

УДК 550.34.06

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.36.1.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.36.1.007)

## Моделирование энергетических переходов в напряженно-деформированной геологической среде для оценки сейсмических рисков (часть 1)

В.А. Минаев, Р.О. Степанов, А.О. Фаддеев

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

**Резюме.** В работе рассматривается модель, целью построения которой выступает решение проблемы количественного соотношения сейсмических рисков, рассчитанных на основе моделирования, сейсмическим воздействиям, регламентированным в Своде правил «Строительство в сейсмических районах». Статья выступает первой частью в серии научных публикаций на указанную тему. В ней впервые производится обоснование критериев выбора тестовых территорий, изложена методика проверки адекватности моделей оценки сейсмического риска, описана вероятностная модель энергетических переходов в напряженно-деформируемой геологической среде, представлен подход к оценке параметров модели через показатели трансформации потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды. Указывается содержание двух других частей серии. Критериям выбора тестового региона для практической апробации рассматриваемой модели соответствует территория Армении и смежных государств, характеризующихся высокой сейсмичностью, необходимой информационной базой и доказанной адекватностью применения моделей сейсмических рисков на всех глубинных уровнях нахождения эпицентров землетрясений. Детально рассмотрена методика проверки адекватности математической модели оценки сейсмического риска с помощью критерия Стьюдента. Показано, что при оценке параметров переходов между состояниями модели, описываемой уравнениями Колмогорова, необходимо учитывать как влияние региональных полей (аномальное гравитационное поле), так и локальных полей (современные тектонические движения). Таким образом, дано обоснование использования двух детерминированных моделей – региональной и локальной – для практической оценки напряжений и смещений в геологической среде.

**Ключевые слова:** модель, сейсмический риск, напряженно-деформируемая среда, тестовая территория, критерий, региональное и локальное геофизические поля.

**Для цитирования:** Минаев В.А., Степанов Р.О., Фаддеев А.О. Моделирование энергетических переходов в напряженно-деформированной геологической среде для оценки сейсмических рисков (часть 1). *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1061> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.007

## Modeling of energy transition in a stress-strain geological environment for seismic risk assessment (Part 1)

V.A. Minaev, R.O. Stepanov, A.O. Faddeev

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

**Abstract:** The article considers the model for solving the problem of seismic risk quantitative correlation, calculated on the basis of modeling, with seismic impacts regulated in the Seismic building

design code. The paper is the first part in a series of scientific publications on the subject. For the first time, it substantiates the criteria for selecting test territories, describes the methodology for verifying the adequacy of seismic risk assessment models, characterizes a probabilistic model of energy transitions in a stress-strain geological environment, and presents an approach to evaluating model parameters through the potential energy transformation indicators of the stress-strain geological environment. The content of the other two parts of the series is indicated. Armenia and neighboring states meet the criteria for choosing a region for practical testing of the model: high seismicity, the necessary information base and proven adequacy of the seismic risk model application at all deep levels of the earthquake epicenter locations. The method of the adequacy verification of the seismic risk assessment mathematical model, using the Student's criterion, is examined in detail. It is shown that when estimating the parameters of transitions between states of the model, described by the Kolmogorov equations, it is important to take into account both the influence of regional fields (anomalous gravitational field) and local fields (modern tectonic movements). Thus, a rationale is provided for employing two deterministic models – regional and local - for practical evaluation of stresses and displacements in the geological environment.

**Keywords:** model, seismic risk, stress-strain geological environment, test territory, criterion, regional and local geophysical fields.

**For citation:** Minaev V.A., Stepanov R.O., Faddeev A.O. Modeling of energy transition in a stress-strain geological environment for seismic risk assessment (Part 1). *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1061>  
DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.007 (In Russ).

### Проблема, цель и задачи моделирования

К сегодняшнему дню разработан Свод правил (СП), направленных на качественное выполнение изыскательских и строительных работ в области проектирования и возведения сооружений различного назначения (в том числе – стратегического и оборонного характера) и масштабного уровня. Согласно им, для определения сейсмических воздействий используются следующие методы и их комбинации:

- ориентированные на записи сильных землетрясений максимального расчетного уровня, имевших место на исследуемой площадке, или на аналоговые записи сильных землетрясений;
- основанные на моделях разлома (теоретический или полуэмпирический метод);
- синтез расчетных акселерограмм и оценок параметров движений грунта при расчетных воздействиях во временной и / или спектральной форме.

В СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» указано, что при выборе методов определения сейсмических колебаний грунта следует отдавать предпочтение *эмпирическому методу*, использующему записи сильных движений от землетрясений на площадке максимального расчетного уровня, поскольку они наиболее удовлетворяют реальной площадке. Применение *полуэмпирического метода* предпочтительно в случае отсутствия таких записей, но при наличии данных о параметрах разлома и распределении скоростей между разломом и площадкой.

*Теоретический метод* следует применять при наличии записи движений на площадке при слабых землетрясениях, а также параметров разлома, генерирующего землетрясение.

*Нормативный метод* применяется при ограниченной сейсмологической информации о площадке строительства, такой как магнитуда расчетного землетрясения

и расстояние до его эпицентра. В этом случае сейсмические воздействия синтезируются в соответствии со стандартным спектром реакции или спектральной плотности, продолжительностью и огибающей, зависящей от времени.

*Аналитический метод* применяется в случае отсутствия конкретной информации о площадке. Он рекомендуется для получения предварительных оценок.

Практически все названные методы (кроме аналитического) базируются на значительной по объему информации о пространственно-временном распределении, интенсивности воздействий и периодичности проявления сейсмических процессов для конкретной строительной площадки, либо основываются на результатах, полученных с помощью искусственным образом созданных акселерограмм.

Таким образом, требуются необходимые статистические данные не только для конкретного региона, но и для конкретной строительной площадки, «точечного» объекта. А если такой статистики для конкретного региона (или объекта) нет, или ее недостаточно?

Разработанная авторами технология оценки сейсмического риска с использованием модели энергетических переходов в напряженно-деформированной геологической среде, а также геодинамических региональной и локальной моделей оценки сейсмических рисков направлены на восстановление пространственного распределения напряжений, смещений и деформаций в указанной среде применительно к объемам различного масштабного уровня, что подтверждено многими авторскими публикациями [1-10].

Говоря более конкретно, указанная технология имеет конечной целью решение проблемы количественного соотнесения сейсмических рисков, рассчитанных по математическим моделям, сейсмическим воздействиям, регламентированным в указанных СП.

Для этого авторами решены следующие задачи:

1. Обоснованы критерии выбора тестовых территорий для практической реализации технологии количественного соотнесения величин сейсмического риска, рассчитанного по данным математического моделирования, сейсмическим воздействиям, регламентированным СП «Строительство в сейсмических районах».

2. Разработан комплекс математических моделей и программное обеспечение нахождения соответствия сейсмических воздействий, регламентированных СП «Строительство в сейсмических районах», величинам сейсмического риска, полученным с помощью моделирования

3. Осуществлен анализ пространственного распределения природно-техногенных опасностей, исходящих от геологической и инженерно-геологической составляющих окружающей среды, и выполнена с помощью математических моделей оценка сейсмического риска на тестовой территории.

4. Обоснована технология проведения количественного соответствия величин сейсмического риска, рассчитанного по данным математического моделирования, расчетным сейсмическим воздействиям, регламентированным указанным СП.

5. Выполнено тестирование отмеченной технологии на примере тестового региона.

В соответствии с указанными задачами материал исследования изложен в серии из трех взаимосвязанных статей.

В настоящей статье, изложенной в части первой серии, производится обоснование критериев выбора тестовых территорий, изложена методика проверки адекватности моделей оценки сейсмического риска, описана вероятностная модель

энергетических переходов в напряженно-деформируемой геологической среде, представлен подход к оценке параметров модели через показатели трансформации потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды. Во второй статье серии (часть 2) даны описание и результаты практической реализации региональной и локальной геодинамических моделей оценки напряжений, деформаций и смещений в геологической среде, необходимых для формирования энергетических параметров переходов в вероятностной модели сейсмических рисков. Наконец, в третьей статье серии (часть 3) приведены модели и описаны результаты количественного соотношения сейсмических рисков, рассчитанных по математическим моделям, сейсмическим воздействиям, регламентированным в указанных СП. Кроме того, для разных глубин тестовой территории охарактеризованы расчетные распределения значений магнитуд, интенсивностей возможных землетрясений, а также кинематических параметров (пиковых ускорений грунта, пиковых скоростей смещений грунта, пиковых смещений грунта).

### Методы решения задач оценки сейсмического риска

Определение критериев выбора тестовых территорий является основополагающей частью научно-исследовательских работ по созданию методов прогнозирования и оценки последствий природных и техногенных сейсмических катастроф как для орогенных, так и платформенных районов.

Исходя из темы статьи, логично среди первых двух критериев выбрать следующие.

**Критерий 1:** *тестовый район должен быть сейсмически активным.*

**Критерий 2:** *по тестовому району должна иметься вся информация, необходимая для проведения оценочных работ.*

Опыт работ, уже проведенных авторами, показал, что требуется следующая информация по тестовому району:

- данные по топографическому рельефу местности;
- гравиметрические данные (информация по изостатическим аномалиям);
- информация о скоростях современных вертикальных движениях земной коры (СВДЗК), полученных по данным повторного нивелирования;
- информация о скоростях современных горизонтальных движений земной коры;
- данные по новейшим вертикальным тектоническим движениям;
- данные по новейшим горизонтальным тектоническим движениям;
- данные по геологическому строению территории;
- данные по геоморфоструктурному районированию территории;
- информация по тепловому потоку;
- данные по профилям ГСЗ (глубинного сейсмического зондирования);
- информация по пространственно-временному распределению эпицентров произошедших землетрясений и их параметрам.

Почему так значителен объем информации? Дело в том, что рассчитывать величины сейсмического риска необходимо не по регламенту нормативных документов, а определять по результатам математического моделирования, требующего массу дополнительной и уточняющей информации.

Так, согласно [7], инженерный сейсмический риск  $R$  определяется как выраженная в процентах вероятность превышения расчетной сейсмической нагрузки за

период 50 лет. Кроме того, при оценке возможных последствий землетрясений рассчитываются другие виды сейсмического риска – социальный, экономический, экологический. Нужно также принимать во внимание, что для транспортных сооружений предельно допустимый инженерный сейсмический риск  $R$  зависит от класса сейсмостойкости объектов – I, II и III, меняющийся в диапазоне, соответственно, от 1 % до 2.5 %, 5 % и 10 %.

Риск  $R$  связан с величиной среднего интервала времени  $T$  между землетрясениями расчетной силы в месте строительства формулой:

$$R = \frac{50}{T}. \quad (1)$$

В качестве землетрясений расчетной силы принимаются сейсмические события, повторяющиеся в среднем через 2000-5000 лет для объектов класса сейсмостойкости I, через 1000 лет для сооружений класса сейсмостойкости II и через 500 лет для сооружений класса сейсмостойкости III.

Соотношение между интенсивностью землетрясения  $I$  на участках строительства, характеризующихся средними по сейсмическим свойствам грунтами и промежутками времени  $T$  между землетрясениями этой интенсивности, описывается уравнением сейсмического режима логарифмического типа:

$$I = a + b \lg T, \quad (2)$$

где  $a, b$  – некоторые постоянные коэффициенты.

Используя (1) и (2), получим уравнение сейсмического риска:

$$I = c + d \lg R, \quad (3)$$

где  $c, d$  – также некоторые постоянные коэффициенты.

Согласно [11], уравнение (3) позволяет оценить интенсивность расчетного землетрясения, соответствующую предельно допустимому риску для проектируемого сооружения.

Адекватность оценок сейсмической опасности зависит от исходных данных, принятых при составлении уравнения сейсмического режима. При нахождении зависимости между средними интервалами времени и силой землетрясений рекомендуется использовать данные службы сейсмических наблюдений, исторические сведения о землетрясениях и материалы палеосейсмогеологических исследований, а также методы расчета повторяемости землетрясений с оценкой интервалов времени между сотрясениями разной силы в месте строительства.

Отметим, что далеко не для всех территорий предполагаемого строительства имеются сведения о землетрясениях и, тем более, об их параметрах, также неизвестны периоды их повторяемости.

В частности, как быть в случае, если интервал времени  $T$  меньше 50 лет? Ведь тогда сейсмический риск будет больше единиц. Более того, нередко в одном и том же месте происходят землетрясения одинаковой магнитуды не только через день, но и через несколько часов. В этом случае использование формулы, связывающей сейсмический риск  $R$  и интервал времени  $T$ , становится абсурдным.

Вот тогда на помощь приходит математическое моделирование. Результаты исследований, полученных авторами в рамках развивающейся научной школы математической оценки геодинамических рисков, наглядно демонстрируют

работоспособность математических моделей оценки геодинамического, в том числе – сейсмического риска.

Сегодня уже можно говорить о формировании математической геодинамики – перспективной области геодинамических исследований со своими специфическими методами и моделями, которые направлены на объяснение и прогнозирование геологических феноменов. Одной из важнейших задач математической геодинамики выступает оценка адекватности моделей геодинамических рисков реальным геологическим системам (ГС).

Из сказанного следует выбор третьего критерия выбора тестового региона.

**Критерий 3:** *математическая модель оценки сейсмического риска для тестового района должна быть адекватной.*

Неоднозначность понятия «адекватность» требует его уточнения как в содержательном, так и в методическом смыслах применительно к исследуемой области.

В настоящей статье будем говорить о двух аспектах адекватности: качественной адекватности – соответствии модели реальной структуре и механизмах функционирования ГС; количественной адекватности – применимости модели для решения практических задач анализа, оценки, прогнозирования и управления в сфере ГС.

Современный этап развития научных исследований, посвященных проблемам анализа, оценки и прогнозирования опасных эндогенных геологических процессов, связан с разработкой и применением достаточно сложных математических моделей, позволяющих оценивать геодинамические риски для различных по своему масштабу и геологическому строению территорий [2-6].

Однако до сих пор слабо проработан вопрос об адекватности разрабатываемых математических моделей оценки геодинамических рисков. В то же время, его решение крайне важно, поскольку доказательство их адекватности позволяет однозначно решить вопрос о, возможности использования таких моделей для аналитических и прогностических целей.

Отличие между оценкой сейсмического риска и оценкой геодинамического риска состоит в том, что при оценках сейсмического риска в расчет принимаются только землетрясения, при оценках же геодинамического риска речь идет не только о землетрясениях, но и о других опасных геодинамических явлениях. Таких, например, как криповые подвижки, оползни, провалы, оседания и другие подобные опасные явления и процессы. Далее, для определенности, будем вести речь об оценке только сейсмического риска.

На сегодняшний день вопрос о приемлемости той или иной математической модели оценки сейсмического риска решается следующим образом.

Для некоторой исследуемой территории (ИТ) на основании расчетов, выполненных по математической модели оценки сейсмического риска, строится распределенное поле его индикаторов в виде изолиний с некоторым сечением (шагом). В качестве таких индикаторов, как правило, выступают сдвиговые напряжения или относительная плотность потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды (для детерминированных моделей), либо вероятности проявления сейсмического события (для вероятностных и нечетких моделей).

Затем на отображение ИТ наносится пространственное, спроецированное на «дневную» поверхность Земли, распределение эпицентров землетрясений за определенный промежуток времени, например, за последние 50 лет. После этого производится подсчет количества эпицентров землетрясений, без учета их магнитуды,

попавших на участки ИТ, оконтуренные величинами повышенных значений распределенных полей индикаторов [4, 5].

Под величиной повышенного значения поля индикатора, не имеющего вероятностной природы, например, поля сдвиговых напряжений, понимается такая его величина, при которой реализуется оцениваемое опасное природное явление или процесс. В случае вероятностного поля за повышенные значения принимают величины вероятностей, превышающие 0.65 [12, 13].

И, наконец, на ИТ находится отношение количества эпицентров землетрясений, попавших на участки с повышенными значениями поля индикаторов к общему числу всех землетрясений, произошедших в рассматриваемый период времени.

Однако в этом случае оценивается не адекватность модели, а ее количественное соответствие некоторым реальным фактам (данным), в нашем случае – распределению эпицентров уже произошедших землетрясений, т. е. фактически оценивается согласованность модельных и реальных данных при определенных ограничениях.

Нами рассмотрен статистический подход к проверке адекватности моделей. Процедура проверки основана на сравнении измерений на реальной системе и результатов экспериментов на модели. Наиболее распространенными способами при этом являются следующие [14-17]:

1. По среднему значению откликов модели и системы;
2. По дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы;
3. По максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы.

Второй и третий способы в большей степени ориентирован на сложные системы, первый – наиболее эффективен для систем средней сложности.

Таким образом, при исследовании региона, по которому есть достаточная статистика по распределению эпицентров уже произошедших землетрясений, нужно использовать первый способ проверки адекватности математической модели оценки сейсмического риска, а именно, исследуя средние значения откликов модели (рассчитанные по модели величины сейсмического риска) и реальной системы (магнитуды землетрясений).

Говоря статистическим языком, первый способ проверки адекватности математической модели оценки сейсмического риска есть не что иное, как проверка гипотезы «средние двух выборок относятся к одной и той же совокупности». Такая проверка осуществляется на основании критерия Стьюдента (или  $t$ -критерия), позволяющего определить вероятность того, что средние значения в двух выборках относятся к одной и той же совокупности.

В качестве исследуемой выбрана территория Армении с прилегающими к ней регионами, применительно к которой реализована вероятностная математическая модель оценки сейсмического риска [5, 6].

На Рисунке 1 представлено эквипотенциальное распределение вероятностного сейсмического риска и распределение эпицентров землетрясений, произошедших в период 1993-2014 гг. (эпицентры обозначены кружками красного цвета).

Все эпицентры попали на участки со значениями вероятностного риска, выше 0.65. Согласованность модельных и реальных данных в этом случае составляет 100 %, но это вовсе не означает, что реализованный подход однозначно корректен для

регионов, где происходит горообразование. За указанный период в 22 года в пределах этой территории произошло 191 сейсмическое событие. Это на порядок выше, чем происходит на платформенных территориях примерно такой же площади.

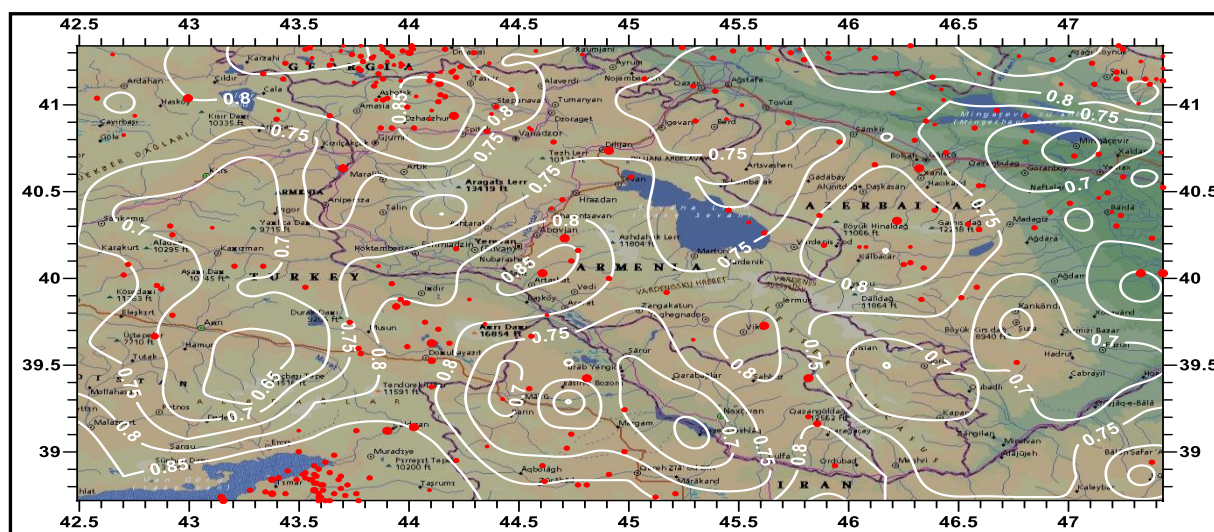


Рисунок 1 – Эквипотенциальное распределение вероятностного сейсмического риска для Армении и смежных с ней территорий. Сечение изолиний – 0.05.  
Figure 1 – Equipotential distribution of probabilistic seismic risk for Armenia and adjacent territories. Contour section – 0.05.

Кроме того, описанный подход не учитывает, что землетрясения значительно различаются по магнитуде и глубине залегания своего очага. Между тем, указанные факторы очень серьезно влияют на величину сейсмического риска. Анализ глубин эпицентров землетрясений на тестовой территории показал, что они распределены весьма неравномерно (Рисунок 2). Это приводит к выводу о том, что адекватность вероятностной модели оценки сейсмического риска необходимо проверять с учетом глубинных уровней очагов землетрясений.

Рассмотрим результаты проверки гипотезы «выборка магнитуд произошедших землетрясений (Рисунок 1) принадлежит генеральной совокупности, распределенной по нормальному закону».

Под генеральной совокупностью понимается совокупность землетрясений, произошедших на территории Передней Азии за рассматриваемый период времени. Такая проверка проводилась на основании использования критерия согласия Пирсона [18-19].

Показано, что наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона  $\chi^2_{набл.} = 11.12$  значительно меньше его критического значения  $\chi^2_{кр.} = 23.68$ . Это свидетельствует о том, что справедлива гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности магнитуд землетрясений, произошедших в Передней Азии за период времени 1993-2014 гг.

Сопоставляя наблюдаемое и критическое значения критерия согласия Пирсона на глубине геосреды, равной 10 км., где произошло наибольшее количество землетрясений, находим, что также  $\chi^2_{набл.} < \chi^2_{кр.}$ . Это свидетельствует о нормальном распределении генеральной совокупности величин сейсмических рисков, вычисленных по вероятностной модели для Армении и прилегающих к ней территорий, на глубине геосреды, равной 10 км.



Поскольку выборки величин сейсмических рисков для всех остальных глубинных уровней производятся из той же совокупности, что и исследованная выборка для глубины 10 км, предположим, что их также можно использовать для проверки адекватности модели на каждом из глубинных уровней на основании критерия Стьюдента.

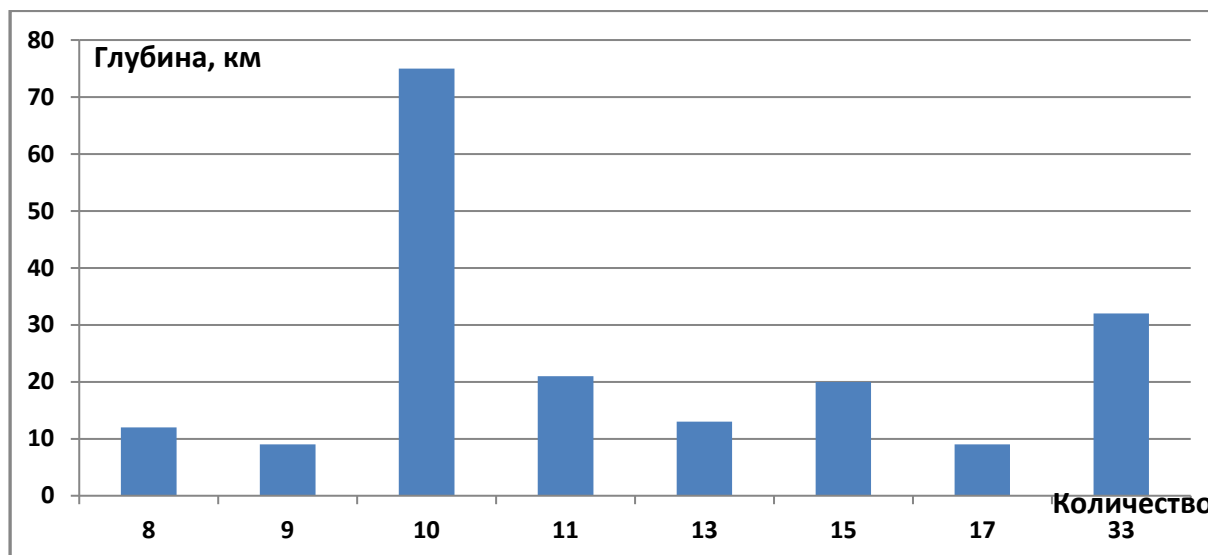


Рисунок 2 – Распределение глубин эпицентров землетрясений, произошедших в период 1993-2014 гг. на территории Армении и смежных регионов.

Figure 2 – The distribution of the depths of the epicenters of earthquakes that occurred in the period 1993-2014. on the territory of Armenia and adjacent regions.

### Проверка адекватности модели оценки сейсмического риска

Рассмотрим детальнее методику проверки адекватности математической модели оценки сейсмического риска по среднему значению ее откликов и геологической среды с помощью критерия Стьюдента ( $t$  критерия).

Этап 1. Вычисляется среднее значение откликов геосреды (среднее значение магнитуды):

$$\bar{M} = \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} M_i, \quad (4)$$

где  $M_i$  – магнитуда  $i$ -го землетрясения;  $n_1$  – объем выборки исходных данных (количества землетрясений).

Этап 2. Вычисляется среднее значение откликов модели (среднее значение величины сейсмического риска):

$$\bar{R} = \frac{1}{n_2} \cdot \sum_{i=1}^{n_2} R_i, \quad (5)$$

где  $R_i$  – величина  $i$ -го сейсмического риска;  $n_2$  – объем выборки модельных данных (количество величин сейсмического риска).

Этап 3. Оцениваются выборочная и исправленная дисперсии для исходных и модельных данных:

$$\begin{cases} D_M = \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} (M_i - \bar{M})^2 \\ D_R = \frac{1}{n_2} \cdot \sum_{i=1}^{n_2} (R_i - \bar{R})^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_M^2 = D_M \cdot \frac{n_1}{n_1 - 1} \\ S_R^2 = D_R \cdot \frac{n_2}{n_2 - 1} \end{cases} \quad (7)$$

Если исправленные дисперсии различны, необходимо проверить гипотезу о равенстве генеральных дисперсий, используя критерий Фишера-Снедекора при определенном уровне значимости  $\alpha$ . Если гипотеза о равенстве генеральных дисперсий не отвергается, можно переходить к следующему этапу.

Этап 4. Находится значение  $t$ -критерия Стьюдента по формуле [20]:

$$t_{\text{набл.}} = \frac{|\bar{M} - \bar{R}|}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot S_M^2 + n_2 \cdot S_R^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (8)$$

Этап 5. Расчетное значение  $t_{\text{набл.}}$  сравнивается с табличным критическим значением  $t$ -критерия Стьюдента  $t_{\text{кр.}}$ , рассматриваемым с  $n_1 + n_2 - 2$  степенями свободы. Если  $t_{\text{набл.}} < t_{\text{кр.}}$ , то гипотеза принимается, и модель считается адекватной на уровне значимости  $\alpha$ .

Описанная методика применена на тестовой территории Армении и смежных регионов. При уровне значимости  $\alpha = 0.05$  выполнены расчеты для всех глубинных уровней, указанных на Рисунке 2. Итоговые результаты показали, что модель является адекватной для всех глубинных уровней, на которых зафиксированы сейсмические события в период времени 1993-2014 гг. на территории Армении и прилегающих к ней регионов. Итак, согласно критериям 1-3, территория Армении может быть выбрана в качестве тестового региона.

### Результаты вероятностного моделирования сейсмического риска

Отметим, что вероятностная оценка не требует знания конкретного значения величин напряжений, смещений и деформаций, формирующихся в объеме геологической среды. А ведь именно количественные значения указанных величин являются «камнем преткновения» при обсуждении вопросов, связанных с оценкой сейсмического риска.

Так, количественная оценка напряжений в литосфере всегда вызывает множество вопросов. Эти оценки весьма существенно разнятся у разных авторов. В первую очередь, такая ситуация вызвана отсутствием экспериментальных данных о величинах фоновых напряжений, особенно сдвиговых. А именно они «ответственны» за развитие опасных геодинамических процессов в литосфере.

Значения сдвиговых напряжений в различных источниках оцениваются по-разному: от 75-120 МПа до 100-200 МПа. Кроме того, весьма неоднозначны данные об усредненных значениях параметров упругости для всей толщи коры, вычисляемых по сейсмоотографическим данным через скорости распространения упругих волн. И все это относится к глобальным оценкам.

Региональные же оценки приводят к еще большему разбросу значений сдвиговых напряжений. Все это говорит о том, что использование детерминированных математических моделей не позволяет с необходимой точностью оценивать не только сами величины напряжений, но и определять диапазоны их изменения. Именно поэтому при оценке сейсмического риска будем использовать вероятностную модель.

Основные положения разработанной авторами вероятностной модели [6] связаны с оценками трех состояний элементарного объема геологической среды: равновесного устойчивого (номер 1), неравновесного неустойчивого (номер 2) и квазиравновесного (номер 3) (Рисунок 3).

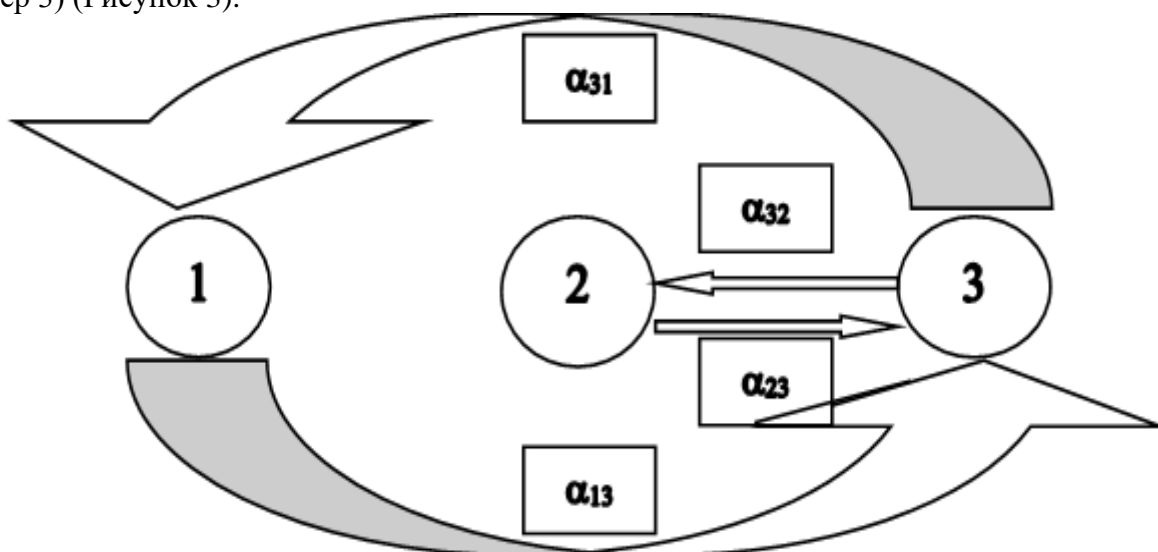


Рисунок 3 – Схема переходов геологической среды между состояниями 1, 2, 3 модели  
Figure 3 – Scheme of transitions of the geological environment between 1, 2, 3 states of the model.

Математическая модель вероятностной оценки сейсмического риска основана на применении дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} p_1'(t) = -\alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{31}p_3(t), \\ p_2'(t) = -\alpha_{23}p_2(t) + \alpha_{32}p_3(t), \\ p_3'(t) = \alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{23}p_2(t) - (\alpha_{31} + \alpha_{32})p_3(t). \end{cases} \quad (9)$$

Заменим третье уравнение системы (9) на условие нормировки

$$p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1.$$

Тогда система представляется в виде:

$$\begin{cases} -\alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{31}p_3(t) = p_1'(t), \\ -\alpha_{23}p_2(t) + \alpha_{32}p_3(t) = p_2'(t), \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Приравняв производные вероятностей к нулю, найдем финальные вероятности:

$$\begin{cases} -\alpha_{13}p_1 + \alpha_{31}p_3 = 0, \\ -\alpha_{23}p_2 + \alpha_{32}p_3 = 0, \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Тогда единственное решение для финальных вероятностей имеет вид:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\alpha_{23}\alpha_{31}}{\alpha_{13}\alpha_{23} + \alpha_{13}\alpha_{32} + \alpha_{23}\alpha_{31}}, \\ p_2 = 1 - \frac{\alpha_{13} + \alpha_{31}}{\alpha_{31}} p_1, \\ p_3 = 1 - p_1 - p_2. \end{cases} \quad (12)$$

Вычисляя из уравнений (12) вероятности, найдем *сейсмический риск, который представляется величиной  $p_2$  – вероятностью нахождения элементарного объема геологической среды в неравновесном неустойчивом состоянии 2.*

В уравнениях (9)-(12) присутствуют коэффициенты  $\alpha_{ij}$ , которые физически отражают интенсивности переходов в рассматриваемой системе из состояния  $i$  в состояние  $j$ . Опишем подход к оценке этих коэффициентов. Суть его состоит в следующем.

При оценках напряженно-деформированного состояния модельного объема геологической среды, как правило, полагается, что влияние возмущающего геофизического поля (или полей) учитывается только в масштабах исследуемой территории.

В отношении оценки сейсмического риска это всегда являлось спорным вопросом: что необходимо учитывать – влияние региональных полей (как правило, аномального гравитационного поля) или локальных полей (современные тектонические движения)?

Авторами при оценках напряженно-деформированного состояния модельного объема геологической среды предлагается поступать следующим образом. Для конкретной исследуемой территории учитывать как региональные поля (аномалии гравитационного поля в изостатической редукции), но значительно расширяя границы исследуемой территории, так и локальные поля (современные либо новейшие горизонтальные и вертикальные тектонические движения). Таким образом, для оценки напряжений и смещений в геологической среде потребуются две детерминированные модели – *региональная* и *локальная*. Полученные по ним оценки напряжений и смещений позволят получить искомые значения коэффициентов  $\alpha_{ij}$ , входящих в соотношения (9)-(12).

Коэффициент  $\alpha_{13}$  физически отражает интенсивность процессов, приводящих к переходу элементарного объема геологической среды из состояния 1 (равновесного устойчивого состояния) в состояние 3 (квазиравновесное состояние).

Такому переходу способствует накопление в элементарном объеме геологической среды некоторой величины потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды  $E_p$  (в Дж/м<sup>3</sup>) под действием возмущающих сил регионального происхождения, учитывающихся через аномальное гравитационное поле в изостатической редукции. Следовательно, для оценки величины  $E_p$  потребуется применение региональной детерминированной модели. Величину относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды обозначим как  $E_p^{(per)}$ .

Поскольку все величины, входящие в уравнения (9)-(12), безразмерны, то и относительные плотности потенциальной энергии деформируемых пород для каждого

элементарного объема геологической среды также приведем к безразмерному виду, нормируя их:  $\tilde{E}_{\rho}^{(per)} = \frac{E_{\rho}^{(per)}}{E_{\rho \max}^{(per)}}$ , (где  $E_{\rho \max}^{(per)}$  – наибольшее значение величины относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды, полученное в результате расчетов в пределах исследуемой территории).

Итак,  $\alpha_{13} = E_{\rho}^{(per)}$ . Сама же величина относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды в рамках ньютоновской реологии вычисляется по формуле:

$$E_{\rho}^{(per)} = \frac{2[\tau_0^{(per)}]^2}{3\mu}, \quad (13)$$

где  $\tau_0^{(per)}$  – полное сдвиговое напряжение, рассчитанное по региональной детерминированной модели;  $\mu$  – модуль сдвига (модуль Ламе).

Коэффициент  $\alpha_{31}$  физически отражает интенсивность процессов, приводящих к переходу элементарного объема геологической среды из состояния 3 (квазиравновесного состояния) в состояние 1 (равновесное устойчивое состояние). Этому переходу способствует сброс сдвиговых напряжений (релаксация напряжений), накопленных в каждом из элементарных объемов геологической среды.

Найдем в рамках региональной детерминированной модели для каждого элементарного объема геологической среды величину сброшенного (релаксированного) сдвигового напряжения за интервал времени  $t$  [21]:

$$\tau_{(рел)}^{(per)} = \gamma^{(per)}(t) \cdot \mu \cdot t \cdot \{1 - \exp[-(\mu \cdot t)/\eta]\}. \quad (14)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость;  $t$  – интервал времени, для которого выполняется расчет величины релаксации сдвиговых напряжений.

Величина скорости сдвиговых деформаций  $\gamma^{(per)}$  в рамках максвелловской реологии геологической среды определяется из соотношения [21]:

$$\gamma^{(per)}(t) = \frac{\tau_0^{(per)} \exp\left(-\frac{\mu \cdot t}{\eta}\right)}{\mu \cdot t + \eta \left(1 - \exp\left(-\frac{\mu \cdot t}{\eta}\right)\right)} \quad (15)$$

В таком случае,  $\alpha_{31} = \tilde{E}_{\rho(рел)}^{(per)}$ , где, по аналогии с рассуждениями относительно коэффициента  $\alpha_{13}$ , определим:

$$\tilde{E}_{\rho(рел)}^{(per)} = \frac{E_{\rho(рел)}^{(per)}}{E_{\rho(рел) \max}^{(per)}}; \quad E_{\rho(рел)}^{(per)} = \frac{2[\tau_{(рел)}^{(per)}]^2}{3\mu}.$$

Рассмотрим коэффициент  $\alpha_{32}$ . Он физически характеризует интенсивность процессов, приводящих к переходу элементарного объема геологической среды из квазиравновесного состояния 3 в неравновесное неустойчивое состояние 2. Подобный переход возможен в случае накопления дополнительных сдвиговых напряжений под действием как горизонтальных, так и вертикальных локальных тектонических полей. Этим дополнительным сдвиговым напряжениям соответствует относительная

плотность потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды  $E_{\rho}^{(\text{лок})} = \frac{2[\tau_0^{(\text{лок})}]^2}{3\mu}$  (где  $\tau_0^{(\text{лок})}$  – полное сдвиговое напряжение, рассчитанное по локальной детерминированной модели).

Таким образом,  $\alpha_{32} = \tilde{E}_{\rho}^{(\text{рег})} + \tilde{E}_{\rho}^{(\text{лок})}$ . Величина  $\tilde{E}_{\rho}^{(\text{лок})}$  рассчитывается по аналогии с величиной  $\tilde{E}_{\rho}^{(\text{рег})}$ , т. е.  $\tilde{E}_{\rho}^{(\text{лок})} = \frac{E_{\rho}^{(\text{лок})}}{E_{\rho \max}^{(\text{лок})}}$ .

Что же касается коэффициента  $\alpha_{23}$ , то он характеризует сброс рассчитанных по локальной детерминированной модели сдвиговых напряжений, накопленных в каждом из элементарных объемов геологической среды. Релаксацию сдвиговых напряжений также рассчитаем по соотношениям (14) и (15), только вместо величин  $\tau_0^{(\text{рег})}$ ,  $\gamma^{(\text{рег})}$ ,  $\tau_{(\text{рег})}^{(\text{рег})}$  в этих соотношениях укажем  $\tau_0^{(\text{лок})}$ ,  $\gamma^{(\text{лок})}$ ,  $\tau_{(\text{рел})}^{(\text{лок})}$ .

Тогда получим  $\alpha_{23} = \tilde{E}_{\rho}^{(\text{лок})}$ . По аналогии с коэффициентом  $\alpha_{31}$  запишем:

$$\tilde{E}_{\rho(\text{рел})}^{(\text{лок})} = \frac{E_{\rho(\text{рел})}^{(\text{лок})}}{E_{\rho(\text{рел}) \max}^{(\text{лок})}}.$$

Величины полных сдвиговых напряжений, входящих в соотношения для величин относительных плотностей потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды, находятся по формуле [6] (в ней полное сдвиговое напряжение  $\tau$  представлено в общей форме без индексов):

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2}, \quad (16)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения, а  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  – сдвиговые напряжения тензора напряжений.

Таким образом, определены все коэффициенты, отражающие интенсивности переходов между рассматриваемыми состояниями вероятностной модели сейсмических рисков. Чтобы найти полные сдвиговые напряжения, входящие в формулы для расчетов величин относительных плотностей потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды, необходимо перейти к построению региональной и локальной детерминированных моделей оценки напряженно-деформированного состояния объема геологической среды. Такие модели построены и будут представлены во второй статье (часть 2) из рассматриваемой серии.

### Заключение

Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмически опасных районах, а также на территориях, где господствуют зоны вечной мерзлоты, требуют больших затрат на инженерно-нормативное обоснование правил и регламентов, учитывающих сейсмические риски и неустойчивость грунтов, на изыскательские и разведочные работы в условиях нестабильности геологической среды.

Кроме того, в последние десятилетия стали больше проявляться климатические изменения, приводящие к усложнению оценки и прогнозирования состояния земной коры практически во всех зонах мира.

Как показано в статье, современные математические модели дают возможность

существенно снизить ошибки проектировщиков и строителей, а также специалистов по мониторингу развития сейсмически активных территорий и криолитозон, не прибегая при решении комплексных задач к дорогостоящим массовым полевым измерениям. А направляя свои усилия на создание адекватных математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов, учитывающих сложные литосферные процессы, отличающиеся изменяющейся не только в территориальном аспекте, но и по мере «путешествия» в глубины Земли, реологией грунтов и их других важных характеристик. И путем поиска новых решений в строительной отрасли и в системе безопасности сооружаемых объектов помогая опережать повсеместное развитие процессов геодинамической деградации [22].

Авторами рассматривается модель, целью создания которой явилось количественное соотнесение, нахождение функциональных связей сейсмических рисков, рассчитанных на основе моделирования, сейсмическим воздействиям, регламентированным в Своде правил «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2018).

В статье производится обоснование критериев выбора тестовых территорий, изложена методика проверки адекватности моделей оценки сейсмического риска, описана вероятностная модель энергетических переходов в напряженно-деформируемой геологической среде, представлен подход к оценке параметров модели через показатели трансформации потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды.

Показано, что критериям выбора тестового региона для практической апробации рассматриваемой модели соответствует территория Армении и смежных государств, характеризующихся высокой сейсмичностью, необходимой информационной базой и доказанной адекватностью применения моделей сейсмических рисков на всех глубинных уровнях нахождения эпицентров землетрясений.

Детально рассмотрена методика проверки адекватности математической модели оценки сейсмического риска с помощью статистических критериев. Показано, что при оценке параметров переходов между состояниями вероятностной модели, описываемой уравнениями Колмогорова, необходимо учитывать как влияние региональных полей (аномальное гравитационное поле), так и локальных полей (современные тектонические движения). Таким образом, дано обоснование того, что для оценки напряжений и смещений в геологической среде потребуются разработанные авторами две детерминированные модели – региональная и локальная, которые описаны в последующей статье, обозначенной как часть вторая серии.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Невдах Т.М., Ахметшин Т.Р. Цифровая модель геодинамических процессов в литосфере Земли. *Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление*. Выпуск 3. 2018;3:9–15.
3. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Ахметшин Т.Р., Невдах Т.М. Математические модели оценки геодинамического риска при исследовании литосферных процессов. *Технологии техносферной безопасности*. Выпуск № 6. 2018;82:40–47. Доступно по:

<http://agps-2006.narod.ru/ttb/2018-6/02-06-18.ttb.pdf>

4. 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.
5. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Кузьменко Н.А. 3-D моделирование миграции опасных эндогенных геологических процессов. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2016;58:64–74.
6. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Кузьменко Н.А. *Моделирование и оценка геодинамических рисков*. М.: «РТСофт» – «Космоскоп»; 2017. 256 с.
7. Минаев В.А., Фаддеев А.О. *Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий*. М.: Финансы и статистика, Изд. дом ИНФРА-М; 2009. 370 с.
8. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков. *Труды II Международной научно-практической конференции «Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования»*. М.: Издательство: РИБ «Турист»; 2007. 329-334 с.
9. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В., Павлова С.А. Обобщенная вероятностная модель для оценки геодинамической устойчивости территорий *Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал*. 2013;5(51)12. Доступно по: <http://ipb.mos.ru/ttb/2013-5>.
10. Ананьин И.В., Фаддеев А.О. Численное моделирование напряженного состояния тектонических нарушений в земной коре Центральной части Восточно-Европейской платформы (на примере Московско-Рязано-Саратовского авлакогена). *Материалы международной конференции «Геодинамика и геоэкология»*. Архангельск, Институт экологических проблем Севера УрО РАН; 1999. Р.11–14.
11. *Уточнение исходной сейсмичности и сейсмическое микрорайонирование участков транспортных сооружений. Методическое пособие. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве»*. М.; 2018. 215 с.
12. *Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы РАН, Обнинск. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, М.* Доступно по: <http://www.wdcb.ru>.
13. *Сейсмологические каталоги Геофизической службы РАН, Обнинск. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, М.* Доступно по: [www.wdcb.ru](http://www.wdcb.ru).
14. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. *Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород*. М.: Горная книга; 2012. 264 с.
15. Соболев Г.А. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука; 1993. 310 с.
16. Теркот Д., Шуберт Дж. *Геодинамика*. М.: Мир; 1985. В 2-х томах. 730 с.
17. *Математическое моделирование*. Под ред. А.Н. Тихонова, В.А. Садовниченко и др. М.: Физматлит; 2005. 316 с.
18. Мышкис А.Д. *Элементы теории математических моделей*. М.: КомКнига; 2007. 192 с.
19. Гмурман В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для прикладного бакалавриата. 12 изд.* М: Издательство Юрайт; 2015. 479 с.
20. Спирин Н.А., Лавров В.В., Зайнуллин Л.А. и др. *Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие*. Под общ. ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: ООО «УИНЦ»; 2015. 290 с.



21. Викулин А.В. *Физика Земли и геодинамика*. Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга; 2008. 463 с.
22. Васильев В.И., Сидняев Н.И., Федотов А.А., Васильева М.В., Степанов С.П. *Иерархические математические модели и эффективные вычислительные алгоритмы для решения комплексных задач криолитозоны: Учебное пособие*. Под ред. В. И. Васильева, Н. И. Сидняева. М.: КУРС; 2021. 576 с.

## REFERENCES

1. 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.)
2. Minaev V.A., Faddeev A.O., Nevdakh T.M., Akhmetshin T.R. Digital model of geodynamic processes in the Earth's lithosphere *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie. Vypusk 3. = Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: models, analysis and management. Issue 3*. 2018;3:9–15. (In Russ.)
3. Minaev V.A., Faddeev A.O., Akhmetshin T.R., Nevdakh T.M. Mathematical models of geodynamic risk assessment in the study of lithospheric processes. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. Vypusk № 6 = Technosphere safety technologies. Issue No. 6* 2018;82:40–47. Available from: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2018-6/02-06-18.ttb.pdf> (In Russ.)
4. Minaev V.A., Topolsky N.G., Faddeev A.O., Bondar K.M., Mokshantsev A.V. *Geodynamic risks and construction. Mathematical models*. Moscow: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2017. 208 p. (In Russ.)
5. Minaev V.A., Faddeev A.O., Kuzmenko N.A. 3-D modeling of dangerous endogenous geological processes migration. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2016;58:64–74. (In Russ.)
6. Minaev V.A., Faddeev A.O., Kuzmenko N.A. *Modeling and assessment of geodynamic risks*. Moscow, «RTSoft» – «Kosmoscope»; 2017. 256 p. (In Russ.)
7. Minaev V.A., Faddeev A.O. *Assessment of geocological risks. Modeling the safety of tourist and recreational territories*. M.: Finance and Statistics, Publishing house INFRA-Moscow; 2009. 370 p. (In Russ.)
8. Minaev V.A., Faddeev A.O. Safety and recreation: system view on the problem of risks. *Trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Turizm i rekreaciya: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya" = Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Tourism and Recreation: fundamental and applied research"*. M.: Publishing House "Tourist"; 2007. P. 329–334. (In Russ.)
9. Minaev V.A., Faddeev A.O., Abramova A.V., Pavlova S.A. Generalized probabilistic model for assessing geodynamic stability of territories. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti: Internet-zhurnal = Technologies of technosphere security: Online journal*. 2013;5(51)12. Available from: <http://ipb.mos.ru/ttb/2013-5>. (In Russ.)
10. Ananyin I.V., Faddeev A.O. Numerical modeling of the stress state of tectonic disturbances in the Earth's crust of the Central part of the East European Platform (on the example of the Moscow-Ryazan-Saratov avlakogen). *Proceedings of the International conference "Geodynamics and geoecology"*. Arkhangelsk: Institute of Environmental Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences\$ 1999. P. 11–14. (In Russ.)

11. *Clarification of the initial seismicity and seismic microzoning of transport structures sections / Methodological guide. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Federal Autonomous Institution "Federal Center for Standardization, Standardization and Conformity Assessment in Construction".* Moscow; 2018. 215 p. (In Russ.)
12. *Operational Seismological catalog of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Obninsk. Source: World Data Center for Solid Earth Physics.* Moscow. Available from: <http://www.wdcb.ru>. (In Russ.)
13. *Seismological catalogues of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Obninsk. Source: World Data Center for Solid Earth Physics.* Moscow. Available from: [www.wdcb.ru](http://www.wdcb.ru) (In Russ.)
14. Kuzmin Yu.O., Zhukov V.S. *Modern geodynamics and variations of physical properties of rocks.* Moscow, Gornaya kniga, 2012. 264 p. (In Russ.)
15. Sobolev G.A. *Fundamentals of earthquake prediction.* Moscow, Nauka; 1993. 310 p. (In Russ.)
16. Terkot D., Schubert J. *Geodynamics.* Moscow, Mir; 1985. In 2 volumes. 730 p. (In Russ.)
17. *Mathematical modeling.* Edited by A.N. Tikhonov, V.A. Sadovnichy and others. Moscow, Fizmatlit; 2005. 316 p. (In Russ.)
18. Myshkis A.D. *Elements of the mathematical models theory.* Moscow, KomKniga; 2007. 192 p. (In Russ.)
19. Gmurman V.E. *Probability theory and mathematical statistics: Textbook for applied bachelor's degree. 12 ed.* Moscow: Yurayt Publishing House; 2015. 479 p. (In Russ.)
20. Spirin N.A., Lavrov V.V., Zainullin L.A. and others. *Methods of planning and processing the results of an engineering experiment: A textbook.* Under the general editorship of N.A. Spirin. Yekaterinburg: WINC Limited Liability Company "UINC"; 2015. 290 p. (In Russ.)
21. Vikulin A.V. *Physics of the Earth and Geodynamics.* Publishing House of the Kamchatka State University named after Vitus Bering; 2008. 463 p. (In Russ.)
22. Vasiliev V.I., Sidnyaev N.I., Fedotov A.A., Vasilyeva M.V., Stepanov S.P. *Hierarchical mathematical models and effective computational algorithms for solving complex problems of the cryolithozone: Textbook.* Edited by V.I. Vasiliev, N.I. Sidnyaev. Moscow, COURSE; 2021. 576 p. (In Russ.)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Минаев Владимир Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Дирекции по  
Арктическим программам МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская  
Федерация  
*e-mail:* [mlva@yandex.ru](mailto:mlva@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0002-5342-0864](https://orcid.org/0000-0002-5342-0864)

**Vladimir A. Minaev** Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Chief Researcher of the Arctic Programs  
Directorate of Bauman Moscow State Technical  
University, Moscow, Russian Federation

**Степанов Родион Олегович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
директор Дирекции по Арктическим  
программам МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва,  
Российская Федерация  
*e-mail:* [stepanovr@bmstu.ru](mailto: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

**Фаддеев Александр Олегович**,  
доктор технических наук, доцент,  
главный научный сотрудник Дирекции по  
Арктическим программам МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская  
Федерация  
*e-mail*: [faol@mail.ru](mailto:faol@mail.ru)  
ORCID: [0000-0002-7259-1693](https://orcid.org/0000-0002-7259-1693)

**Alexander O. Faddeev**  
Doctor of Technical Sciences, Associate  
Professor, Chief Researcher of the Arctic  
Programs Directorate of Bauman Moscow State  
Technical University, Moscow, Russian  
Federation

*Статья поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 13.01.2022;  
принята к публикации 18.02.2022.*

*The article was submitted 11.10.2021; approved after reviewing 13.01.2022;  
accepted for publication 18.02.2022.*