

**Ф. И. Иванов**

*Байкальский государственный университет экономики и права,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**Ю. Д. Корольков**

*Байкальский государственный университет экономики и права,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

## МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА В СИСТЕМЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИБАЙКАЛЬЯ

**Аннотация.** В теории рисков и экономической безопасности территорий существенное значение отводится анализу источников и дифференциации областей возможного возникновения опасных природных явлений. Для Прибайкалья важнейшим элементом природных опасностей является сейсмичность. В статье дан обзор подходов к анализу данных и построению математических моделей сейсмической опасности. Представлены математическая модель и алгоритмы энергетического подхода к описанию сейсмического процесса Байкальской сейсмической зоны. В качестве инварианта на границе зоны необратимых деформаций определена массовая скорость. Установлены основные параметры нелинейных деформаций в очаговой и транзитной областях землетрясений. Выполнена систематизация экспериментальных данных применительно к энергетическому подходу при построении модели и системы численных экспериментов. Изложены принципы построения модели и алгоритм оценки сейсмической опасности для отдельных территорий Прибайкалья.

**Ключевые слова.** Динамические и статистические закономерности; математическая модель; нелинейное деформирование; очаг землетрясения; сейсмический процесс.

**Информация о статье.** Дата поступления 18 февраля 2015 г.; дата принятия к печати 26 февраля 2015 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2015 г.

**F. I. Ivanov**

*Baikal State University of Economics and Law,  
Irkutsk, Russian Federation*

**Yu. D. Korolkov**

*Baikal State University of Economics and Law,  
Irkutsk, Russian Federation*

## MODELS AND PROGNOSIS OF SEISMIC RISKS IN THE ECONOMIC SECURITY SYSTEM OF PRIBAIKALYE REGION

**Abstract.** In the theory of risks and economic security of territories a substantial significance is set on analysis of sources and differentiation of the fields of possible genesis of natural hazards. For Pribaikalye Region (North-West Baikal area), seismic activity is the key element of natural hazards. The article gives a review of approaches to analyzing the data and building mathematical models of the seismic hazard. It presents a mathematical model and algorithms of energetic approach to description of the seismic process in Baikal seismic area. It identifies the mass velocity as an invariant at the border of nonreversible deformation area. It lays down main parameters of nonlinear deformations in the source and transit zones of earthquakes. It carries out systematization of experimental data with regard to the energetic approach in building the model and system of numerical experiments. It presents the principles of model building and the algorithm of assessing the seismic hazard for separate territories of Pribaikalye Region.

**Keywords.** Dynamic and statistical regularities; mathematical model; non-linear deformation; earthquake source; seismic process.

**Article info.** Received February 18, 2015; accepted February 26, 2015; available online March 31, 2015.

Основной проблемой инженерной сейсмологии является прогноз воздействий разрушительных землетрясений и мер по защите от этих воздействий. На современном этапе задачи прогноза не всегда решаются с достаточной точностью. Часто мы можем дать только достаточно грубые статистические оценки на основе коротких рядов инструментальных наблюдений, исторических данных и идентификации сейсмоактивных зон методами сейсмогеологии и геофизики. В Прибайкалье сеть сеймостанций сформировалась только за последние 50 лет, в то время как периоды подготовки разрушительных землетрясений измеряются сотнями лет. В то же время накопленный фактический материал составляет хорошую основу для построения математических моделей сейсмической активности. В качестве основы для построения моделей сейсмической опасности нами положена концепция структурной неоднородности геофизической среды, разработанная в механике крупномасштабных взрывов [1; 3; 4; 11; 13].

Землетрясения принято классифицировать по их магнитуде, предложенной в середине XX в. профессором Калифорнийского технологического института К. Рихтером [2; 11]. Шкала магнитуд построена следующим образом. Самому сильному из известных землетрясений, произошедшем в 1755 г. в Лиссабоне, присвоена магнитуда 9, а толчки с магнитудой меньше 2 ощущаются человеком крайне редко и регистрируются только приборами. В соответствии с этой шкалой всякое землетрясение с магнитудой выше 7 является разрушительным, если оно происходит вблизи населенных территорий.

Количественно сейсмичность принято измерять статистической зависимостью [10] числа землетрясений  $N$  от их магнитуды  $M$

$$\log N = a - bM.$$

Этот показатель называют графиком повторяемости.

Сейсмическая опасность территорий или отдельных объектов характеризуется числом толчков  $N$  с интенсивностью  $I$ , которые можно ожидать на выбранном участке за определенный период времени  $N = N(I)$ . Этот показатель называется функцией сотрясаемости. Данная функция и является носителем информации для выполнения предварительных оценок сейсмического риска территорий.

Наиболее сильными из зарегистрированных землетрясений являются Муйское (1957) —  $M = 7,9$  и площадь сотрясений 2 млн км<sup>2</sup>; Олекминское (1958) —  $M = 6,5$  и площадь сотрясений 0,5 млн км<sup>2</sup>; Среднебайкальское (1959)  $M = 6,8$  и площадь сотрясений более 1 млн км<sup>2</sup>; Тас-Юряхское (1967) —  $M = 7$  и площадь сотрясений 1,3 млн км<sup>2</sup>; Южно-Якутское (1989) —  $M = 6,6$  и площадь сотрясений 1,2 млн км<sup>2</sup>. В более глубокой ретроспективе выделяется Цаганское землетрясение (1862), в результате которого образовался залив Провал и было затоплено 220 км<sup>2</sup> суши.

График повторяемости включает в себя как основные события (стационарный сейсмический процесс), так и индуцированные — афтершоки сильных землетрясений. Исследование динамики сейсмической активности и сопоставление с результатами математического моделирования является сегодня основным инструментом решения задач в данной области. Выбор подходов к построению математических моделей опасностей определяется следующими соображениями.

Общий принцип моделирования распределенных систем [12] состоит в том, что для событий, классифицируемых как опасные (в нашем случае землетрясения), можно построить корреляционную функцию

$$C(s) = \frac{1}{\langle Q \rangle^2} \int_0^\infty Q(t) Q(t+s) dt$$

и оценить радиус корреляции

$$R = \int_0^\infty C(s) ds.$$

Если интеграл в этом уравнении сходится, то кумулятивная переменная

$$q(t) = \int_0^t Q(s) ds$$

характеризуется пределами

$$\langle q^2 \rangle \sim t \text{ для } t \gg R \text{ и } \langle q^2 \rangle \sim t^2 \text{ для } t \ll R.$$

В первом случае мы утверждаем о стохастической неопределенности процесса и, соответственно, основным аппаратом моделирования является математический формализм стохастических систем. Второй предел определяет математический аппарат детерминированных систем [7].

Теория риска рассматривает задачу принятия решения в условиях статистической неопределенности. Формулируют ее обычно как поиск наилучшего (в каком-нибудь смысле) решения на заранее заданном множестве допустимых решений (последствий). Степень неприемлемости этих последствий принято измерять в условных единицах — потерях. Таким образом, основной исходной информацией, необходимой для решения задачи, является функция потерь, представляющая собой зависимость потерь от двух аргументов: решения и ситуации.

Основной шаг при решении задачи состоит в преобразовании функции потерь в функцию риска уже только от одного аргумента — от принимаемого решения. Способ такого преобразования неоднозначен и зависит от критерия риска. От этого же критерия зависит и смысл выражения «наилучшее решение»: наилучшим называют решение, которое минимизирует риск. Следовательно, если обозначить через  $P$  совокупность возможных распределений случайного события, риском мы называем любое  $P \in P$ , а мерой риска определяем функционал потерь  $\mu: P \rightarrow R$ .

Расчет параметров риска для определенной территории включает ряд этапов: определение потенциально опасных зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) для данной территории, количественная оценка сейсмичности этих зон, количественная оценка функции сотрясаемости. Однако магнитуда и интенсивность землетрясения — в значительной степени качественные понятия. Для инженерных расчетов требуются количественные показатели, такие как прогноз входного сигнала для каждой из зон ВОЗ.

Для разработки динамической модели излучателей упругих волн (в том числе землетрясений) особенно важным является установление некоторых энергетических критериев предела стадии упругопластических (в противоположность упругим) деформаций. В наших исследованиях таким критерием установлена массовая скорость [4; 5; 8; 9].

Для решения задач прогноза сейсмической опасности в Монголо-Байкальском сейсмическом поясе ранее обосновано соотношение [5] в следующем виде:

$$J = J_0 + 3,3 \cdot \lg \left( \frac{R_0(M)}{R_0(M) + R} \right), \text{ при } R > R_0;$$

$$J \geq J_0, \text{ при } R \leq R_0,$$

где  $R_0$  — размер очага землетрясения магнитуды  $M$ ;  $J_0 = 9$  баллов по шкале С. В. Медведева;  $R$  — расстояние до гипоцентра землетрясения.

Соответственно, в терминах массовых скоростей [9] данное соотношение принимает вид:

$$v = \frac{v_0 R_0}{R + R_0}, \text{ при } R > R_0;$$

$$v_0 < v < v_{\max}, \text{ при } R < R_0,$$

здесь  $v_0 = 0,7$  м/с;  $v_{\max} = 3$  м/с.

**Линейные упругие деформации.** В линейной теории упругости для изотропной среды мы имеем пару волновых уравнений для волны сжатия ( $p$ -волна) и волны сдвига ( $s$ -волна) [2], распространяющихся независимо с различными скоростями:

$$c_p = \left[ \frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \right]^{1/2};$$

$$c_s = \left[ \frac{E}{2\rho(1+\sigma)} \right]^{1/2},$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\sigma$  — коэффициент Пуассона соответственно.

Экспериментальные данные по измерению скоростей  $p$ -волн и коэффициента Пуассона в горных породах Прибайкалья представлены в табл. 1 и 2 [4; 5; 8]. При этом воздушно-сухие грунты с положительной температурой рассматриваем как горные породы I состояния, обводненные грунты с положительной температурой — II состояния, мерзлые грунты — III состояния.

Таблица 1

**Скорости  $p$ -волн в горных породах Прибайкалья с малой пористостью**

Тип грунта	Состояние	Скорость $p$ -волн в породах с пористостью до 5 %, м/с			
		Средняя	Наиболее вероятная	Минимальная	Максимальная
Габбро	I	4 900	5 200	3 200	6 290
Базальты	II	5 140	5 280	3 600	6 200
	III	5 300	5 300	3 800	6 200
Диориты	I	5 000	5 000	3 400	5 900
	II	4 970	5 050	3 500	5 900
	III	5 100	5 100	3 900	5 900
Граниты	I	4 410	4 630	2 800	5 800
	II	4 670	4 670	3 400	5 800
	III	5 000	5 000	3 800	6 100
Гнейсы	I	3 790	3 980	1 800	5 500
Сланцы	II	4 220	4 370	2 700	5 600
	III	4 650	4 650	3 300	5 800
Песчаник	I	3 350	3 060	2 000	5 200
Известняк	II	4 050	3 750	2 600	5 500
	III	4 470	4 470	3 400	5 700
Среднее значение	I	4 300	4 370	—	—
	II	4 600	4 600	—	—
	III	4900	4900	—	—

Обобщенные деформационные характеристики  
скальных пород Прибайкалья

Скальные породы	Диапазон скоростей $p$ -волн, км/с	Средняя скорость $p$ -волн, км/с	Коэффициент пористости, %	Коэффициент Пуассона
Монолитные	2,5–5,5	4,0	1,8	0,25 (I) 0,27 (II) 0,23 (III)
Трещиноватые	1,9–4,5	3,0	4,8	0,30 (I) 0,34 (II) 0,27 (III)
Сильно трещиноватые	0,9–1,9	1,4	18,0	0,36 (I) 0,45 (II) 0,30 (III)
Разрушенные	0,27–0,9	0,65	40,0	0,39 (I) 0,48 (II) 0,30 (III)

Данные табл. 1 о величинах скоростей  $p$ -волн в породах с малой пористостью (до 5 %) свидетельствуют о том, что скорости волн в скелете различных горных пород с точностью до 10–20 % неразличимы. В то же время, скорости волн в горных породах в зависимости от степени пористости, характера заполнения пор (воздухом, водой или льдом) меняются значительно (см. табл. 2).

Коэффициент Пуассона монолитных и трещиноватых (диапазон скоростей продольных волн в воздушно-сухом состоянии 1,9–5,5 км/с; коэффициент пористости до 10 %) скальных пород, как функция скорости продольных волн, определяется уравнением регрессии

$$\sigma = 0,50 - kV,$$

где  $k$  принимает значения в диапазоне 0,06–0,07 для различных состояний.

Следовательно, связь коэффициента Пуассона слабо трещиноватых горных пород с характеристикой заполнителя трещин достаточно слабая.

Для выветрелых и разрушенных скальных пород (диапазон скоростей продольных волн 0,4–1,5 м/с, коэффициент пористости 20–40 %), связь коэффициента Пуассона с характером заполнения пустот (воздух — вода — лед) отчетливо выражена: при общем повышении величины коэффициента Пуассона, обводненность приводит к резкому скачку его значений относительно воздушно-сухого состояния; цементирующее свойство льда, напротив, снижает параметр пластичности (см. табл. 2). Следовательно, дифференциация горных пород на «отдельности» переводит его в качественно новое состояние в зависимости от свойств заполнителя. Таким образом, скорости продольных волн наиболее чувствительны к изменению пористости горных пород, а коэффициент Пуассона определяется преимущественно свойствами заполнителя.

**Линейные деформации с учетом затухания.** Механика идеальной сплошной среды базируется на решении [2] системы уравнений Эйлера:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v \right] = -\nabla p;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v = 0;$$

$$p = p(\rho).$$

Первое из этих уравнений есть уравнение движения, связывающее градиент давления  $p$  с вектором скорости движения  $v$  и плотностью сплошной среды

$\rho$ ; второе — уравнение непрерывности; третье — уравнение состояния, которое чаще всего записывается в таком виде:

$$\frac{p}{p_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma,$$

где  $\gamma$  — константа, характеризующая среду и процесс деформирования.

Система уравнений Эйлера в линейном случае легко сводится к одному уравнению [Там же] путем введения скалярной функции  $\varphi$  — потенциал скоростей:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} - c^2\Delta\varphi = 0,$$

где  $c = \gamma \frac{p_0}{\rho_0}$  — скорость распространения волн сжатия в среде;  $v = \nabla\varphi$ .

В случае вязкой теплопроводящей среды необходимо дополнить тройку функций  $p(r, t)$ ;  $v(r, t)$ ;  $\rho(r, t)$ ; системы уравнений Эйлера еще двумя — энтропия и температура процесса  $S(r, t)$ ;  $T(r, t)$ . Далее следует описывать среду системой уравнений [2] Навье-Стокса:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v \right] = -\nabla p + \eta \Delta v + \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div } v;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho v = 0;$$

$$p = p(\rho, s);$$

$$\rho T \left[ \frac{\partial S}{\partial t} + (v \nabla) s \right] = \kappa \Delta T + \zeta (\text{div } v)^2 + \frac{\eta}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial l}{\partial x_l} \right)^2,$$

где  $\eta, \zeta$  — сдвиговая и объемная вязкости;  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности среды (табл. 3).

Таблица 3

**Пределы изменения теплопроводности горных пород  $\kappa$  в зависимости от степени разрушенности (эффективной жесткости  $c_0^2 \rho_0$ )**

Формация	Порода	$\kappa_{\min}$	$\kappa_{\max}$	$c_0^2 \rho_{0\min} / \kappa_{\min}$	$c_0^2 \rho_{0\max} / \kappa_{\max}$	$c_0^2 \rho_{0av} / \kappa_{av}$
Магматические	Габбро	1,8	4,5	36	44	40
	Диорит	1,4	2,9	45	49	47
	Гранит	1,3	5,5	21	27	24
Метаморфические	Мрамор	1,6	4,0	29	34	31
	Кварцит	2,7	7,6	21	25	23
	Роговик	1,8	6,1	22	27	24
Осадочные	Песчаник	0,2	5,0	13	19	16
	Доломит	1,2	6,5	12	17	14
	Известняк	0,9	4,4	22	25	23
Строительные материалы	Бетон	0,3	0,9	44	47	46

В условиях, когда затухание мало на расстояниях порядка длины волны и движение является безвихревым ( $\text{rot } v = 0$ ), система уравнений Навье-Стокса приводится к виду:

$$\frac{d^2 v}{dt^2} - c^2 \Delta v - \frac{b}{\rho_0} \frac{\partial (\Delta v)}{\partial t} = 0;$$



$$\text{Здесь } \rho = \rho_0 + \rho' \text{ и } b = \zeta + \frac{4}{3}\eta + \kappa \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right).$$

Решение данного уравнения представляет собой монохроматическую волну с амплитудой [9], уменьшающейся по закону:

$$v = v_0 \exp \left( -\frac{b\omega^2 r}{2c_0^3 \rho_0} \right).$$

Для горных пород с хорошей точностью [Там же] справедливо тождество:

$$\frac{b}{c_0^2 \rho_0} = \text{const.}$$

В связи с этим в сейсмологии удобно энергетическое представление решения

$$E = E_0 \exp \left( i - \frac{1}{Q} \right) \omega t,$$

где  $Q$  — добротность среды распространения сейсмических волн. Для Прибайкалья оценки добротности земной коры, выполненные по различным методикам, дают устойчивое значение  $Q = 120-150$  [4; 5; 8].

**Нелинейные деформации.** Условие применимости линейного приближения к описанию деформационных свойств горных пород определяется условием

$$\frac{vcr}{b\omega} \ll 1.$$

Эта достаточно грубая оценка и служит скорее ориентиром границы перехода к нелинейным деформациям. Экспериментальные данные показывают, что при скоростях колебания  $v$ , превышающих 5 см/с, локально начинают фиксироваться отчетливые остаточные деформации [4]

$$E = E_0 \exp \left( i - \frac{1}{Q(v)} \right) \omega t.$$

Анализ поведения горных пород в нелинейной стадии деформаций удобно выполнить на основе представления эффективной вязкости [9] в виде невырожденной формы

$$\Lambda = \alpha v^2.$$

Основной задачей ставилось определение для горных пород границы перехода к нелинейной стадии деформирования, как функция скорости колебания (табл. 4).

Таблица 4

**Значения скоростей колебаний частиц грунтов предела стадии неупругих деформаций**

Тип грунта	$c_p$ , м/с	$c_s$ , м/с	$c_p / c_s$	$\dot{u}$ , м/с
Скальный монолитный и слабо трещиноватый	4 000	2 300	1,75	3,00
Скальный раздробленный	1 000	580	1,75	0,70
песок сухой	340	170	2,00	0,70
глина сухая	400	170	2,36	0,75
крупнообломочный обводненный	1 800	320	5,70	0,40
песок обводненный	1 600	160	10,00	0,10
суглинисто-супесчаный обводненный	1 600	170	9,50	0,10
глина обводненная	1 700	130	13,00	0,05

## 4. Разрушение.

Для контроля верхней границы стадии нелинейных деформаций выполнены оценки пределов прочности (табл. 5) на образцах монолитных скальных пород, типичных для Прибайкалья [4].

Таблица 5

*Пределы прочности на растяжение, сжатие, сдвиг в отношении к средним значениям упругих модулей и средняя предельная колебательная скорость волн сдвига метаморфических, магматических, осадочных горных пород*

Порода	$\sigma_{сж} / E$	$\sigma_{раст} / E$	$\tau / G$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\dot{u}$ , м/с
Гранит	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$7,15 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^3$	2,30
Известняк	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^3$	2,30
Мрамор	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^3$	2,70
Кварцит	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^3$	1,85
Кварцит коалинизированный	$1,67 \cdot 10^{-3}$	—	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^3$	2,17
Сланец с прослоями мрамора	$2,54 \cdot 10^{-3}$	—	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^3$	2,86
Среднее значение массовой скорости при разрушении	$2,3 \pm 0,3$				

Видно, что средняя колебательная скорость при поперечных деформациях для магматических, метаморфических и осадочных пород составляет  $(2,36 \pm 0,33)$  м/с. Пиковое значение  $\dot{u}_{n.p.}$  скорости, большее в 1,4 раза среднего, составит  $\sim 3,3$  м/с.

Полученные оценки показывают, что монолитные грунты коренной основы могут выдерживать динамические нагрузки, колебательные скорости при которых достигают 3,0 м/с. Эта величина соответствует диапазону «наведенной трещиноватости» при взрывах [1; 3; 12].

Установлено, что обводнение грунта приводит к дискретному изменению коэффициента Пуассона, что в свою очередь определяет скачок предельной массовой скорости при переходе в стадию нелинейного деформирования. Общий диапазон массовых скоростей составляет 0,05–3,00 м/с. Верхняя граница характеризует монолитные скальные породы, нижняя — обводненные грунты.

Параметром нелинейного деформирования в очаговой зоне землетрясения служит декремент поглощения сейсмических волн. Определена граница массовой скорости при переходе в стадию нелинейных деформаций для воздушно-сухих грунтов (0,6–0,8 м/с). Снижение массовых скоростей определяет линейность шкалы интенсивности землетрясений в зонах транзитных землетрясений. Нелинейные эффекты в транзитной зоне в результате наличия рыхлых отложений и (или) обводненности могут рассматриваться как локальные.

Детерминированная модель нелинейных деформаций горных пород при землетрясении позволяет оценить аддитивные инварианты сейсмического процесса: размер очага землетрясения, энергию и спектральные характеристики излучаемых сейсмических волн. Расчет интенсивности линейной области реализован путем вычисления инвариантов Римана в локальных зонах ослабления, обусловленных наличием слоя рыхлых отложений.

Алгоритм прогноза сейсмического риска включает в себя следующие программные и вычислительные модули, которые протестировали на основе математических моделей на этапах жизненного цикла программных средств из [6]:

1. Модуль спектрально-корреляционного анализа последовательности землетрясений на основе исторических и инструментальных данных.

2. Модуль прогноза предельных скоростей колебаний в плейстосейстовой и линейной областях землетрясений для потенциально-опасных очаговых зон конкретной территории.



3. Модуль оценки приращения интенсивности сейсмических волн в ослабленных грунтовых условиях на основе численного решения нелинейных уравнений волновой динамики.

4. Модуль вычисления частотных характеристик слоя рыхлых отложений в мерзлом, воздушно-сухом и обводненном состояниях.

### Список использованной литературы

1. Адушкин В. В. Геомеханика крупномасштабных взрывов / В. В. Адушкин, А. А. Спивак. — М. : Недра, 1993. — 319 с.
2. Аки К. Количественная сейсмология / К. Аки, П. Ричардс. — М. : Мир, 1983. — 880 с.
3. Аптикаев Ф. Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах / Ф. Ф. Аптикаев. — М. : Наука, 1969. — 104 с.
4. Джурик В. И. Сейсмические свойства скальных грунтов / В. И. Джурик, Ф. И. Иванов, В. А. Потапов. — Новосибирск : Наука, 1986. — 134 с.
5. Иванов Ф. И. Инженерная сейсмология: нелинейные приближения / Ф. И. Иванов, В. А. Потапов. — Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1994. — 97 с.
6. Корольков Ю. Д. Математические модели качества программных средств / Ю. Д. Корольков. — Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1996. — 160 с.
7. Корольков Ю. Д. Представление моделей конечными деревьями / Ю. Д. Корольков // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Математика. — 2012. — Т. 5, № 1. — С. 48–56.
8. Павлов О. В. Анализ колебаний грунтов при землетрясениях / О. В. Павлов, А. Ф. Дреннов, Ф. И. Иванов. — Новосибирск : Наука, 1983. — 97 с.
9. Потапов В. А. Дискретные и непрерывные модели в сейсмологии / В. А. Потапов, Ф. И. Иванов. — Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2005. — 196 с.
10. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии / Ю. В. Ризниченко. — М. : Наука, 1985. — 408 с.
11. Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны / Е. Ф. Саваренский. — М. : Недра, 1972. — 296 с.
12. Садовский М. А. Геофизика и физика взрывов / М. А. Садовский. — М. : Наука, 1999. — 335 с.
13. Садовский М. А. От сейсмологии к геомеханике / М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко, В. Н. Родионов // Вестник Академии наук СССР. — 1983. — № 1. — С. 32–38.
14. Садовский М. А. Сейсмический процесс в блоковой среде / М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко. — М. : Наука, 1991. — 92 с.

### References

1. Adushkin V. V., Spivak A. A. *Geomekhanika krupnomasshtabnykh vzryvov* [Geomechanics of large-scale explosions]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 319 p.
2. Aki K., Richards P. *Kolichestvennaya seismologiya* [Quantitative seismology]. Moscow, Mir, 1983. 880 p.
3. Aptikayev F. F. *Seismicheskie kolebaniya pri zemletryaseniyaх i vzryvakh* [Seismic vibrations in earthquakes and explosions]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 104 p.
4. Dzhurik V. I., Ivanov F. I., Potapov V. A. *Seismicheskie svoystva skal'nykh gruntov* [Seismic features of rock] Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 134 p.
5. Ivanov F. I., Potapov V. A. *Inzhenernaya seysmologiya: nelineynye priblizheniya* [Engineering seismology: nonlinear approximations]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 1994. 97 p.
6. Korolkov Yu. D. *Matematicheskie modeli kachestv aprogrammnykh sredstv* [Mathematical models of programming means quality]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 1996. 160 p.
7. Korolkov Yu. D. Presentation of models by finite trees. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo univnrsiteta = Bulletin of Irkutsk State University. Seriya Matematika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 48–56. (In Russian).
8. Pavlov O. V., Drennov A. F., Ivanov F. I. *Analiz kolebani igruntov pri zemletryaseniyaх* [Analysis of ground movements in earthquakes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 97 p.

9. Potapov V. A., Ivanov F. I. *Diskretnye i nepreryvnye modeli v seismologii* [Discrete and continuous models in seismology]. Irkutsk, Institute of Earth Crust of SB RAS Publ., 2005. 196 p.

10. Ryzhichenko Yu. V. *Problemy seismologii* [Problems of seismology]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 408 p.

11. Savarenskii E. F. *Seismicheskie volny* [Seismic waves]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 296 p.

12. Sadovskii M. A. *Geofizika i fizika vzryvov* [Geophysics and physics of explosions]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 335 p.

13. Sadovsky M. A., Pisarenko V. F., Rodionov V. N. From seismology to geomechanics. *Vestnik Akademii Nauk SSSR = Bulletin of the USSR Academy of Sciences*, 1983, no. 1, pp. 32–38. (In Russian).

14. Sadovsky M. A., Pisarenko V. F. *Seismicheskii protsessv blokovoï srede* [Seismic process in block environment]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 92 p.

### Информация об авторах

*Иванов Федор Илларионович* — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра налогов и таможенного дела, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: f-ivanov@yandex.ru.

*Корольков Юрий Дмитриевич* — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра налогов и таможенного дела, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: korolkovud@isea.ru.

### Библиографическое описание статьи

Иванов Ф. И. Модели и прогнозы сейсмического риска в системе экономической безопасности Прибайкалья / Ф. И. Иванов, Ю. Д. Корольков // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права). — 2015. — Т. 6, № 2. — URL : <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=20035>. — DOI : [10.17150/2072-0904.2015.6\(2\).23](https://doi.org/10.17150/2072-0904.2015.6(2).23).

### Authors

*Fedor I. Ivanov* — Doctor habil. (Physics and Mathematics), Professor, Chair of Taxes and Customs, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: f-ivanov@yandex.ru.

*Yury D. Korolkov* — Doctor habil. (Physics and Mathematics), Professor, Chair of Taxes and Customs, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: korolkovud@isea.ru.

### Reference to article

Ivanov F. I., Korolkov Yu. D. Models and prognosis of seismic risks in the economic security system of Pribaikalye Region. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii (Baykalskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i prava) = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy (Baikal State University of Economics and Law)*, 2015, vol. 6, no. 2. Available at: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=20035>. DOI: [10.17150/2072-0904.2015.6\(2\).23](https://doi.org/10.17150/2072-0904.2015.6(2).23). (In Russian).