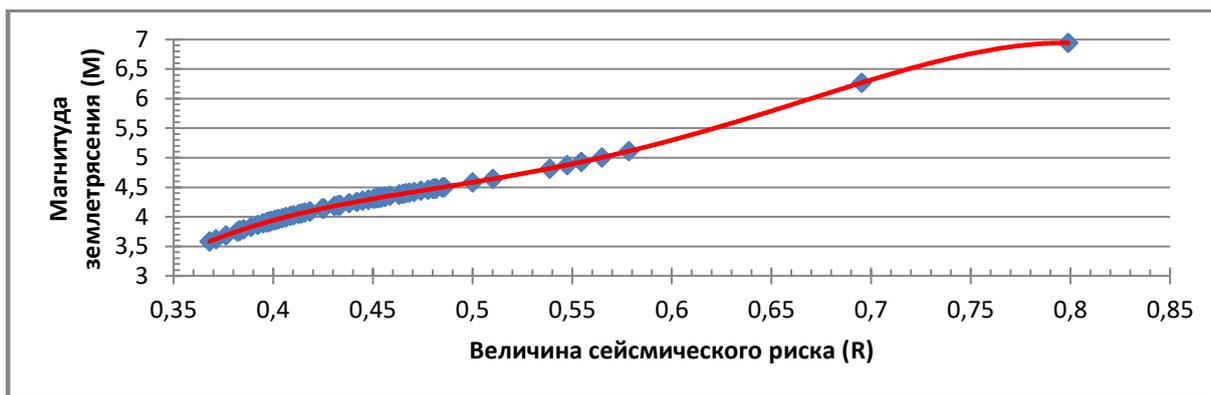


Рисунок 3 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 10 км
Figure 3 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 10 km



Рисунок 4 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 11 км
Figure 4 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 11 km

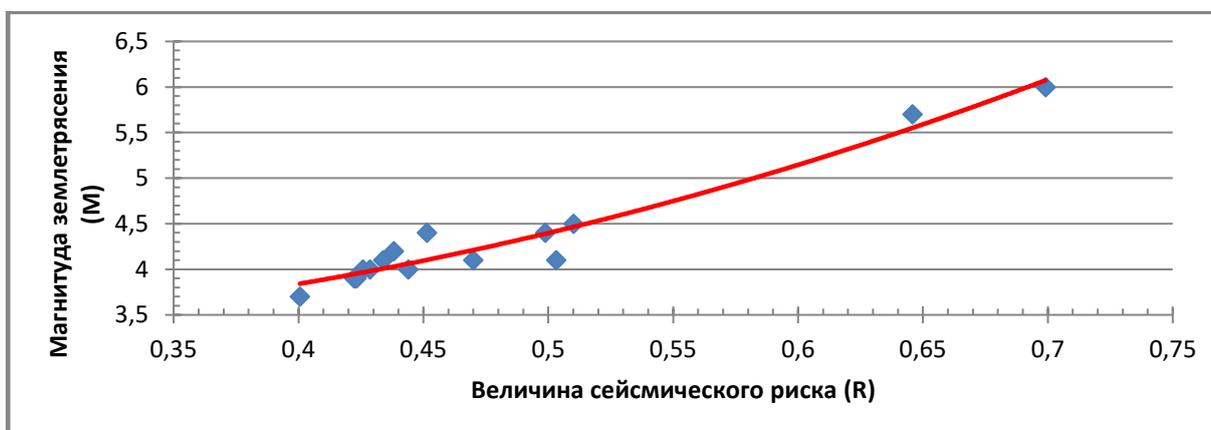


Рисунок 5 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 13 км
Figure 5 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 13 km

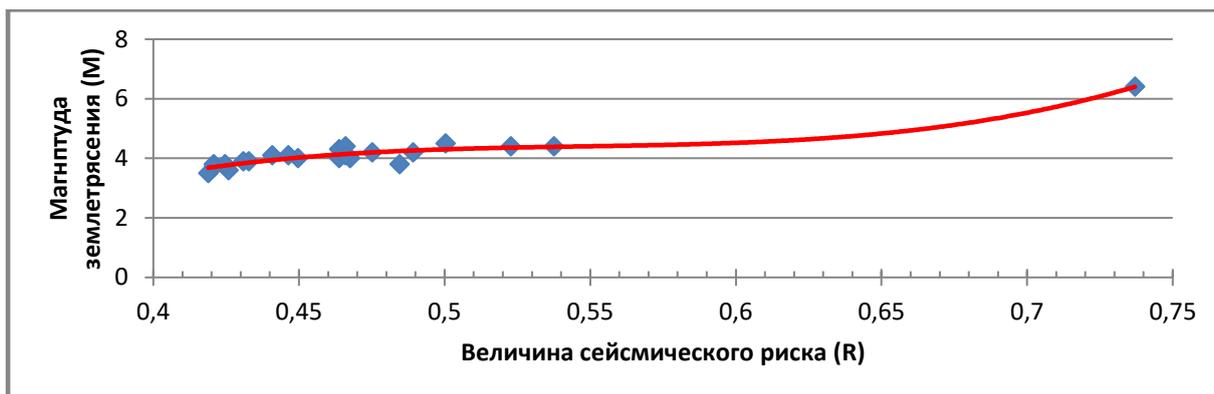


Рисунок 6 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 15 км
Figure 6 - Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 15 km

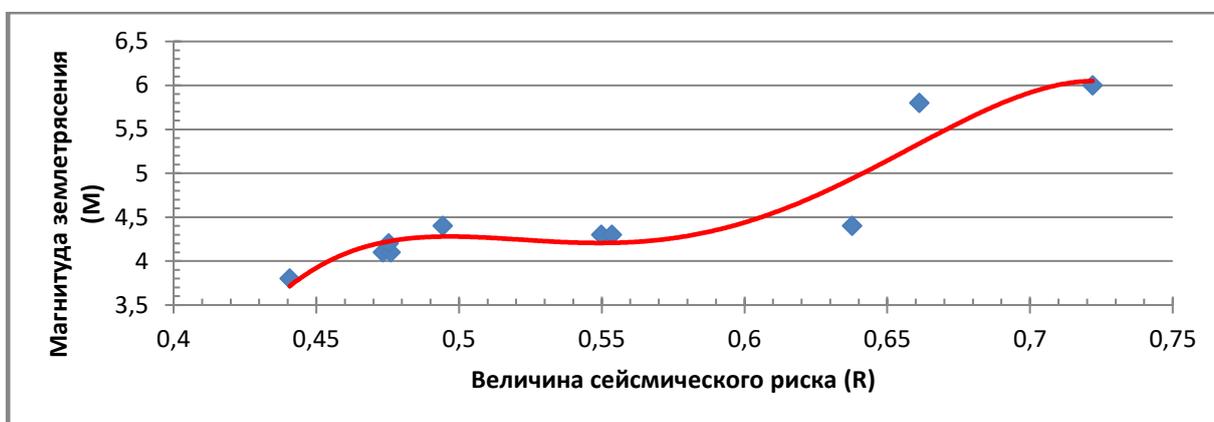


Рисунок 7 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 17 км
Figure 7 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 17 km



Рисунок 8 – Зависимость магнитуд землетрясений M от величин рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 33 км
Figure 8 – Dependence of earthquake magnitudes M on the calculated seismic risk R for a depth level of 33 km

Приведенные соотношения (1) представляют собой модели, связывающие рассчитанные сейсмические риски и магнитуды землетрясений.

Уравнения (1) проанализированы различными методами [8-10] на ошибки, отражающие отклонения теоретических от эмпирических данных.

Для этого осуществлены оценки средней абсолютной \bar{e} и средней относительной $\bar{e}_{\text{отн}}$ ошибок, среднеквадратической погрешности моделирования S_u , а также определены коэффициенты соответствия ϕ^2 и детерминации \bar{A} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n |u_i - u_i^*|}{n}, \\ \bar{e}_{\text{отн}} = \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{u_i - u_i^*}{u_i} \right| \right) \cdot 100\%, \\ S_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - u_i^*)^2}{n-1}}, \\ \phi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - u_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}_i)^2}, \\ \bar{A} = 1 - \phi^2, \end{array} \right. \quad (2)$$

где u_i – экспериментальные значения; \bar{u}_i – средняя величина экспериментальных значений; u_i^* – модельные значения; n – количество экспериментальных и модельных значений.

Вычисленные по формулам (2) оценки для всех исследованных глубинных уровней приведены в Таблице 1. Результаты анализа полученных различными методами значений оценок свидетельствуют о том, что уравнения (1) обладают хорошими прогностическими свойствами.

Таблица 1 – Оценки отклонений модельных значений от экспериментальных данных
Table 1 – Estimates of deviations of calculated values from experimental data

Глубина, км	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	ϕ^2	\bar{A}
8	0,073	1,817	0,093	0,020	0,980
9	0,090	2,229	0,117	0,192	0,808
10	0,165	3,760	0,237	0,180	0,820
11	0,093	2,213	0,125	0,240	0,760
13	0,108	2,511	0,146	0,050	0,950
15	0,110	2,760	0,155	0,073	0,927
17	0,175	3,753	0,254	0,118	0,882
33	0,181	4,331	0,241	0,246	0,754

Результаты

Определение соответствия нормативных требований величинам сейсмического риска

На втором этапе для определения соответствия расчетных сейсмических воздействий, регламентированных Сводом правил (СП) 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах», величинам вероятностного сейсмического риска, полученным с помощью геодинамических моделей, описанных выше, построим функциональные зависимости между интенсивностью сейсмических событий I , выраженной в баллах, и значениями рассчитанного сейсмического риска R .

Интенсивность I произошедшего землетрясения в баллах оценивается с помощью уравнения макросейсмического поля [11-13]:

$$I = aM - b \cdot \lg \sqrt{H^2 + L^2} + c, \quad (3)$$

где M – магнитуда землетрясения, определенная по поверхностным волнам; H – глубина залегания очага землетрясения (в км); L – эпицентральное расстояние (в км); a, b, c – коэффициенты, определяемые эмпирическим путем.

Получаемые из соотношения (3) оценки интенсивности соответствуют согласно строительным нормам и правилам [12] грунтам II категории по сейсмическим свойствам. При использовании уравнения макросейсмического поля данные о магнитуде, глубине очага и эпицентральном расстоянии рекомендуется получать из баз данных Геофизической службы Российской Академии Наук [12]. Однако допускается использовать значения параметров очага, определенных и другими способами [12].

Оценки коэффициентов a, b, c в уравнении макросейсмического поля (3) приводятся в специальных приложениях. Для регионов, применительно к которым отсутствуют оценки их значений, как правило, используют их усредненные значения: $a = 1.5$; $b = 3.5$; $c = 3.0$.

Для исследуемого тестового региона, каковым является Армения и прилегающие к ней территории сопредельных государств, рекомендуется [12] использовать следующие значения коэффициентов: $a = 1.5$; $b = 3.0$; $c = 3.91$.

Полагая $L = 0$, получим уравнение макросейсмического поля, отвечающее значению интенсивности над эпицентром землетрясения:

$$I = 1.5M - 3.0 \cdot \lg H + 3.91. \quad (4)$$

Представим модельные зависимости (4), связывающие вычисленный сейсмический риск R и интенсивность землетрясения I в баллах, для исследованных глубин тестового региона (Рисунки 9-16):

$$\left\{ \begin{array}{l} H = 8 \text{ км}; \quad I(R) = 16.83R^2 - 4.805R + 6.545; \\ H = 9 \text{ км}; \quad I(R) = 887.4R^3 - 1213.35R^2 + 561R - 79.878; \\ H = 10 \text{ км}; \quad I(R) = -588.75R^4 + 1355.1R^3 - 1138.5R^2 + 424.95R - 52.655; \\ H = 11 \text{ км}; \quad I(R) = 2487R^3 - 3381R^2 + 1536R - 226.014; \\ H = 13 \text{ км}; \quad I(R) = 14.184R^2 - 4.386R + 5.812; \\ H = 15 \text{ км}; \quad I(R) = 371.85R^3 - 609.9R^2 + 335.85R - 55.073; \\ H = 17 \text{ км}; \quad I(R) = -5680.5R^4 + 13398R^3 - 11689.5R^2 + 4480.5R - 630.98; \\ H = 33 \text{ км}; \quad I(R) = 35.055R^3 - 64.86R^2 + 47.295R - 5.57. \end{array} \right. \quad (5)$$

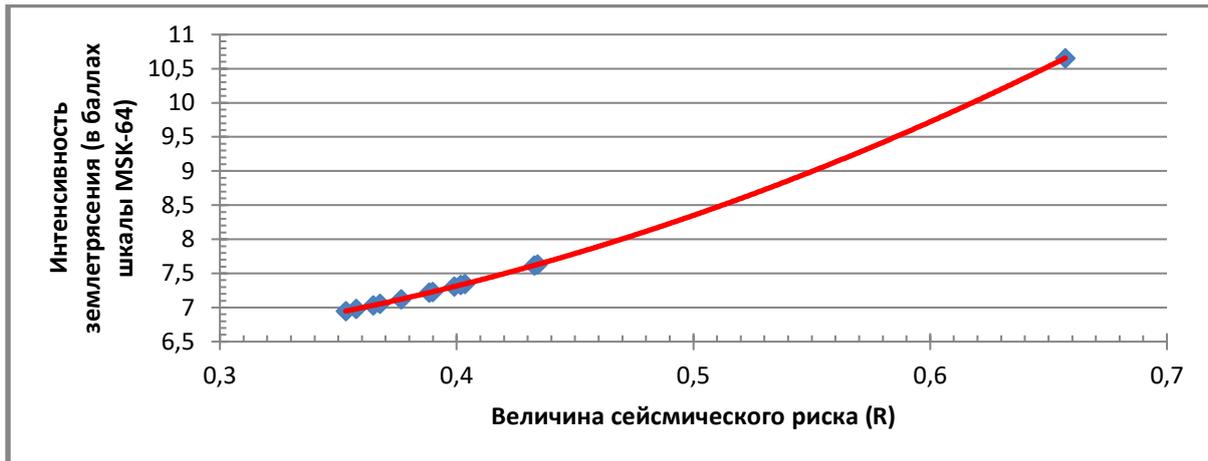


Рисунок 9 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 8 км
Figure 9 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 8 km

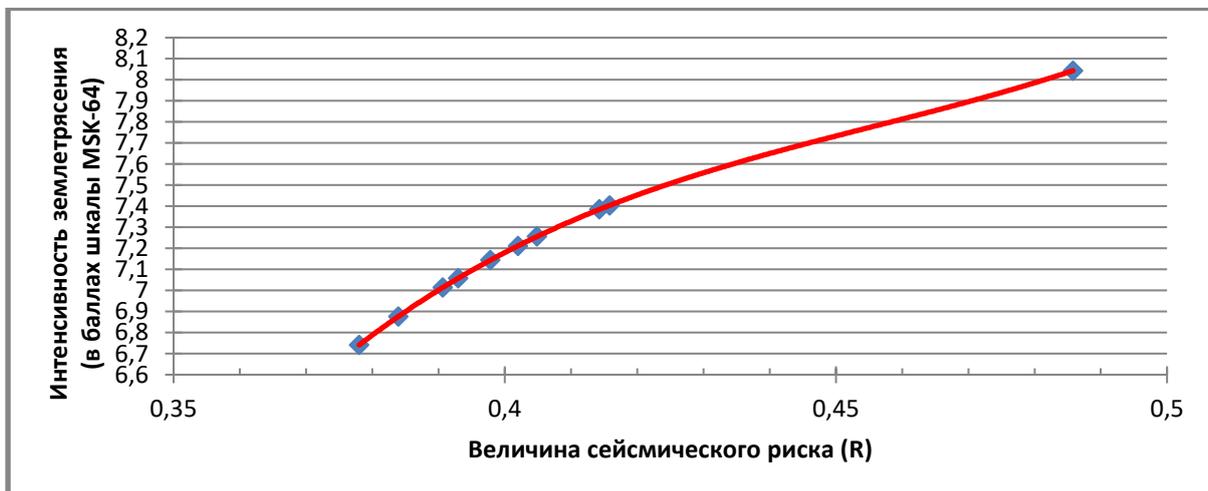


Рисунок 10 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 9 км
Figure 10 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 9 km

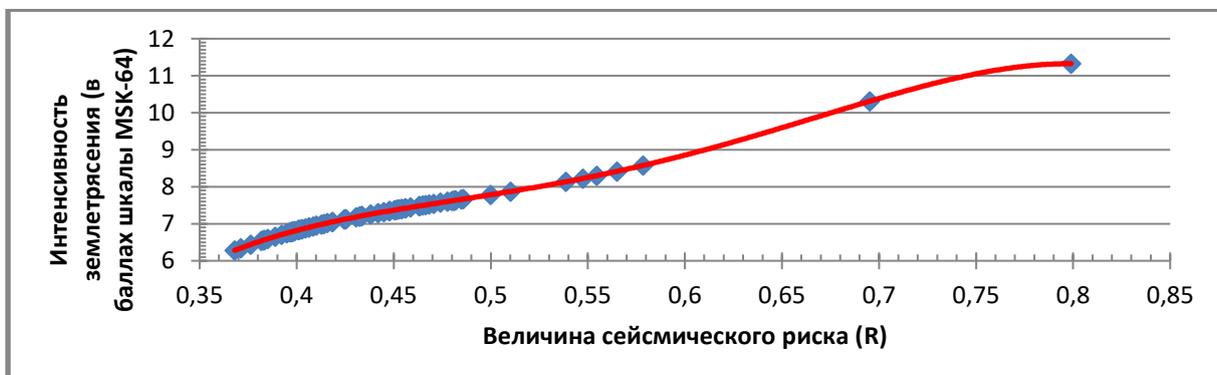


Рисунок 11 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 10 км
Figure 11 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 10 km

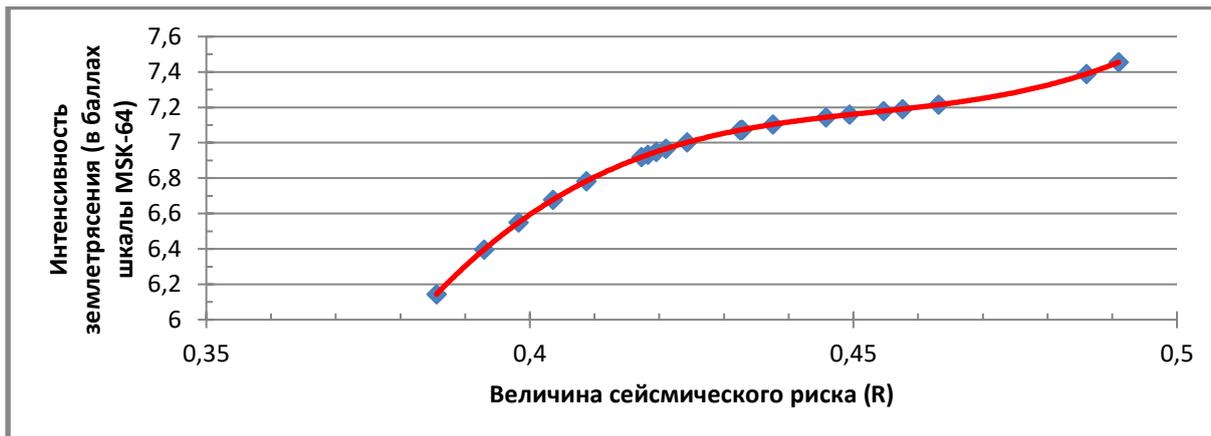


Рисунок 12 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 11 км
Figure 12 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 10 km

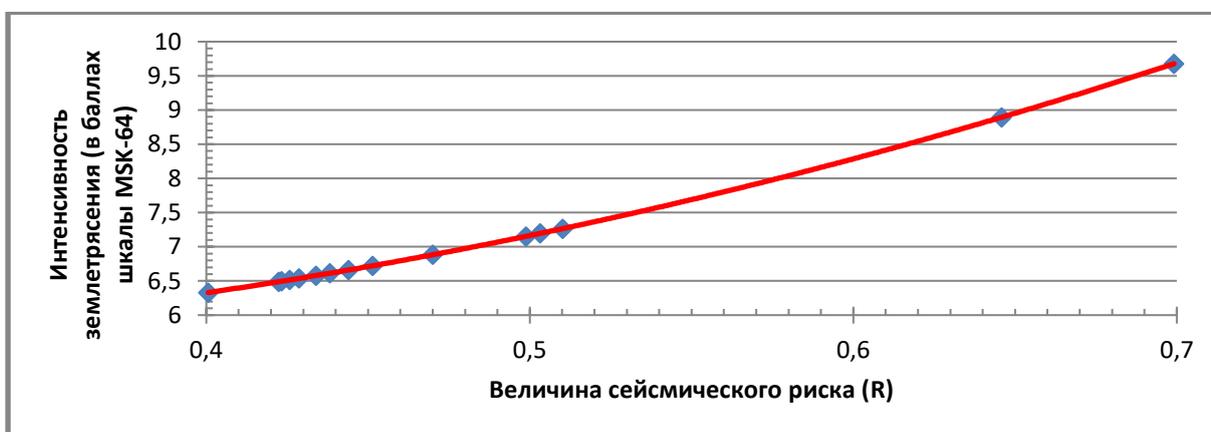


Рисунок 13 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 13 км
Figure 13 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 13 km

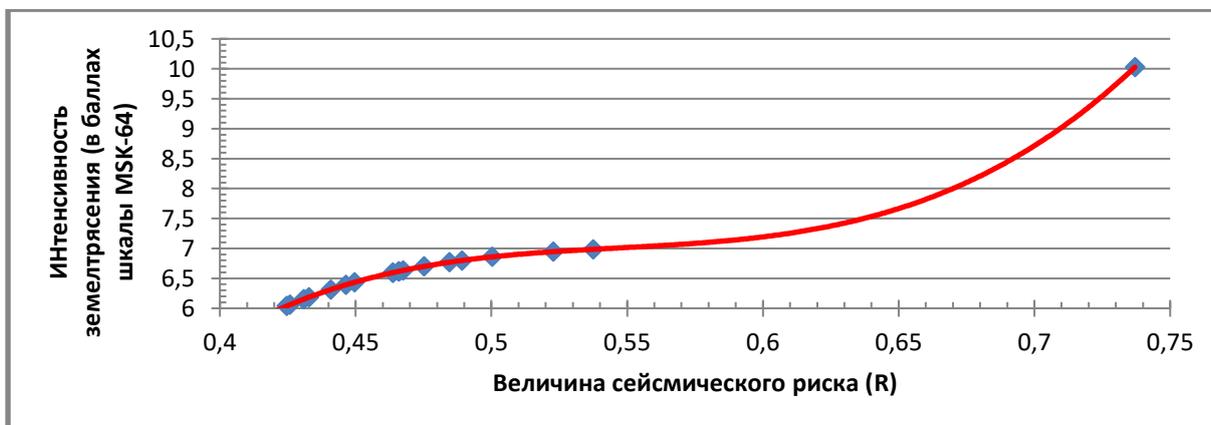


Рисунок 14 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 15 км
Figure 14 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 15 km

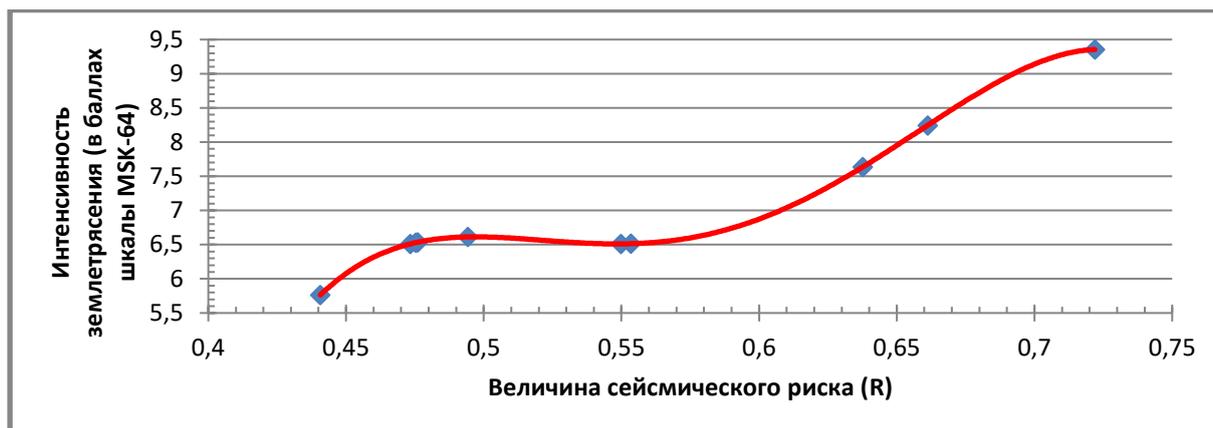


Рисунок 15 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 17 км
Figure 15 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 15 km

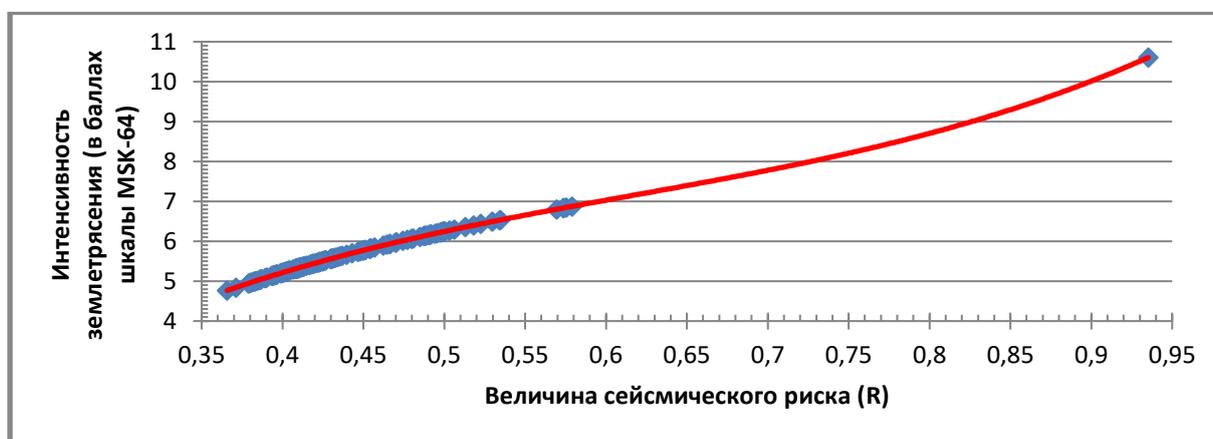


Рисунок 16 – Зависимость интенсивности землетрясений I от величины рассчитанного сейсмического риска R для глубинного уровня 33 км
Figure 16 – Dependence of earthquake intensity I on the calculated seismic risk R for a depth level of 33 km

Таблица 2 – Оценки отклонений модельных значений от экспериментальных данных
Table 2 – Estimates of model deviations values from experimental data

Глубина, км	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
8	0,109	1,513	0,140	0,020	0,980
9	0,136	1,901	0,176	0,192	0,808
10	0,247	3,297	0,355	0,180	0,820
11	0,139	1,967	0,187	0,240	0,760
13	0,161	2,305	0,219	0,050	0,950
15	0,165	2,593	0,232	0,073	0,927
17	0,262	3,637	0,381	0,118	0,882
33	0,272	4,836	0,362	0,246	0,754

Из анализа Рисунков 9-16 следует, что уравнения (5) с высокой точностью

описывают эмпирические данные. Значения оценок отклонений моделей от экспериментальных данных для исследованных глубин, вычисленные по соотношениям (2), приведены в Таблице 2.

Согласно данным, приведенным в Таблице 2, модельные уравнения (4), связывающие интенсивность землетрясений I (в баллах по шкале MSK-64 – шкала Медведева, Шпонхойера, Карника, версия 1964 г.) и величину рассчитанного сейсмического риска R , также обладают очень хорошими прогностическими свойствами, поскольку значения средних относительных ошибок меньше 5 %, а коэффициенты объясняемости варьируются в пределах 75-98 %.

Построим модели соответствия расчетных сейсмических воздействий, регламентированных СП 14.13330.2018 [14], и величин вероятностного сейсмического риска, полученных с помощью математического моделирования.

Как известно, к расчетным сейсмическим воздействиям относятся кинематические параметры грунта, определяющие возможную интенсивность нагрузочного эффекта от расчетного землетрясения на конкретной площадке строительства и для конкретного строительного объекта, применяемые в расчетах сейсмостойкости сооружений (ускорения, скорости, смещения) в уровне основания, а также зависимости изменения таких параметров во времени (амплитуда, длительность, спектральный состав), отражающихся в акселерограммах, велосигмах, сейсмограммах. Расчетные сейсмические воздействия могут быть выражены как в единицах СИ, так и в баллах шкалы MSK-64 с точностью дискретизации в 0,1 балла. В Национальном стандарте Российской Федерации «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности» (ГОСТ Р 57546-2017) применяются следующие обозначения кинематических параметров сейсмических воздействий [12]: PGA – пиковое ускорение грунта, см/с²; PGV – пиковая скорость колебаний грунта, см/с; PGD – пиковое смещение грунта, см.

Как указано в [12], инструментальные инженерно-сейсмометрические данные применяются для оценки интенсивности землетрясения в баллах от 1 до 9.5. Интенсивности свыше 9.5 баллов вызываются не столько вибрациями грунта, сколько остаточными деформациями (во всех шкалах высокие интенсивности связывают с изменениями рельефа). При обработке инструментальных записей измеряют пиковые характеристики PGA , PGV , PGD и ширину импульса (продолжительность колебаний τ).

Определение интенсивности землетрясения проводится с учетом как показателей движения грунта (PGA , PGV , PGD), так и произведений $PGA \cdot \sqrt{\tau}$ (аналог интенсивности по Ариасу) и $PGA \cdot PGV$ (мощность сейсмической волны). При этом определение интенсивности на основании инструментальных данных проводят непосредственно для дневной поверхности [12].

В справочном приложении «Б» [12] представлены эмпирические значения параметров движений грунта при интенсивностях землетрясений I из диапазона 1.0 – 9.5 баллов, а также стандартные отклонения $\sigma(I)$, соответствующие случайным вариациям параметров и интенсивности.

В примечаниях к справочному приложению «Б» отмечено, что в таблицах с эмпирическими значениями параметров движения грунта указаны средние значения ускорения, скорости и смещения (PGA , PGV , PGD), а при их использовании применяется средняя величина продолжительности $\tau = 5$ с. Также отмечено, что значения PGD могут быть несколько заниженными, поскольку частотные характеристики акселерометров не рассчитаны на регистрацию больших периодов.

Для построения математических моделей согласования расчетных сейсмических воздействий, регламентированных СП 14.13330.2018, величинам вероятностного сейсмического риска, полученным с помощью математического моделирования,

используем формулы для оценок интенсивности с округлением до 0.1 балла:

$$\begin{cases} I = 2.50 \lg(PGA) + 1.89 \pm 0.6; \\ I = 2.13 \lg(PGV) + 4.74 \pm 0.55; \\ I = 1.47 \lg(PGD) + 6.26 \pm 0.7; \\ I = 2.50 \lg(PGA) + 1.25 \lg \tau + 1.05 \pm 0.35; \\ I = 1.325 \lg(PGA \cdot PGV) + 2.83 \pm 0.26. \end{cases} \quad (6)$$

Далее после аппроксимации и сглаживания построим линия тренда для каждого параметра расчетного сейсмического воздействия и определялся вид функциональной зависимости, связывающей конкретный параметр с интенсивностью землетрясений:

$$\begin{cases} PGA(I) = 0.175 \cdot \exp(0.921 \cdot I); \\ PGV(I) = 0.005 \cdot \exp(1.082 \cdot I); \\ PGD(I) = 0.00006 \cdot \exp(1.559 \cdot I), \end{cases} \quad (7)$$

или

$$\begin{cases} I(PGA) = 1.085 \cdot \ln(PGA) + 1.889; \\ I(PGV) = 0.925 \cdot \ln(PGV) + 4.768; \\ I(PGD) = 0.64 \cdot \ln(PGD) + 6.254. \end{cases} \quad (8)$$

Затем для каждого из расчетных сейсмических воздействий (кинематических параметров) выполним последовательные приближения интенсивностей землетрясений, рассчитанных по соотношениям (5) и (8) при условиях:

$$\begin{cases} |I(R_j) - I(PGA_j)| \leq \varepsilon; \\ |I(R_j) - I(PGV_j)| \leq \varepsilon; \\ |I(R_j) - I(PGD_j)| \leq \varepsilon; \end{cases} \quad (9)$$

где $j = 1, \dots, n$ (n – количество расчетных пар интенсивностей);

ε – точность приближения.

На основании приближений (9) получены величины кинематических параметров пикового ускорения грунта PGA , пиковой скорости смещений грунта PGV , пикового смещения грунта PGD и соответствующих им значений вероятностного сейсмического риска, рассчитанного с помощью математического моделирования.

Все это позволило для каждого из исследованных глубинных уровней тестовой территории получить уравнения, связывающие расчетные сейсмические воздействия (кинематические параметры) и величины вероятностного сейсмического риска.

Приведем уравнения, связывающие на исследованных глубинных уровнях пиковое ускорение грунта и сейсмический риск для $I < 7.4$:

$$\begin{cases} H = 8_{км}; & PGA(R) = 6725R^2 - 4155R + 735; \\ H = 9_{км}; & PGA(R) = -1019R^2 + 2764R - 811.9; \\ H = 10_{км}; & PGA(R) = 44573R^3 - 56726R^2 + 25216R - 3767; \\ H = 11_{км}; & PGA(R) = -12612R^2 + 11781R - 2617; \\ H = 13_{км}; & PGA(R) = 3951R^2 - 2864R + 574.1; \\ H = 15_{км}; & PGA(R) = -2985R^2 + 3441R - 877.2; \\ H = 17_{км}; & PGA(R) = -13960R^2 + 13840 - 3352; \\ H = 33_{км}; & PGA(R) = 1106R^2 - 653.4R + 105.8. \end{cases} \quad (10)$$

Уравнения, интегрально связывающие пиковое ускорение грунта и вероятностный сейсмический риск применительно ко всем глубинным уровням для

соответствующих диапазонов интенсивности землетрясений, записываются в виде:

$$\begin{cases} PGA(R) = 241.2R + 46.07; & 7.4 \leq I < 8.5; \\ PGA(R) = 10250R - 6427; & 8.5 \leq I < 9.5; \\ PGA(R) = 13181R - 7904; & 9.5 \leq I \leq 10.0. \end{cases} \quad (11)$$

Оценки отклонений значений, полученных на моделях (10) и (11), от экспериментальных данных по пиковому ускорению грунта PGA от величины сейсмического риска R для исследованных глубин тестовой территории и диапазонов сейсмической интенсивности приведены в Таблицах 3 и 4.

Аналогичным образом запишем уравнения, связывающие пиковые скорости смещений грунта и вероятностный сейсмический риск, и соответствующие оценки отклонений моделей от экспериментальных данных (Таблицы 4-6):

для $I < 7.5$

$$\begin{cases} H = 8 \text{ км}; & PGV(R) = 928.5R^2 - 589.6R + 103; \\ H = 9 \text{ км}; & PGV(R) = 103.3R^2 + 152.6R - 64.06; \\ H = 10 \text{ км}; & PGV(R) = 311.1R^2 - 114.9R + 5.355; \\ H = 11 \text{ км}; & PGV(R) = -1339R^2 + 1260R - 282.5; \\ H = 13 \text{ км}; & PGV(R) = 506.1R^2 - 376.6R + 75.16 \\ H = 15 \text{ км}; & PGV(R) = -285.1R^2 + 337.4R - 87.91; \\ H = 17 \text{ км}; & PGV(R) = 10937R^3 - 17075R^2 + 8866R - 1524; \\ H = 33 \text{ км}; & PGV(R) = 141.1R^2 - 93.35R + 16.38; \end{cases} \quad (12)$$

для $7.5 \leq I < 8.5$ и $8.5 \leq I \leq 10.0$, соответственно:

$$\begin{cases} PGV(R) = -13728R^3 + 23216R^2 - 12566R + 2217; \\ PGV(R) = 33512R^2 - 47883R + 17116; \end{cases} \quad (13)$$

Таблица 3 – Оценки отклонения моделей (10) от экспериментальных данных по пиковому ускорению грунта (PGA) на разных глубинных уровнях
Table 3 – Estimates of the deviation of model values (10) from experimental data on peak ground acceleration (PGA) at different depth levels

Глубина, км	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
8	0,262	0,202	0,311	0,0001	0,9999
9	0,266	0,198	0,331	3,47E-04	0,999966
10	1,479	1,164	2,160	0,0008	0,999224
11	0,706	0,671	0,895	0,0014	0,998648
13	0,355	0,398	0,493	0,0003	0,999674
15	0,355	0,589	0,440	0,0004	0,999585
17	0,477	0,789	0,534	0,0010	0,999022
33	0,150	0,487	0,188	0,0001	0,99989

Таблица 4 – Оценки отклонения моделей (11) от экспериментальных данных по пиковому ускорению грунта (PGA) в диапазонах сейсмической интенсивности
Table 4 – Estimates of models deviation values (11) from experimental data on peak ground acceleration (PGA) in various ranges of seismic intensity

Диапазон интенсивности, I	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
$7.4 \leq I < 8.5$	2,938	1,788	4,359	0,042	0,956
$8.5 \leq I < 9.5$	0,037	0,009	0,056	0	1
$9.5 \leq I \leq 10.0$	0,530	0,035	0,749	4,49E-06	1

Таблица 5 – Оценки отклонения модели от экспериментальных данных на исследованных глубинах по пиковой скорости смещения грунта (PGV)
Table 5 – Estimates of models deviation values from experimental data at the studied depths by the peak rate of soil displacement (PGV)

Глубина, км	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
8	0,052	0,380	0,064	0,0003	0,9997
9	0,039	0,285	0,045	3,71E-05	1
10	0,048	0,374	0,071	0,0002	1
11	0,086	0,907	0,105	0,0014	0,9986
13	0,055	0,682	0,068	0,0005	0,9995
15	0,055	0,976	0,066	0,0008	0,9992
17	0,185	3,025	0,211	0,0013	0,9987
33	0,028	1,144	0,034	0,0004	0,9996

Таблица 6 – Оценки отклонения модели от экспериментальных данных по пиковой скорости смещения грунта (PGV)
Table 6 – Estimates of model deviations from experimental data on the peak rate of soil displacement (PGV)

Диапазон интенсивности, I	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
$7.5 \leq I < 8.5$	1,168	3,371	1,482	0,0046	0,9954
$8.5 \leq I < 10.0$	5,259	2,694	6,441	0,0070	0,993

И, наконец, приведем уравнения, связывающие пиковые смещения грунта и вероятностный сейсмический риск, а также значения оценок отклонений модели и экспериментальных данных (Таблицы 7 и 8):

для $I < 7.5$

$$\left\{ \begin{array}{l} H = 8 \text{ км}; \quad PGD(R) = 588.3R^2 - 394.5R + 68.95; \\ H = 9 \text{ км}; \quad PGD(R) = 414R^2 - 225.3R + 28.13; \\ H = 10 \text{ км}; \quad PGD(R) = 321.3R^2 - 206.7R + 33.68; \\ H = 11 \text{ км}; \quad PGD(R) = -393.1R^2 + 381.7R - 88.02; \\ H = 13 \text{ км}; \quad PGD(R) = 255.2R^2 - 199.7R + 40.25; \\ H = 15 \text{ км}; \quad PGD(R) = -53.34R^2 + 73.3R - 20.8; \\ H = 17 \text{ км}; \quad PGD(R) = 4167R^3 - 6418R^2 + 3288R - 558.8; \\ H = 33 \text{ км}; \quad PGD(R) = 176.3R^3 - 188.7R^2 + 70.16R - 8.956, \end{array} \right. \quad (14)$$

для $7.5 \leq I < 8.5$ и $8.5 \leq I \leq 10.0$, соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l} PGD(R) = -13364R^3 + 23297R^2 - 13095R + 2401; \quad 7.5 \leq I < 8.5; \\ PGD(R) = 50997R^2 - 72835R + 26015; \quad 8.5 \leq I \leq 10.0. \end{array} \right. \quad (15)$$

Таблица 7 – Оценки отклонения модели от экспериментальных данных на исследованных глубинах по пиковому смещению грунта (PGD)

Table 7 – Estimates of model deviation from the experimental data at the studied depths by the peak displacement of the soil (PGD)

Глубина, км	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
8	0,036	0,841	0,042	0,0005	0,9995
9	0,009	0,270	0,011	7,42E-06	1
10	0,034	0,969	0,050	0,0004	0,9996
11	0,040	2,017	0,050	0,0021	0,9979
13	0,034	1,634	0,046	0,0013	0,9987
15	0,029	2,508	0,036	0,0021	0,9979
17	0,049	3,917	0,072	0,0008	0,9992
33	0,002	0,705	0,003	3,5E-05	1

Таблица 8 – Оценки отклонения модели от экспериментальных данных по пиковому смещению грунта (PGD) в разных диапазонах I

Table 8 – Estimates of model deviation from experimental data on peak ground displacement (PGD) in different ranges I

Диапазон интенсивности, I	Значения оценок				
	\bar{e}	$\bar{e}_{\text{отн}}, \%$	S_u	φ^2	\bar{A}
$7.5 \leq I < 8.5$	1,01 3	6,31 9	1,56 7	0,008 0	0,992 0
$8.5 \leq I < 10.0$	7,09 4	3,63 1	8,68 9	0,005 2	0,994 8

Обсуждение

Системы уравнений (5)-(15) представляют собой математические модели соответствия расчетных сейсмических воздействий, регламентированных СП 14.13330.2018, величинам вероятностного сейсмического риска, полученных с помощью математического моделирования. Согласно данным, приведенным в Таблицах 3-8, уравнения (5)-(15), связывающие кинематические параметры (расчетные сейсмические воздействия PGA, PGV, PGD) и величины сейсмического риска R , также обладают хорошими объясняющими и прогнозными свойствами, отраженными в коэффициенте объясняемости, близком к 100 %.

Визуализируем результаты оценки соответствия расчетных сейсмических воздействий, регламентированных СП 14.13330.2018, величинам вероятностного сейсмического риска, полученным на модели. Для этого используются расчетные распределения значений магнитуд, интенсивностей возможных землетрясений, а также кинематических параметров (пиковых ускорений грунта, пиковых скоростей смещений грунта, пиковых смещений грунта), полученные в ходе реализации математических моделей на базе специального программного обеспечения. Представим два примера распределения магнитуд для глубинных уровней 8 и 33 км (Рисунки 17, 18).

На Рисунках 17, 18 приведены очень важные с прогнозной точки зрения результаты, полученные в ходе исследований всех глубинных уровней. Зная эквипотенциальные распределения магнитуд возможных землетрясений для них, исследователь фактически владеет информацией об оценочных значениях энергии будущих сейсмических событий. Дальнейшее изучение закономерностей распределения магнитуд землетрясений на различных глубинных уровнях дает возможность исследования миграции сейсмодформационной энергии и осуществления не только пространственного, но временного прогноза землетрясений.

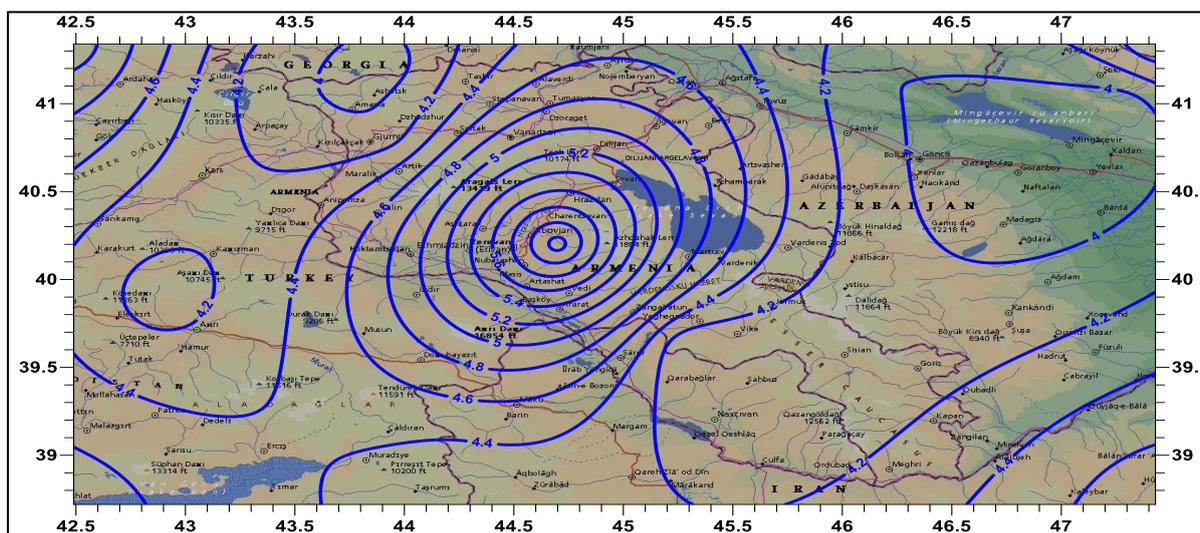


Рисунок 17 – Эквипотенциальное распределение магнитуд возможных землетрясений для тестовой территории. Глубина 8 км
 Figure 17 – Equipotential distribution of possible earthquakes magnitudes for the test area. Depth 8 km

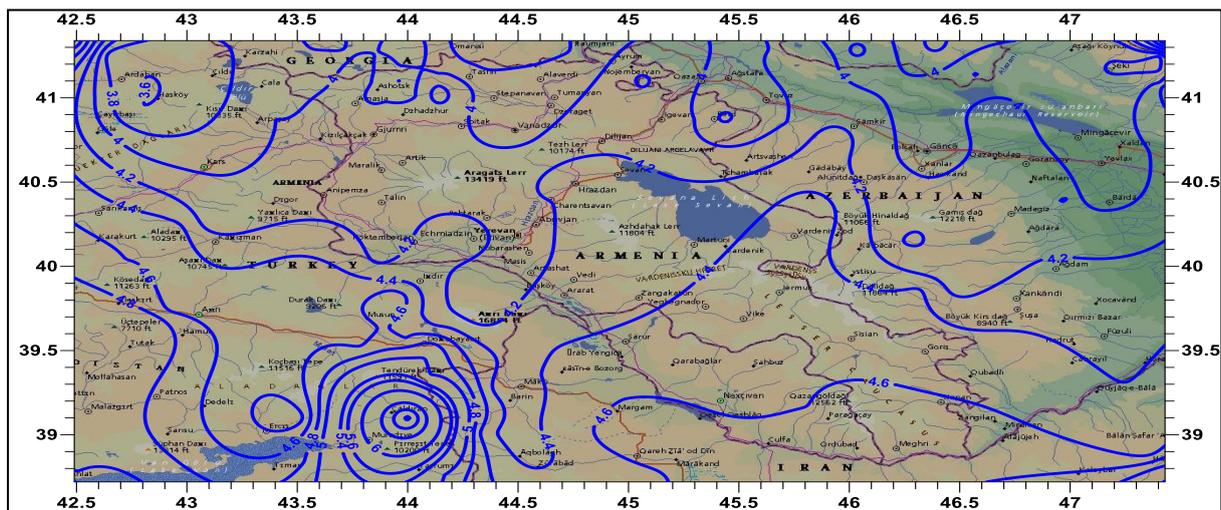


Рисунок 18 – Эквипотенциальное распределение магнитуд возможных землетрясений для тестовой территории. Глубина 33 км
Figure 18 – Equipotential distribution of possible earthquakes magnitudes for the test area. Depth 33 km

Один из важных выводов в результате анализа полученных результатов связан с построением новой шкалы сейсмической интенсивности возможных землетрясений как функции от рассчитанного вероятностного сейсмического риска и глубины залегания очага возможного землетрясения. Кроме того, очевидно, что требует своего решения и актуальная задача построения нормировочной шкалы, позволяющей переводить значения вероятностного сейсмического риска, рассчитанного для любого региона, в интенсивность единой макросейсмической шкалы как меры сотрясения в баллах. Аналогичные шкалы целесообразно построить и для расчетных кинематических параметров, таких, как пиковые ускорение, скорость смещения и само смещение грунта.

Заключение

Для достижения поставленной в серии из трех взаимосвязанных статей цели нахождения количественного соответствия, рассчитанного по математическим моделям сейсмических рисков тем сейсмическим воздействиям, которые регламентированы в Своде правил 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [14], решены следующие задачи:

- обоснованы критерии выбора тестовых территорий для доказательства указанного соответствия. В результате в качестве тестового региона выбрана территория Армении и смежных государств;
- на примере тестовой территории – Армении и смежных стран с помощью специально разработанных математических моделей на региональном и локальном масштабных уровнях выполнена оценка вероятностного сейсмического риска;
- разработаны модели и программное обеспечение определения соответствия сейсмических воздействий, регламентированных СП 14.13330.2018, величинам вероятностного сейсмического риска, рассчитанным с помощью математического моделирования;
- обоснована, разработана и реализована технология определения количественного соответствия величин сейсмического риска, рассчитанного по данным математического моделирования, расчетным сейсмическим воздействиям,

регламентированным СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах».

Сделан вывод о том, что перспективы продолжения исследований в данном направлении связаны с построением новой шкалы сейсмической интенсивности возможных землетрясений как функции от рассчитанного вероятностного сейсмического риска и глубины залегания очага возможного землетрясения, а также построением специальной нормировочной шкалы, позволяющей переводить вероятностный сейсмический риск, рассчитанный для любого региона, в интенсивность как меру сотрясения в баллах единой макросейсмической шкалы. Построение аналогичных шкал весьма актуально для ныне применяемых расчетных кинематических параметров – пиковые ускорение, скорость смещения и собственно смещение грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Минаев В.А., Кузьменко Н.А., Фаддеев А.О. *Моделирование и оценка геодинамических рисков*. М.: РТСофт и Космоскоп; 2017. 256 с.
2. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Методика оценки геоэкологического риска и геоэкологической безопасности ландшафтно-территориальных комплексов. *Материалы Семнадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности – 2008»*. М.: Академия ГПС МЧС России; 2008. С. 96–102.
3. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков. *Труды II Международной научно-практической конференции «Труды и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования»*. М.: Московский государственный университет; 2007. С. 329–334.
4. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Математические методы и модели в геоэкологическом районировании рекреационных территорий. *Материалы региональной научно-практической конференции «Математические методы и информационные технологии в современном обществе»*. Рязань: Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний; 2006. С. 111–117.
5. Абрамова А.В., Бондарь К.М., Данилов Р.М., В.А. Минаев В.А., Павлова С.А., Попов А.Н., Фаддеев А.О. *Моделирование геодинамических рисков в чрезвычайных ситуациях*. Под ред. К.М. Бондаря, В.А. Минаева, А.О. Фаддеева. Хабаровск: ДВЮИ МВД России; 2014. 124 с.
6. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В. Разломно-узловая тектоническая модель оценки геодинамической устойчивости территориальных систем. *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2014;1(29):90–99.
7. Минаев В.А., Топольский Н.Г., Фаддеев А.О., Бондарь К.М., Мокшанцев А.В. *Геодинамические риски и строительство. Математические модели*. М.: Академия ГПС МЧС России; 2017. 208 с.
8. Краснощеков П.С., Петров А.А. *Принципы построения моделей*. М.: Издательство Московского государственного университета; 1984. 264 с.
9. *Математическое моделирование*. Под ред. А.Н. Тихонова, В.А. Садовниченко и др. М.: Физматлит; 2005. 316 с.
10. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры*. М.: Физматлит; 2005. 320 с.
11. Аптикаев Ф.Ф. *Инструментальная шкала сейсмической интенсивности*. М.: Наука и образование; 2012. 176 с.
12. *ГОСТ Р 57546-2017 «Национальный стандарт Российской Федерации. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. ОКС 91.100.10. Дата введения 2017-09-01*. М.: Стандартинформ; 2017.

13. Перетокин С.А. Некоторые аспекты вероятностной оценки сейсмической опасности с использованием эмпирических зависимостей. *Инженерные изыскания*. 2016;7:39–47.
14. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП 11-7-81*. М.: Стандартинформ; 2018.

REFERENCES

1. Minaev V.A., Faddeev A.O., Kuzmenko N.A. Modeling and assessment of geodynamic risks. М.: "RTSoft"– "Kosmoscope", 2017. 256 p. (In Russ.)
2. Minaev V.A., Faddeev A.O. Method of assessing geocological risk and geocological safety of landscape-territorial complexes. *Materials of the Seventeenth scientific and technical conference "Security systems – 2008"*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2008. P. 96–102. (In Russ.)
3. Minaev V.A., Faddeev A.O. Safety and recreation: system view on the problem of risks. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Tourism and Recreation: fundamental and applied research"*. М.: Moscow state university, 2007. P. 329–334. (In Russ.)
4. Minaev V.A., Faddeev A.O. Mathematical methods and models in geocological zoning of recreational territories. *Materials of the regional scientific and practical conference "Mathematical methods and information technologies in modern society"*. Ryazan: Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service; 2006. P. 111-117. (In Russ.)
5. Abramova A.V., Bondar K.M., Danilov R.M., Minaev V.A., Pavlova S.A., Popov A.N., Faddeev A.O. *Modeling of geodynamic risks in emergency situations: monograph*. Edited by K.M. Bondar, V.A. Minaev, A.O. Faddeev. Khabarovsk: Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia; 2014. 124 p. (In Russ.)
6. Minaev V.A., Faddeev A.O., Abramova A.V. Fault-nodal tectonic model for assessing geodynamic stability of territorial systems. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere*. 2014;1(29):90-99. (In Russ.)
7. Minaev V.A., Topolsky N.G., Faddeev A.O., Bondar K.M., Mokshantsev A.V. *Geodynamic risks and construction. Mathematical models*. М.: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2017. 208 p. (In Russ.)
8. Krasnoshchekov P.S., Petrov A.A. *Principles of model construction*. М.: Moscow State University; 1984. 264 p. (In Russ.)
9. *Mathematical modeling*. Edited by A.N. Tikhonov, V.A. Sadovnichy and others. М.: Fizmatlit; 2005. 316 p. (In Russ.)
10. Samarskiy A.A., Mikhailov A.P. *Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples*. М.: Fizmatlit; 2005. 320 p. (In Russ.)
11. Aptikaev F.F. *Instrumental scale of seismic intensity*. М.: Science and education; 2012. 176 p. (In Russ.)
12. State Standard R 57546-2017 "National Standard of the Russian Federation. Earthquakes. The scale of seismic intensity. OKS 91.100.10. Date of introduction 2017-09-01. М.: Standartinform; 2017. (In Russ.)
13. Peretokin S.A. Some aspects of probabilistic assessment of seismic hazard using empirical dependencies. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering surveys*. 2016;7:39-47. (In Russ.)
14. Code of Rules 14.13330.2018 "Construction in seismic areas". Updated edition of SNiP 11-7-81*. М.: Standartinform; 2018. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Степанов Родион Олегович, кандидат технических наук, доцент, директор Дирекции арктических программ МГТУ им. Н. Я. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: stepanovr@bmstu.ru
ORCID: [0000-0001-9124-5924](https://orcid.org/0000-0001-9124-5924)

Rodion O. Stepanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Arctic Programs Directorate of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 13.10.2021; одобрена после рецензирования 13.01.2022; принята к публикации 25.02.2022.

The article was submitted 13.10.2021; approved after reviewing 13.01.2022; accepted for publication 25.02.2022.