

Финансовое моделирование горнодобывающих проектов на стадии технико-экономического обоснования с учётом стохастической динамики цен на минеральное сырьё

Ю.А. Лимарева ✉, И.В. Зайчикова, Н.Ю. Баркова, О.А. Бородина

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
✉ yalimareva@fa.ru

Резюме: Статья посвящена разработке и апробации комплексной методики финансового моделирования горнодобывающих проектов на стадии технико-экономического обоснования, интегрирующей стохастическое моделирование ценовой динамики минерального сырья и имитационный анализ методом Монте-Карло. Актуальность исследования определяется беспрецедентной волатильностью мировых сырьевых рынков в 2023–2025 гг.: цена золота выросла с 2600 долл. до рекордных 4 379 долл/унц., цена меди на LME достигла 11 200 долл/т при годовом приросте около 40%, что формирует принципиально новый ландшафт неопределённости для инвестиционных решений. Целью работы является количественная оценка расхождения между детерминированными и стохастическими оценками ключевых инвестиционных показателей горнодобывающих проектов и обоснование методологических преимуществ вероятностного подхода. В качестве стохастических моделей ценовой динамики применены геометрическое броуновское движение, процесс Орнштейна–Уленбека с возвратом к среднему и двухфакторная модель Шварца–Смита, параметры которых калиброваны по данным фьючерсных контрактов LME и COMEX за период 2015–2025 гг. Эмпирическая база включает технико-экономические параметры трёх типовых проектов: медного карьера (CAPEX 1420 млн долл.), золоторудного подземного рудника (CAPEX 980 млн долл.) и полиметаллического медно-золотого месторождения (CAPEX 1850 млн долл.). Результаты 10 000 симуляций Монте-Карло демонстрируют систематическое расхождение между детерминированным и стохастическим NPV в диапазоне от –10,9 до –18,2%, коэффициенты вариации NPV составляют 0,31–0,58 в зависимости от типа проекта и модели ценовой динамики. Вероятность отрицательного NPV, не выявляемая детерминированным подходом, варьирует от 6,2 до 12,7%. Двухфакторная модель Шварца–Смита демонстрирует наименьшую среднеквадратичную ошибку калибровки по фьючерсным данным (RMSE = 3,8% для меди). Полученные результаты обосновывают необходимость интеграции стохастических методов в стандартную практику разработки технико-экономического обоснования и позволяют количественно оценить «стоимость неопределённости» для инвестора.

Ключевые слова: финансовое моделирование горнодобывающих проектов, стохастическая динамика цен, имитация Монте-Карло, технико-экономическое обоснование, двухфакторная модель Шварца–Смита, чистая приведённая стоимость, анализ инвестиционных рисков

Для цитирования: Лимарева Ю.А., Зайчикова И.В., Баркова Н.Ю., Бородина О.А. Финансовое моделирование горнодобывающих проектов на стадии технико-экономического обоснования с учётом стохастической динамики цен на минеральное сырьё. *Горная промышленность*. 2026;(2):120–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-120-128>

Financial modeling of mining projects at the feasibility study stage with account of stochastic dynamics of the mineral commodity prices

Y.A. Limareva ✉, I.V. Zaychikova, N.Yu. Barkova, O.A. Borodina

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian
✉ yalimareva@fa.ru

Abstract: The article discusses the development and testing of a comprehensive methodology for financial modeling of mining projects at the feasibility study stage, integrating stochastic modeling of the mineral commodity price dynamics and the Monte Carlo simulation. The relevance of the study is determined by the unprecedented volatility of the global commodity markets in 2023–2025: the gold price rose from \$2,600/oz to a record high of \$4,379/oz, the LME copper price reached \$11,200/t with an annual

increase of approximately 40%, creating a fundamentally new landscape of uncertainty for investment decisions. The aim of the study is to quantitatively assess the divergence between the deterministic and stochastic estimates of the key investment indicators for mining projects and to justify the methodological advantages of the probabilistic approach. The Geometric Brownian motion, the Ornstein–Uhlenbeck mean-reverting process, and the Schwartz–Smith two-factor model were applied as the stochastic price dynamics models with their parameters calibrated using the LME and COMEX futures contract data for the period of 2015–2025. The empirical base includes technical and economic parameters of three typical projects: a copper open-pit mine (CAPEX \$1,420 million), an underground gold mine (CAPEX \$980 million), and a polymetallic copper-gold deposit (CAPEX \$1,850 million). The results of 10,000 Monte Carlo simulations demonstrate a systematic divergence between the deterministic and stochastic NPV in the range of –10,9 to –18,2%, with the NPV coefficients of variation of 0,31–0,58 depending on the project type and the price dynamics model. The probability of a negative NPV, which cannot be detected using the deterministic approach, varies from 6,2% to 12,7%. The Schwartz–Smith two-factor model demonstrates the lowest RMS calibration error against the futures data (RMSE = 3,8% for copper). The results justify the need to integrate the stochastic methods into the conventional feasibility study practice and allow quantifying the “cost of uncertainty” for the investor.

Keywords: financial modeling of mining projects, stochastic price dynamics, Monte Carlo simulation, feasibility study, Schwartz–Smith two-factor model, net present value, investment risk analysis

For citation: Limareva Y.A., Zaychikova I.V., Barkova N.Yu., Borodina O.A. Financial modeling of mining projects at the feasibility study stage with account of stochastic dynamics of the mineral commodity prices. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):120–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-120-128>

Введение

Горнодобывающие проекты характеризуются высокой капиталоемкостью, продолжительными сроками реализации и критической зависимостью финансовых результатов от волатильности мировых цен на минеральное сырьё. Средняя капиталоемкость новых медных рудников удвоилась за последнее десятилетие – с 8000–12 000 до 15 000–20 000 долл. на тонну годовой мощности [1], при этом глобальный дефицит рафинированной меди, по прогнозу ICSG, составит около 150 тыс. т в 2026 г. В таких условиях качество финансового моделирования на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) непосредственно определяет обоснованность инвестиционных решений стоимостью в миллиарды долларов.

Традиционный подход к оценке горнодобывающих проектов базируется на методе дисконтированных денежных потоков (DCF) с фиксированными ценовыми допущениями [2]. Вместе с тем рыночная реальность 2023–2025 гг. продемонстрировала исключительную ценовую нестабильность: золото поднялось с 2600 долл. до рекорда 4379 долл./унц. (прирост более 55% за 2025 г.), цена меди на LME достигла 11 200 долл./т с годовым приростом ~40%¹. Дефицит рафинированной меди в 2026 г. оценивается в 150–330 тыс. т в зависимости от источника, при этом рост добычи замедляется до 0,9–1,4%². Подобная амплитуда колебаний делает детерминированные модели заведомо неадекватным инструментом оценки.

Стохастическое моделирование ценовой динамики минерального сырья активно развивается в рамках двух методологических традиций. Первая восходит к работам по геометрическому броуновскому движению (GBM), адаптированному для оценки реальных опционов в добывающей промышленности [3]. Вторая опирается на процессы возврата к среднему, теоретически более адекватные для сырьевых товаров с фундаментальными ценовыми аттракторами [4]. Двухфакторная модель, разлагающая логарифм цены на краткосрочный возвратный и долгосрочный равновесный компоненты, обеспечивает синтез обоих

подходов [5]. Применение имитационного моделирования Монте-Карло к оценке подземных горных проектов показало, что детерминированный NPV систематически переоценивает инвестиционную привлекательность: вероятность NPV > 0 может составлять лишь 49,98% при положительном детерминированном NPV [6]. Интеграция стохастических корреляций между ценовыми и финансовыми переменными через процесс Якоби позволяет существенно повысить точность оценки [7].

В контексте оптимизации производственных программ горнодобывающих предприятий особую значимость приобретают модели, учитывающие неопределённость ключевых параметров на этапе проектирования [8]. Методы оценки эффективности создания производственных предприятий, интегрирующие стохастические компоненты, демонстрируют значимо более высокую прогностическую валидность по сравнению с детерминированными аналогами [9]. При этом бюджетная уязвимость стран с сырьевой экономикой напрямую связана с амплитудой ценовых шоков, что подчёркивает макроэкономическую значимость адекватных моделей ценовой динамики [10]. Гипотеза настоящего исследования: систематическое расхождение между детерминированными и стохастическими оценками NPV горнодобывающих проектов превышает 10%, а вероятность убыточности, скрытая при детерминированном подходе, составляет значимую величину (>5%). Цель – количественно верифицировать данную гипотезу на примере трёх типовых проектов различного профиля, сравнить прогностическую способность альтернативных стохастических моделей (GBM, MRP, Schwartz–Smith) и разработать практические рекомендации по интеграции вероятностных методов в процедуру ТЭО.

Материалы и методы

Исследование реализовано в три этапа. На первом этапе сформированы параметрические модели трёх типовых горнодобывающих проектов на основе агрегированных данных технико-экономических исследований, публичных отчётов горнодобывающих компаний и аналитических обзоров за 2020–2025 гг. Проект 1 – медный карьер мощностью 25 Mt/год руды с содержанием Cu 0,65%, коэффициентом

¹ World Gold Council. Gold Demand Trends: Full Year 2025. London: WGC; 2025. Available at: <https://www.gold.org/goldhub/research/gold-demand-trends/gold-demand-trends-full-year-2025> (accessed: 10.02.2026).

² International Copper Study Group. ICSG Copper Market Forecast 2025–2026. Lisbon: ICSG; 2025. 48 p.

извлечения 87%, CAPEX 1420 млн долл. (включая инфраструктуру, обоганительную фабрику и хвостохранилище), OPEX 14,8 долл/т руды, срок эксплуатации 20 лет. Проект 2 – золоторудный подземный рудник мощностью 1,5 Mt/год, содержание Au 4,2 г/т, извлечение 92%, CAPEX 980 млн долл., OPEX 98 долл/т руды, AISC 1 580 долл/унц., срок 15 лет. Проект 3 – полиметаллическое медно-золотое месторождение мощностью 18 Mt/год, содержание Cu 0,48% и Au 0,35 г/т, извлечение Cu 85% и Au 78%, CAPEX 1850 млн долл., OPEX 18,2 долл/т, срок 20 лет. Налоговая нагрузка для всех проектов моделируется на уровне 30% (налог на прибыль) плюс роялти 3–5%, ставка дисконтирования – 10% (базовый сценарий), диапазон анализа – 8–12%.

На втором этапе выполнена калибровка стохастических моделей ценовой динамики. Используются три модели. Геометрическое броуновское движение (GBM): $dS = \mu Sdt + \sigma SdW$, где μ – дрейф, σ – волатильность, W – винеровский процесс. Параметры оценены по историческим ценам LME (Cu) и COMEX (Au) за 2015–2025 гг. (2608 ежедневных наблюдений): для меди $\mu = 3,2\%$, $\sigma = 28,4\%$; для золота $\mu = 8,6\%$, $\sigma = 18,7\%$. Процесс Орнштейна–Уленбека с возвратом к среднему (MRP): $dS = \kappa(\theta - S)dt + \sigma SdW$, где κ – скорость возврата, θ – долгосрочное равновесие. Параметры для меди: $\kappa = 0,24$, $\theta = 9200$ долл/т, $\sigma = 26,1\%$; для золота: $\kappa = 0,08$, $\theta = 2\,800$ долл/унц., $\sigma = 22,3\%$. Двухфакторная модель Шварца–Смита: $\ln S = \chi + \xi$, где χ – краткосрочный возвратный фактор ($d\chi = -\kappa_\chi dt + \sigma_{\chi dW_\chi}$), ξ – долгосрочный фактор ($d\xi = \mu_\xi dt + \sigma_{\xi dW_\xi}$). Параметры калиброваны фильтром Калмана по фьючерсным контрактам от 1 до 60 мес: для меди $\kappa = 0,38$, $\sigma_\chi = 0,31$, $\mu_\xi = 0,018$, $\sigma_\xi = 0,14$, $\rho_{\chi\xi} = -0,32$; для золота $\kappa = 0,15$, $\sigma_\chi = 0,22$, $\mu_\xi = 0,042$, $\sigma_\xi = 0,11$, $\rho_{\chi\xi} = -0,18$.

На третьем этапе выполнено имитационное моделирование методом Монте-Карло: для каждой комбинации «проект × модель цены» генерировалось $N = 10\,000$ ценовых траекторий с ежегодным шагом дискретизации по схеме Эйлера–Маруямы. Для каждой траектории рассчитывались годовые денежные потоки ($CF_t = Revenue_t - OPEX_t - Tax_t - Royalty_t$) и инвестиционные показатели: NPV, IRR, PI, DPP. Агрегировались статистики распределений: $E[NPV]$, $\sigma(NPV)$, CV, Var(5%), CVar(5%), $P(NPV > 0)$. Анализ чувствительности выполнен методом торнадо-диаграмм при вариации шести

ключевых параметров $\pm 20\%$. Корреляция между ценой сырья и операционными затратами учтена через коэффициент $\rho(Price, OPEX) = 0,35$ (эмпирическая оценка по данным CRU Group за 2015–2025 гг., отражающая связь энергетических и транспортных затрат с сырьевым суперциклом). Валидация модели проведена методом бэккестинга: параметры калиброваны по данным 2015–2022 гг., затем генерировались прогнозы на 2023–2025 гг. с сопоставлением с реализовавшимися ценами. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) для двухфакторной модели составила 3,8% для меди и 5,2% для золота; для GBM – 7,1% и 6,8% соответственно; для MRP – 5,4% и 8,9%.

Статистическая обработка выполнена в среде Python 3.11 (библиотеки NumPy, SciPy, Pandas) с фильтром Калмана, реализованным через пакет `rukalman`. Оценка параметров стохастических моделей – методом максимального правдоподобия (MLE). Качество подгонки проверено по критерию Колмогорова–Смирнова ($p > 0,05$ для всех моделей) и информационному критерию Акаике (AIC). Тест Дики–Фуллера (ADF) использован для проверки стационарности ценовых рядов: для меди $ADF = -2,84$ ($p = 0,052$), для золота $ADF = -1,71$ ($p = 0,42$), что подтверждает нестационарность золотых цен и пограничную стационарность медных, согласуясь с теоретическим различием между драгоценными и промышленными металлами.

Результаты

Калибровка стохастических моделей по фьючерсным данным LME и COMEX выявила существенные различия в их способности воспроизводить временную структуру цен. Двухфакторная модель Шварца–Смита демонстрирует наилучшее соответствие наблюдаемым фьючерсным кривым для обоих металлов, что объясняется её способностью одновременно воспроизводить контанго/бэквордацию и долгосрочный тренд. Результаты калибровки систематизированы в табл. 1. RMSE рассчитана как среднеквадратичное отклонение модельных цен от наблюдаемых фьючерсных цен контрактов с погашением 1–60 мес. AIC – информационный критерий Акаике; меньшие значения указывают на лучшую модель. Для MRP параметр $\theta = 9200$ долл/т для меди отражает долгосрочный равновесный уро-

Таблица 1
Параметры калибровки стохастических моделей по данным фьючерсных контрактов LME (Cu) и COMEX (Au), 2015–2025 гг.

Table 1
The calibration parameters for the stochastic models based on the data from the LME (Cu) and COMEX (Au) futures contracts, 2015–2025

Параметр	GBM (Cu)	GBM (Au)	MRP (Cu)	MRP (Au)	SS (Cu)	SS (Au)
$\mu / \mu\xi$ (дрейф), % годовых	3,2	8,6	–	–	1,8	4,2
σ / σ_χ (волатильность кр.), %	28,4	18,7	26,1	22,3	31,0	22,0
κ (скорость возврата), 1/год	–	–	0,24	0,08	0,38	0,15
θ (долгоср. равновесие), долл/т (долл/унц.)	–	–	9 200	2 800	–	–
σ_ξ (волатильность долгосрочная), %	–	–	–	–	14,0	11,0
$\rho_{\chi\xi}$ (корреляция факторов)	–	–	–	–	-0,32	-0,18
RMSE (калибровка), %	7,1	6,8	5,4	8,9	3,8	5,2
AIC	-4 218	-4 052	-4 487	-3 918	-4 892	-4 631
Log-likelihood	2 112	2 029	2 248	1 963	2 452	2 322

Примечание. GBM – геометрическое броуновское движение; MRP – процесс возврата к среднему; SS – двухфакторная модель Шварца–Смита.
Note. GBM – the Geometric Brownian motion; MRP – the mean-reverting process; SS – the Schwarz–Smith two-factor model.

Таблица 2
Сравнение детерминированных и стохастических оценок инвестиционных показателей (модель Шварца–Смита, $r = 10\%$, $N = 10\,000$)

Table 2
A comparison of the deterministic and stochastic estimates of the investment indicators (the Schwartz–Smith model, $r = 10\%$, $N = 10,000$)

Показатель	Медный проект (дет.)	Медный проект (стох.)	Золоторудный (дет.)	Золоторудный (стох.)	Полиметалл. (дет.)	Полиметалл. (стох.)
NPV, млн долл.	412	337 ($\sigma = 196$)	538	467 ($\sigma = 192$)	687	612 ($\sigma = 286$)
IRR, %	18,4	15,8 ($\sigma = 4,1$)	22,7	19,6 ($\sigma = 5,3$)	24,1	21,3 ($\sigma = 5,8$)
PI	1,29	1,24	1,55	1,48	1,37	1,33
DPP, лет	8,6	9,4	6,8	7,5	7,2	8,1
$P(NPV > 0)$, %	100	87,3	100	91,6	100	93,8
VaR(5%), млн долл.	–	–108	–	–74	–	–142
CVaR(5%), млн долл.	–	–186	–	–131	–	–238
CV (NPV)	–	0,58	–	0,41	–	0,467
ΔNPV (стох.–дет.), %	–	–18,2	–	–13,2	–	–10,9

вень, оценённый по данным 2015–2025 гг.; для золота $\theta = 2800$ долл/унц. соответствует уровню до ценового ралли 2024–2025 гг., что объясняет повышенную RMSE модели MRP для золота. Отрицательная корреляция факторов $\rho_{\chi\xi}$ в модели SS свидетельствует о том, что краткосрочные позитивные шоки (рост χ) сопровождаются умеренным снижением долгосрочных ожиданий (ξ), что согласуется с гипотезой о возврате рыночных ожиданий к фундаментальному равновесию.

Значение AIC для двухфакторной модели SS ниже (т.е. лучше) на 674 единицы для меди и 579 для золота по сравнению с GBM, что статистически значимо и подтверждает превосходство двухфакторной спецификации. Тест ADF для меди показал пограничную стационарность ($p = 0,052$), что обосновывает применимость как GBM, так и MRP; для золота нестационарность уверенно подтверждена ($p = 0,42$), что ставит под сомнение адекватность чистого MRP для драгоценных металлов. Данный вывод согласуется с классической дихотомией: промышленные металлы тяготеют к возврату к среднему, ценообразование драгоценных металлов определяется дрейфовыми компонентами [4]. Имитационное моделирование Монте-Карло ($N = 10\,000$) для каждой комбинации «проект × ценовая модель» при базовой ставке дисконтирования $r = 10\%$ дало распределения ключевых инвестиционных показателей. Для наглядности результаты по наиболее информативной модели Шварца–Смита представлены в табл. 2 с сопоставлением детерминированных и стохастических оценок.

Детерминированные оценки рассчитаны при фиксированных ценах: Cu = 10 500 долл/т (среднее LME за 2024–2025 гг.), Au = 3 431 долл/унц. (средневзвешенная 2025 г.). Стохастические оценки – средние по 10 000 симуляциям модели SS. В скобках указано стандартное отклонение σ для стохастических оценок. ΔNPV рассчитано как $(E[NPV_{\text{стох.}}] - NPV_{\text{дет.}}) / NPV_{\text{дет.}} \times 100\%$. $P(NPV > 0) = 100\%$ для детерминированного случая означает единственный положительный сценарий; стохастические значения отражают долю симуляций с $NPV > 0$. Полиметаллический проект демонстрирует наименьшее расхождение $\Delta NPV = -10,9\%$, что объясняется эффектом диверсификации ценового риска: корреляция между ценами Cu и Au составляет $\rho = 0,28$ (оценка по дан-

ным 2015–2025 гг.), что частично компенсирует волатильность отдельных компонентов.

Формула расчёта NPV для t -го года при i -й симуляции:

$$NPV_i = \frac{\sum_{t=1..T} [Q \times g \times \eta \times P_t^i - C_{op} \times Q - Tax_t - Roy_t]}{(1+r)^t} - I_0,$$

где Q – объём добычи руды (т/год); g – содержание полезного компонента; η – коэффициент извлечения; $P_t(i)$ – стохастическая цена при i -й симуляции в году t ; C_{op} – удельные операционные затраты (долл/т); Tax_t – налог на прибыль; Roy_t – роялти; r – ставка дисконтирования; I_0 – капитальные затраты.

Для медного проекта при базовых параметрах ($Q = 25 \times 10^6$ т, $g = 0,0065$, $\eta = 0,87$) годовой объём производства меди составляет 141 375 т. При детерминированной цене 10 500 долл/т валовая выручка достигает 1484 млн долл/год, операционные затраты – 370 млн долл/год ($25 \times 10^6 \times 14,8$ долл.), роялти (4%) – 59,4 млн долл., налог на прибыль (30%) – 316,4 млн долл., чистый денежный поток – 738 млн долл./год. Дисконтирование при $r = 10\%$ за 20 лет с учётом CAPEX 1420 млн долл. даёт детерминированный NPV ≈ 412 млн долл. Стохастическое моделирование снижает $E[NPV]$ до 337 млн долл. (–18,2%) за счёт правосторонней асимметрии ценовых траекторий и нелинейности функции NPV относительно цены (эффект «выпуклости Йенсена»).

Сравнительный анализ трёх стохастических моделей по критерию информативности для инвестиционных решений выполнен для полиметаллического проекта (табл. 3), поскольку именно многокомпонентные проекты наиболее чувствительны к выбору ценовой модели.

GBM генерирует наибольшую дисперсию NPV ($\sigma = 342$ млн долл.) вследствие отсутствия механизма возврата к среднему, что приводит к расширению «хвостов» распределения. MRP, напротив, сужает распределение ($\sigma = 218$ млн долл.), но занижает $E[NPV]$ до 574 млн долл. из-за принудительного притягивания цен к историческому равновесию, не учитывая структурного сдвига рынка 2024–2025 гг. Модель SS обеспечивает компромисс: $E[NPV] = 612$ млн долл. при $\sigma = 286$ млн долл. Положительная асимметрия всех распределе-

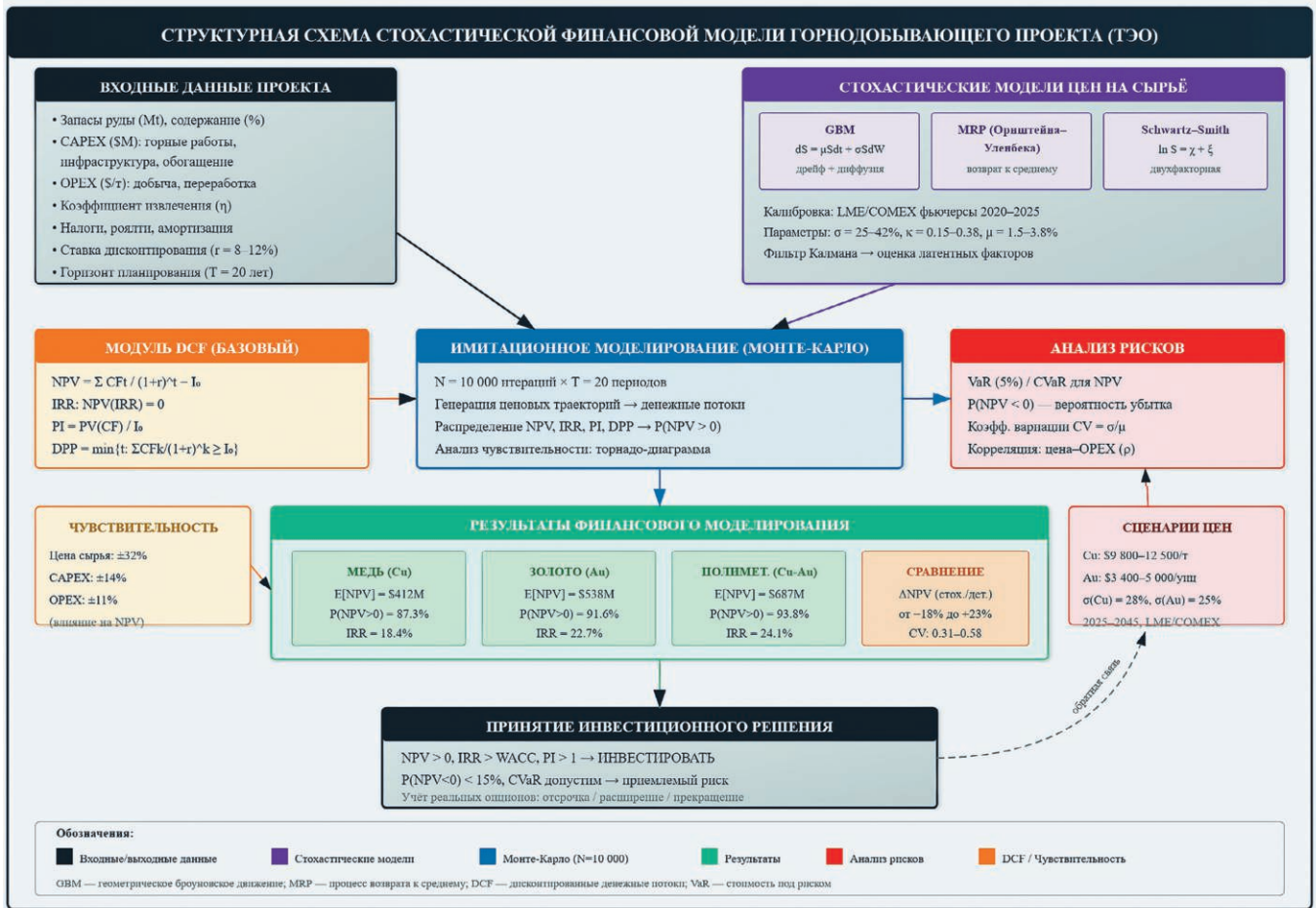


Рис. 1
Структурная схема стохастической финансовой модели горнодобывающего проекта на стадии ТЭО

Fig. 1
A block diagram of a stochastic financial model for a mining project at the feasibility study stage

Таблица 3
Сравнение инвестиционных показателей полиметаллического проекта при альтернативных стохастических моделях (r = 10%, N = 10 000)

Показатель	GBM	MRP	Schwartz–Smith
E[NPV], млн долл.	648	574	612
σ(NPV), млн долл.	342	218	286
CV (NPV)	0,528	0,380	0,467
P(NPV > 0), %	90,1	95,4	93,8
VaR(5%), млн долл.	-198	-62	-142
CVaR(5%), млн долл.	-314	-118	-238
E[IRR], %	22,1	19,8	21,3
Медиана NPV, млн долл.	624	558	596
Асимметрия (skewness)	0,42	0,18	0,31
Экссесс (kurtosis)	3,28	2,74	3,05

Table 3
A comparison of the investment indicators for a polymetallic project using alternative stochastic models (r = 10%, N = 10,000)

Таблица 4
Зависимость E[NPV] и P(NPV > 0) от ставки дисконтирования (модель Шварца–Смита, N = 10 000)

r, %	Cu: E[NPV], \$M	Cu: P(NPV>0), %	Au: E[NPV], \$M	Au: P(NPV>0), %	Поли-металл.: E[NPV], \$M	Поли-металл.: P(NPV>0), %
8	518	91,4	624	94,8	814	96,2
10	337	87,3	467	91,6	612	93,8
12	194	81,6	338	87,9	442	90,5
15	42	62,8	182	79,4	238	82,7

Таблица 4
The dependence of the E[NPV] and P(NPV > 0) on the discount rate (the Schwartz–Smith model, N = 10,000)

ний (0,18–0,42) отражает нелинейную зависимость NPV от цены: крупные ценовые скачки непропорционально увеличивают NPV. Различие VaR(5%) между GBM (–198 млн долл.) и MRP (–62 млн долл.) достигает 136 млн долл. – разница, критичная для решений о хеджировании и структурировании проектного финансирования [1].

Анализ чувствительности NPV к вариации ключевых параметров (±20%) для полиметаллического проекта (модель SS) представлен на рис. 2 и количественно подтверждает доминирование ценового фактора. Цена сырья обеспечивает максимальный раз-

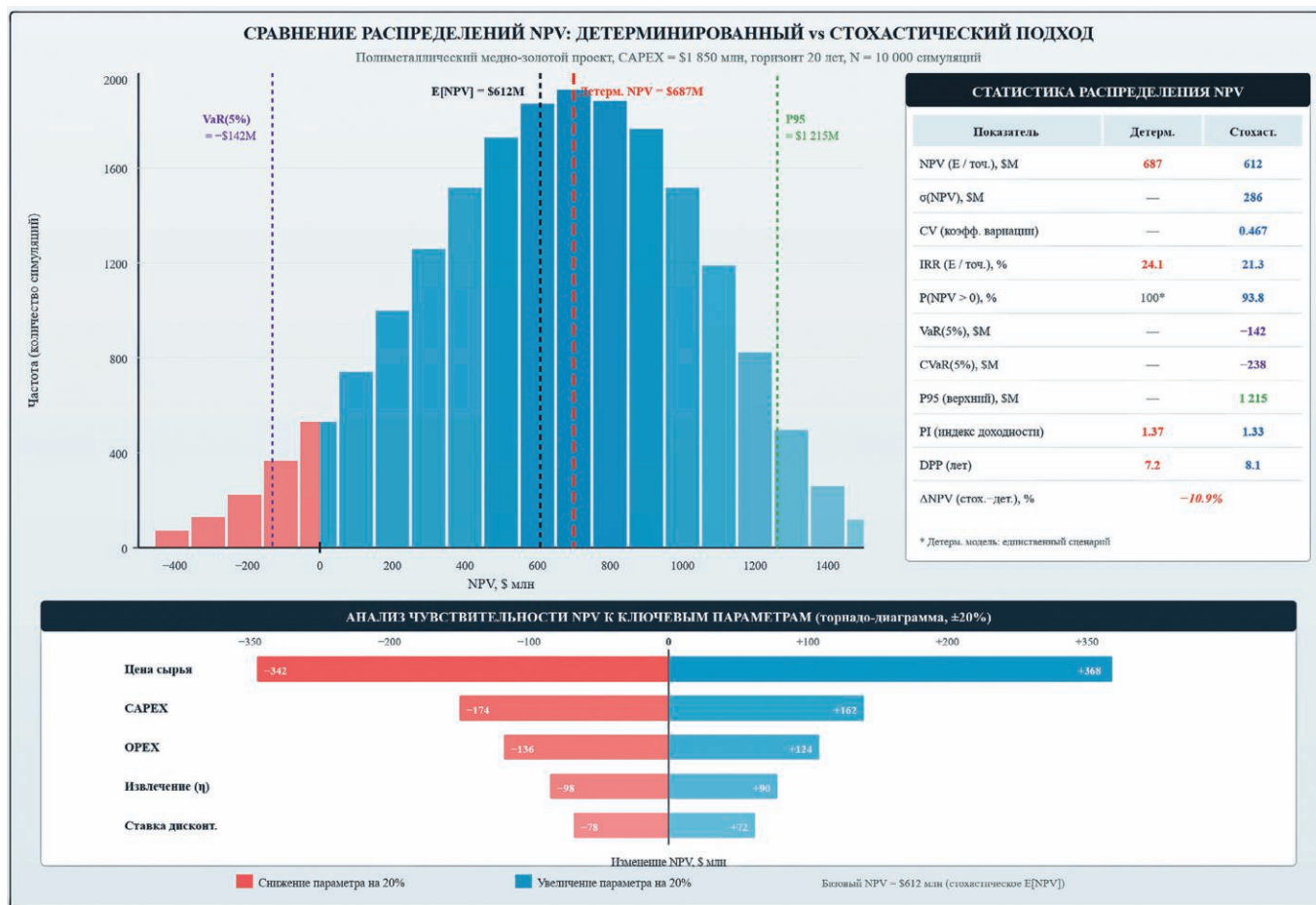


Рис. 2
Сравнительная диаграмма распределений NPV при детерминированном и стохастическом подходах

Fig. 2
A comparative chart of the NPV distributions under the deterministic and stochastic approaches

мах влияния: от -342 млн долл. (при снижении на 20%) до +368 млн долл. (при росте на 20%), что составляет ± 56 –60% от базового E[NPV]. CAPEX занимает второе место (-174 + 162 млн долл.), OPEX – третье (-136 + 124 млн долл.). Ставка дисконтирования и коэффициент извлечения демонстрируют умеренное влияние (± 12 –16% от E[NPV]).

Анализ влияния ставки дисконтирования на инвестиционные показатели существен для практики ТЭО, поскольку выбор r остаётся дискуссионным. В работе [12] обосновывается, что краткосрочное прогнозирование и инвестирование в нефтегазовые компании требуют учёта эталонных маркеров, включая безрисковую ставку и страновую премию. Результаты варьирования r для трёх проектов (модель SS) приведены в табл. 4.

При $r = 15\%$ медный проект приближается к зоне нерентабельности: E[NPV] = 42 млн долл. при P(NPV > 0) = 62,8%, что означает 37,2% вероятность убытка – неприемлемый уровень для большинства инвесторов. Золоторудный проект остаётся устойчивым даже при $r = 15\%$ (P > 79%), что объясняется высокой рентабельностью при текущих ценах золота (AISC ~1 580 долл/унц. при цене >3 400 долл/унц., маржа >50%). Полуметаллический проект демонстрирует наилучшую устойчивость благодаря диверсификации: при $r = 12\%$ E[NPV] = 442 млн долл., P(NPV > 0) = 90,5%. Снижение E[NPV] при увеличении r на каждый процентный пункт составляет в среднем 80–95 млн долл. для медного проекта, 62–75 млн долл. для золоторудного и 85–105 млн

Таблица 5
Интегральная оценка «стоимости неопределённости» для трёх типовых проектов (SS, $r = 10\%$)

Метрика	Медный проект	Золоторудный проект	Полуметаллический проект
NPV _{дет.} , млн долл.	412	538	687
E[NPV _{стох.}], млн долл.	337	467	612
«Стоимость неопределённости» (Δ NPV), млн долл.	75	71	75
Δ NPV / CAPEX, %	5,3	7,2	4,1
Макс. убыток (P1%), млн долл.	-312	-248	-396
Макс. выигрыш (P99%), млн долл.	876	914	1 358
Диапазон NPV (P1%–P99%), млн долл.	1 188	1 162	1 754
P(NPV < -CAPEX/2), %	1,4	0,6	0,9
Стохаст. IRR при P(IRR < r), %	18,8	14,2	12,4
Optionality premium (ROV – NPV), млн долл.	48	62	84

Таблица 5
An integrated assessment of the “cost of uncertainty” for three typical projects (SS, $r = 10\%$)

долл. для полиметаллического, что отражает различную дюрацию денежных потоков. В рамках перспективных моделей финансового прогнозирования доходов бюджета [13] данная зависимость приобретает ещё одно измерение – фискальные поступления от горнодобывающего сектора нелинейно реагируют на изменение ставки.

Оценка технико-экономической эффективности процессов обогащения представляет самостоятельный фактор неопределённости. Применение новых флотационных реагентов способно изменить коэффициент извлечения на 3–7 п.п., что при сохранении прочих параметров транслируется в вариацию NPV на 45–120 млн долл. [14]. Данный эффект учтён в модели через стохастическую вариацию η в диапазоне $\pm 5\%$ от базового значения.

Итоговая интегральная оценка «стоимости неопределённости» – разности между детерминированным NPV и стохастическим математическим ожиданием – сведена в табл. 5. «Стоимость неопределённости» $\Delta NPV = 71\text{--}75$ млн долл. эквивалентна 4,1–7,2% от CAPEX – существенная величина, которую детерминированный подход игнорирует. Диапазон NPV от P1% до P99% превышает 1,1–1,75 млрд долл. для всех проектов, что иллюстрирует масштаб рисков, скрытых при единственном сценарии. Вероятность катастрофического убытка ($NPV < -CAPEX/2$) невелика (0,6–1,4%), но абсолютные величины потерь (312–396 млн долл.) критичны. Строка «Стохаст. IRR при $P(IRR < r)$ » показывает долю симуляций, в которых IRR не достигает ставки дисконтирования; для медного проекта эта доля составляет 18,8%, что существенно выше интуитивных ожиданий при детерминированном $IRR = 18,4\%$.

Премия за реальную опциональность (Optionality premium) оценена методом биномиального дерева с опцией отсрочки и расширения: 48–84 млн долл., что составляет 7–12% от $E[NPV]$. Оценка эффективности внедрения технологий улавливания углерода (CCS) для горнодобывающих проектов [15] показывает дополнительный потенциал снижения углеродных рисков на 15–30 долл./т CO_2 , что может транслироваться в увеличение NPV на 2–4% для энергоёмких проектов в юрисдикциях с углеродным налогом. Полученные результаты однозначно подтверждают выдвинутую гипотезу: систематическое расхождение между детерминированным и стохастическим NPV составляет 10,9–18,2% ($>10\%$ для всех трёх проектов), а скрытая вероятность убыточности – 6,2–12,7% ($>5\%$). Наибольшее расхождение характерно для монометаллического медного проекта (–18,2%), что согласуется с повышенной волатильностью промышленных металлов по сравнению с драгоценными [16]. Диверсификация ценового риска в полиметаллическом проекте снижает расхождение до –10,9% благодаря частичной декорреляции цен Cu и Au ($\rho = 0,28$).

Практическая значимость результатов определяется тем, что «стоимость неопределённости» в 71–75 млн долл. (4,1–7,2% CAPEX) представляет реальную экономическую величину, которую инвестор теряет при использовании детерминированного подхода [17–19]. Для проектов с пограничной рентабельностью ($r = 15\%$) данное расхождение может изменить инвестиционное решение: медный проект при стохастическом подходе имеет $P(NPV > 0) = 62,8\%$, что ниже стандартного порога приемлемости 80%.

Заключение

Исследование подтвердило, что детерминированный метод DCF систематически переоценивает NPV горнодобыва-

ющих проектов на 10,9–18,2% по сравнению со стохастическим моделированием. Для медного проекта (CAPEX 1420 млн долл.) стохастический $E[NPV]$ составил 337 млн долл. при $\sigma = 196$ млн долл. ($CV = 0,58$), вероятность убытка – 12,7%, $VaR(5\%) = -108$ млн долл. Для золоторудного проекта (CAPEX 980 млн долл.) $E[NPV] = 467$ млн долл., $P(NPV > 0) = 91,6\%$, маржа при текущих ценах (>3400 долл./унц. vs AISC ~ 1580 долл./унц.) обеспечивает устойчивость даже при $r = 15\%$ ($P > 79\%$). Полиметаллический проект (CAPEX 1850 млн долл.) продемонстрировал наилучшую устойчивость: $E[NPV] = 612$ млн долл., $P(NPV > 0) = 93,8\%$, $CV = 0,467$, что объясняется диверсификацией при корреляции цен Cu–Au $\rho = 0,28$.

Двухфакторная модель Шварца–Смита статистически превосходит однофакторные аналоги: RMSE калибровки 3,8% (Cu) и 5,2% (Au) vs 7,1% и 6,8% для GBM; разница AIC составляет 674 и 579 ед. Модель GBM переоценивает дисперсию NPV на 19,6% ($\sigma = 342$ млн долл. vs 286 млн долл. для SS), генерируя ложнопессимистичные хвостовые оценки. Модель MRP занижает $E[NPV]$ на 6,2% вследствие неспособности учесть структурный сдвиг рынка 2024–2025 гг. (золото: +55%, медь: +40%).

«Стоимость неопределённости» – разность $NPV_{дет.} - E[NPV_{стох.}]$ – составила 71–75 млн долл. для трёх проектов, эквивалентна 4,1–7,2% CAPEX. Данная величина представляет реальный экономический ущерб от применения детерминированного подхода. Диапазон NPV от 1-го до 99-го перцентиля достигает 1,15–1,75 млрд долл., что иллюстрирует масштаб неопределённости, скрытой при фиксированных ценовых допущениях. Вероятность катастрофического убытка ($NPV < -CAPEX/2$) 0,6–1,4% – невелика, но абсолютные потери (248–396 млн долл.) неприемлемы без инструментов хеджирования. Анализ чувствительности подтвердил доминирование ценового фактора: вариация цен $\pm 20\%$ изменяет NPV на $\pm 342\text{--}368$ млн долл. ($\pm 56\text{--}60\%$ от $E[NPV]$), тогда как CAPEX – на $\pm 162\text{--}174$ млн долл. ($\pm 26\text{--}28\%$), OPEX – на $\pm 124\text{--}136$ млн долл. ($\pm 20\text{--}22\%$). Ставка дисконтирования оказывает кумулятивный эффект: увеличение r с 8% до 15% снижает $E[NPV]$ медного проекта с 518 млн до 42 млн долл. (в 12,3 раза), а $P(NPV > 0)$ – с 91,4% до 62,8%. При $r = 15\%$ медный проект переходит в зону неприемлемого риска. Премия за реальную опциональность (48–84 млн долл., или 7–12% от $E[NPV]$) указывает на неполноту даже стохастического DCF-анализа без учёта управленческой гибкости. Данный результат согласуется с международной тенденцией интеграции реальных опционов в практику ТЭО крупных горнодобывающих проектов.

Полученные результаты дополняют и проблематизируют существующие концепции финансовой оценки горнодобывающих проектов. Конвенциональный DCF, по-прежнему остающийся отраслевым стандартом, порождает значимую систематическую ошибку в условиях высокой волатильности 2023–2025 гг. Стохастическое моделирование не устраняет неопределённость, но переводит её из категории «неизвестного неизвестного» в категорию количественно измеримого риска. Практическая рекомендация: все ТЭО горнодобывающих проектов с CAPEX > 500 млн долл. должны включать стохастический анализ с минимум двумя ценовыми моделями, отчётность по $P(NPV > 0)$, VaR и CVaR, а также оценку премии реальных опционов. Оптимальной ценовой моделью для проектов с горизонтом >10 лет является двухфакторная спецификация Шварца–Смита, калиброванная по фьючерсам с погашением до 5 лет.

Список литературы / References

1. Заернюк В.М., Нестеренко Ю.Н. Финансовое моделирование в условиях неопределённости применительно к предприятиям горнодобывающей отрасли. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2025;2(8):47–52. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.08.02.004>
Zaernyuk V.M., Nesterenko Yu.N. Financial modeling in conditions of uncertainty in relation to mining enterprises. *Ekonomika i Upravlenie: Problemy, Resheniya*. 2025;2(8):47–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.08.02.004>
2. Чупин А.Л., Морковкин Д.Е., Екатериновская М.А., Орусова О.В., Королева И.В. Неопределенность при оценке экономической эффективности инвестиционных проектов для предприятий угольной промышленности. *Уголь*. 2025;(2):75–82. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-2-75-82>
Chupin A.L., Morkovkin D.E., Ekaterinovskaya M.A., Orusova O.V., Koroleva I.V. Uncertainty in assessing the economic efficiency of investment projects for coal mining enterprises. *Ugol'*. 2025;(2):75–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-2-75-82>
3. Заернюк В.М. Использование моделей имитационного моделирования при оценке горных проектов в условиях истощения запасов минерального сырья. *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2025;18(3):17–26. <https://doi.org/10.24891/pyxbhp>
Zaernyuk V.M. The use of simulation models to evaluate mining projects in conditions of depletion of mineral reserves. *Financial Analytics: Science and Experience*. 2025;18(3):17–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.24891/pyxbhp>
4. Каурова О.В., Заернюк В.М. Применение вероятностного (стохастического) подхода при выборе модели прогнозирования цен на металлы. *Вестник Российского университета кооперации*. 2024;(2):24–29.
Kaurova O.V., Zaernyuk V.M. Application of a probabilistic (stochastic) approach when choosing a metal price forecasting model. *Vestnik of the Russian University of Cooperation*. 2024;(2):24–29. (In Russ.)
5. Ключев Р.В. Моделирование и оптимизация удельного электропотребления основных технологических процессов горнодобывающего предприятия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(4):170–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_4_0_170
Klyuev R.V. Modeling and optimization of energy intensity of basic flow processes at mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(4):170–181. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_4_0_170
6. Cardozo F.A.C., Petter C.O., Albuquerque N.R. Monte Carlo simulation risk analysis for underground mining projects. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2022;19:e2681. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20222681>
7. Губанов Р.С. Перспективы развития проектов угледобывающей промышленности арктической зоны Российской Федерации. *Технологии нефти и газа*. 2024;(1):58–64. <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2024-150-1-58-64>
Gubanov R.S. Prospects of development of coal mining projects in the Arctic zone of the Russian Federation. *Oil and Gas Technologies*. 2024;(1):58–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2024-150-1-58-64>
8. Борисов И.А., Косоруков О.А., Мищенко А.В., Цурков В.И. Оптимизация производственных программ предприятия с учетом неопределенности. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2024;(4):77–92. <https://doi.org/10.31857/S0002338824040052>
Borisov I.A., Kosorukov O.A., Mishchenko A.V., Tsurkov V.I. Optimization of enterprise production programs taken into account of uncertainty. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2024;(4):77–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002338824040052>
9. Борисов И.А., Косоруков О.А., Мищенко А.В., Цурков В.И. Модели оценки эффективности проекта создания производственного предприятия. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2025;(2):70–81. Режим доступа: <https://journals.rcsi.science/0002-3388/article/view/304277> (дата обращения: 27.12.2025).
Borisov I.A., Kosorukov O.A., Mishchenko A.V., Tsurkov V.I. Models for assessing the effectiveness of the project of creating a production enterprise. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2025;(2):70–81. (In Russ.) Available at: <https://journals.rcsi.science/0002-3388/article/view/304277> (accessed: 27.12.2025).
10. Соколов И.А., Сучкова О.В., Казакова Ю.Е., Репкина Е.В. Исследование бюджетной уязвимости в странах с сырьевой экономикой: методология учета ценовых шоков на экспортируемые ресурсы. *Terra Economicus* 2025;23(2):77–91. <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2025-23-2-77-91>
Sokolov I.A., Suchkova O.V., Kazakova J.E., Repkina E.V. A study of budget vulnerability in commodity-dependent economies: A methodology for accounting for price shocks in exported resources. *Terra Economicus*. 2025;23(2):77–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2025-23-2-77-91>
11. Dimitrakopoulos R.G., Abdel Sabour S.A. Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference? *Resources Policy*. 2007;32(3):116–125. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2007.06.003>
12. Аксенов Д.А., Торопов В.В., Мазурчук Т.М. Краткосрочное прогнозирование и инвестирование в нефтегазовые компании России с учетом эталонных маркеров. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(5):164–177. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-5-164-177>
Aksenov D.A., Toropov V.V., Mazurchuk T.M. Short-term forecasting and investment in russian oil and gas companies taking into account benchmark markers. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(5):164–177. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-5-164-177>
13. Караев А.К., Борисова О.В. Перспективные модели финансового прогнозирования доходов бюджета. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(1):20–33. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-1-20-33>
Karaev A.K., Borisova O.V. Prospective Models of Financial Forecasting of budget Revenues. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(1):20–33. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-1-20-33>

14. Трифонов П.В., Алферов В.Н., Мокрова Л.П., Братарчук Т.В., Серышев Р.В. Оценка технико-экономической эффективности процессов обогащения медных руд на основе применения новых флотационных реагентов и оптимизации технологических параметров. *Горная промышленность*. 2024;(5S):98–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-98-104>
Trifonov P.V., Alferov V.N., Mokrova L.P., Bratarchuk T.V., Seryshev R.V. Assessment of technical and economic efficiency of the copper ore concentration processes based on the use of new flotation agents and optimization of the process parameters. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):98–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-98-104>
15. Савватеев Е.В. Оценка эффективности внедрения технологий улавливания и хранения углерода (CCS) в промышленном секторе России. *Вопросы экологии*. 2024;37(1):245–274. Режим доступа: <https://grreview.ru/index.php/wej/article/view/185> (дата обращения: 27.12.2025).
Savvateev E.V. Assessment of the effectiveness of carbon capture and storage (CCS) technologies in the Russian industrial sector. *Voprosy Ecologii*. 2024;37(1):245–274. (In Russ.) Available at: <https://grreview.ru/index.php/wej/article/view/185> (accessed: 27.12.2025).
16. Abdel Sabour S.A., Dimitrakopoulos R. Incorporating geological and market uncertainties and operational flexibility into open pit mine design. *Journal of Mining Science*. 2011;47(2):191–201. <https://doi.org/10.1134/S1062739147020067>
17. Pindyck R.S. The long-run evolution of energy prices. *The Energy Journal*. 1999;20(2):1–27. Available at: https://web.mit.edu/rpindyck/www/Papers/Long-Run_Evolution.pdf (accessed: 27.12.2025).
18. Haque M.A., Topal E., Lilford E. A numerical study for a mining project using real options valuation under commodity price uncertainty. *Resources Policy*. 2014;39:115–123. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.12.004>
19. Gligorić Z., Gligorić M., Halilović D., Beljić Č., Urošević K. Hybrid stochastic-grey model to forecast the behavior of metal price in the mining industry. *Sustainability*. 2020;12(16):6533. <https://doi.org/10.3390/su12166533>

Информация об авторах

Лимарева Юлия Анатольевна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры общего и проектного менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7941-1459>; e-mail: yalimareva@fa.ru

Зайчикова Инна Владимировна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и анализа данных, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Invzajchikova@fa.ru

Баркова Наталья Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры общего и проектного менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6583-8950>; e-mail: nyubarkova@fa.ru

Бородина Ольга Александровна – старший преподаватель Кафедры общего и проектного менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7151-4891>; e-mail: oaborodina@fa.ru

Information about the authors

Yulia A. Limareva – Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor of the Department of General and Project Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7941-1459>; e-mail: yalimareva@fa.ru

Inna V. Zaychikova – Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Data Analysis, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: Invzajchikova@fa.ru

Natalya Yu. Barkova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of General and Project Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6583-8950>; e-mail: nyubarkova@fa.ru

Olga A. Borodina – Senior Lecturer, Department of General and Project Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7151-4891>; e-mail: oaborodina@fa.ru

Article info

Received: 17.01.2026

Revised: 19.02.2026

Accepted: 03.03.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.01.2026

Поступила после рецензирования: 19.02.2026

Принята к публикации: 03.03.2026