

UDC 622.013:330.322

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E.
**Quantitative models for decision support in mine planning and
assessment of subsurface investment attractiveness**

Количественные модели поддержки принятия решений при планировании горных работ и оценке инвестиционной привлекательности недр

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Sharov Pavel Egorovich,

Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan

Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Шаров Павел Егорович,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. *The article proposes an applied framework for quantitative decision support in mine planning and the assessment of subsoil investment attractiveness. The integration of technical and financial models is based on the premise that early-stage mining-economic studies, such as Preliminary Economic Assessment (PEA), combine mine planning, production forecasting, capital and operating costs, as well as life-of-mine modeling and cash flow estimation. It is shown that traditional evaluation using DCF/NPV is useful as a baseline project screening tool; however, under conditions of high geological, price, and technological uncertainty, it should be supplemented with scenario analysis, risk modeling, and real options logic.*

The key result is the development of an integrated system: block/schedule-based mine planning → production forecasting → cash flow calculation → evaluation of NPV, IRR, PI, and payback period → risk-adjusted interpretation of investment attractiveness. Using a demonstration dataset, the project's economic indicators were calculated, and sensitivity analysis was performed with respect to metal prices, recovery rates, and capital expenditures. The results indicate that decisions on subsoil development should not be based on a single indicator, but rather on a consistent set of technological, cost, and risk metrics.

Keywords: mine planning; decision support; subsoil investment attractiveness; NPV; IRR; discounted cash flow; scenario analysis; real options; PEA; project sensitivity.

Аннотация. В статье предложена прикладная структура для количественной поддержки принятия решений при планировании горных работ и оценке инвестиционной привлекательности недр. Основанием для интеграции технических и финансовых моделей служит то, что ранние горно-экономические исследования типа Preliminary Economic Assessment (PEA) объединяют план горных работ, прогноз добычи, капитальные и операционные затраты, а также расчет жизненного цикла рудника и денежных потоков. Показано, что традиционная оценка по DCF/NPV полезна как базовый контур отбора проектов, однако при высокой геологической, ценовой и технологической неопределенности ее целесообразно дополнять сценарным анализом, моделированием рисков и логикой реальных опционов.

Ключевой результат состоит в формировании связанной системы: блочное/календарное планирование горных работ → прогноз производственных показателей → расчет денежных потоков → оценка NPV, IRR, PI и срока окупаемости → риск-корректированная интерпретация инвестиционной привлекательности. На демонстрационном наборе исходных данных рассчитаны экономические показатели проекта и выполнен анализ чувствительности к цене металла, извлечению и величине капитальных затрат. Полученные результаты показывают, что положительное решение по освоению недр должно приниматься не по одному показателю, а по согласованному набору технологических, стоимостных и риск-метрик.

Ключевые слова: горное планирование; поддержка принятия решений; инвестиционная привлекательность недр; NPV; IRR; дисконтированный денежный поток; сценарный анализ; реальные опционы; PEA; чувствительность проекта.

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Цифровизация горной промышленности усилила роль количественных моделей как инструмента выбора технических и инвестиционных решений на этапах от концепции отработки до подготовки технико-экономического обоснования. На ранних стадиях проекта именно экономическая оценка типа PEA используется для предварительного подтверждения жизнеспособности проекта, причем в нее обычно включаются параметры добычи, переработки, капитальных затрат, срок службы рудника и денежные потоки.

Проблема состоит в том, что даже формально положительный базовый NPV может быть недостаточен для принятия решения, если не учтены вариативность содержания полезного компонента, неопределенность извлечения, колебания цен, задержки ввода мощностей и институциональные риски недропользования. В литературе и отраслевой практике подчеркивается, что PEA отвечает на вопрос о потенциальной жизнеспособности актива, а более поздние стадии PFS/FS повышают надежность инженерных и стоимостных оценок. Поэтому задача исследования заключается в разработке интегрированной количественной схемы, соединяющей горное планирование и инвестиционную оценку в единую систему поддержки принятия решений [1-3,12].

Цель исследования — показать, как количественные модели могут быть использованы для выбора параметров плана горных работ и для оценки инвестиционной привлекательности недр на основе системы взаимосвязанных технико-экономических показателей.

Задачи исследования:

- формализовать входные параметры горного проекта;
- представить расчетный аппарат оценки денежных потоков и инвестиционной эффективности;
- выполнить демонстрационный расчет по годам жизни рудника;
- проанализировать чувствительность результатов к ключевым факторам;
- сформулировать выводы для принятия решений по освоению недр.

Материалы и методы

В качестве методической базы использована логика ранней и последующей стадий горно-экономической оценки: PEA формирует первичную картину жизнеспособности, тогда как PFS и FS повышают точность инженерных решений и оценок затрат. С точки зрения инвестиционного анализа базовой моделью является дисконтирование денежных потоков, дополненное показателями внутренней нормы доходности, индекса прибыльности и срока окупаемости; при высокой неопределенности к этим методам добавляются сценарный анализ и подход реальных опционов. Концептуальная схема представлена на рисунке 1.

Очевидно, что инвестиционная оценка не автономна: она встроена в цепочку решений, начинающуюся с геолого-технологической модели и заканчивающуюся выбором варианта освоения участка недр.

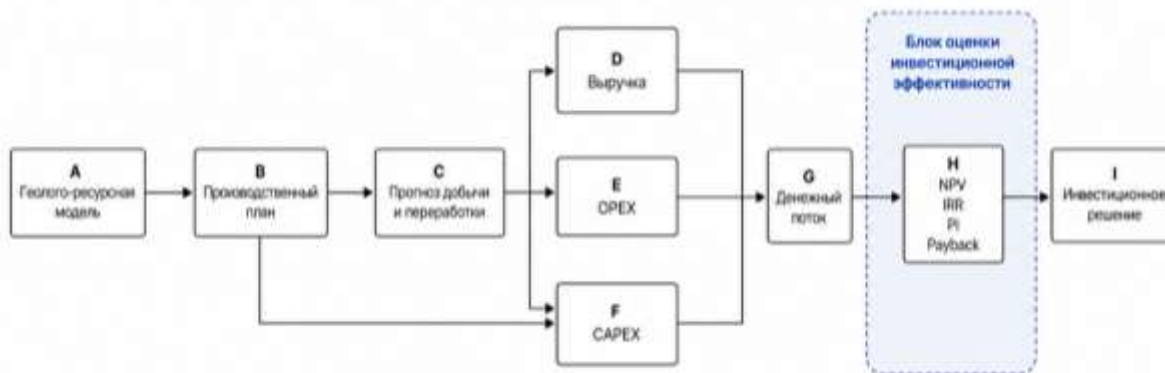


Рисунок 1 – Логика организации потока расчетов

Формулы расчета

Годовая масса извлекаемого металла рассчитывается по формуле 1:

$$Q_t = M_t \cdot g_t \cdot r_t \quad 1.$$

где M_t — объем переработки руды в году t , т; g_t — среднее содержание металла в долях единицы; r_t — коэффициент извлечения.

Годовая выручка определяется как ф-ла.2:

$$R_t = Q_t \cdot P_t \quad 2.$$

где P_t — цена единицы товарного металла.

Операционный денежный поток до налогообложения ф-ла.3:

$$OCF_t = R_t - OPEX_t \quad 3.$$

Чистый денежный поток проекта ф-ла.4:

$$FCF_t = R_t - OPEX_t - CAPEX_t - TAX_t \quad 4.$$

Чистая приведенная стоимость ф-ла.5:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{FCF_t}{(1+k)^t} \quad 5.$$

где k — ставка дисконтирования.

Внутренняя норма доходности определяется из условия ф-ла.6:

$$\sum_{t=0}^T \frac{FCF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad 6.$$

Индекс прибыльности ф-ла. 7:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{FCF_t^+}{(1+k)^t}}{|FCF_0|} \quad 7.$$

Для анализа устойчивости использован коэффициент чувствительности NPV к фактору x ф-ла.8:

$$S_x = \frac{\Delta NPV / NPV_0}{\Delta x / x_0} \quad 8.$$

Исходные данные демонстрационного проекта

Для иллюстрации применен условный проект освоения месторождения цветного металла открытым способом, соответствующий логике ранней технико-экономической оценки. РЕА обычно включает тип добычи, план горных работ, прогноз производства,

капитальные и операционные затраты, а также риски и неопределенности. В демонстрационном расчете приняты следующие параметры см.табл.1.

Таблица 1

Показатель	Обозначение	Значение
Срок проекта, лет	T	6
Ставка дисконтирования	k	12%
Год 0 CAPEX	CAPEX0	180 млн долл.
Поддерживающий CAPEX, годы 1-5	CAPEXs	12 млн долл./год
Поддерживающий CAPEX, год 6	CAPEX6	10 млн долл.
Переработка руды	M	2,0 млн т/год
Среднее содержание металла	g	1,5%
Извлечение	r	88%
Цена металла	P	8 500 долл./т
OPEX	OPEX	95 млн долл./год
Налог на прибыль	TAX	20% от прибыли до налога

По таблице 1 видно, что структура входных параметров объединяет производственные и финансовые переменные. Это важно для практики планирования горных работ, поскольку изменение производительности, извлечения или содержания руды сразу транслируется в инвестиционную оценку проекта [3-4].

Результаты

Базовый расчет по проекту

При переработке 2,0 млн т руды в год, содержания 1,5% и извлечении 88% годовой выпуск металла составит:

$$Q = 2,000,000 \cdot 0,015 \cdot 0,88 = 26,400 \text{ т}$$

Тогда годовая выручка составит:

$$R = 26,400 \cdot 8,500 = 224,4 \text{ млн долл.}$$

При OPEX 95 млн долл. прибыль до налогообложения и до учета, поддерживающего CAPEX равна 129,4 млн долл. После учета, поддерживающего CAPEX 12 млн долл. в годы 1-5 налогооблагаемая база составляет 117,4 млн долл., налог — 23,48 млн долл., а свободный денежный поток — 93,92 млн долл. В год 6 при поддерживающем CAPEX 10 млн долл. свободный денежный поток равен 95,52 млн долл. (табл.2)

Таблица 2.

Год	Выручка, млн долл.	OPEX, млн долл.	CAPEX, млн долл.	Налог, млн долл.	FCF, млн долл.	Дисконт-фактор 12%	PV FCF, млн долл.
0	0,00	0,00	180,00	0,00	-180,00	1,000	-180,00
1	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,893	83,86
2	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,797	74,88
3	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,712	66,86
4	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,636	59,71
5	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,567	53,31
6	224,40	95,00	10,00	23,88	95,52	0,507	48,41
Итого							206,03

По таблице 2 суммарная приведенная стоимость положительных потоков составляет 386,03 млн долл., а чистая приведенная стоимость проекта — 206,03 млн долл.

Положительное значение NPV указывает на экономическую реализуемость проекта в базовом сценарии, что согласуется с логикой применения NPV и IRR для проверки feasibility в технических отчетах по горным проектам [4,6]. Простая окупаемость достигается между 2-м и 3-м годами, а дисконтированная — между 3-м и 4-м годами эксплуатации.

Дополнительно рассчитаны агрегированные показатели инвестиционной эффективности (табл.3).

Таблица 3

Показатель	Значение	Интерпретация
NPV, млн долл.	206,03	Значительный запас стоимости
IRR	45,6%	Существенно выше ставки дисконтирования
PI	2,14	На 1 долл. вложений приходится 2,14 долл. PV притоков
Простая окупаемость	1,92 года	Быстрый возврат капитала
Дисконтированная окупаемость	3,33 года	Проект устойчив при учете стоимости капитала

По данным таблицы 3 базовый вариант проекта выглядит инвестиционно привлекательным: IRR существенно превышает 12%, а PI больше единицы. Однако для недропользования этого недостаточно, поскольку ранние оценки содержат существенную долю неопределенности и потому требуют чувствительного и сценарного анализа

Сценарный анализ

Для проверки устойчивости были заданы три сценария: пессимистический, базовый и оптимистический. В сценариях варьировались цена металла, извлечение и стартовый CAPEX, поскольку именно эти параметры чаще всего определяют отклонение фактического результата от планового на ранних стадиях проекта (табл.4) .

Таблица 4

Сценарий	Цена, долл./т	Извлечение, %	Стартовый CAPEX, млн долл.	NPV, млн долл.	IRR
Пессимистический	7 500	84	210	80,93	24,8%
Базовый	8 500	88	180	206,03	45,6%
Оптимистический	9 300	90	170	313,77	61,0%

Из расчетов следует, что даже пессимистический сценарий сохраняет положительный NPV, что повышает устойчивость инвестиционного решения. Вместе с тем диапазон разброса NPV от 80,93 до 313,77 млн долл. показывает, что качество исходной ресурсной и технологической информации критически влияет на оценку инвестиционной привлекательности недр [4,6,10].

Рассмотрим локальную чувствительность NPV к изменению факторов на $\pm 10\%$ (табл.5).

Таблица 5

Фактор	NPV при -10%, млн долл.	NPV при +10%, млн долл.	Оценка влияния
Цена металла	130,95	281,12	Очень высокая
Извлечение	130,95	281,12	Очень высокая
ОРЕХ	155,30	256,76	Высокая
Стартовый CAPEX	224,03	188,03	Средняя

Из расчетов (табл.5) следует, что наиболее чувствительными факторами выступают цена металла и коэффициент извлечения. Это означает, что при планировании горных работ максимальный прирост стоимости может дать не только оптимизация календаря добычи, но и технологические мероприятия, повышающие извлечение и стабильность качества руды на фабрике.

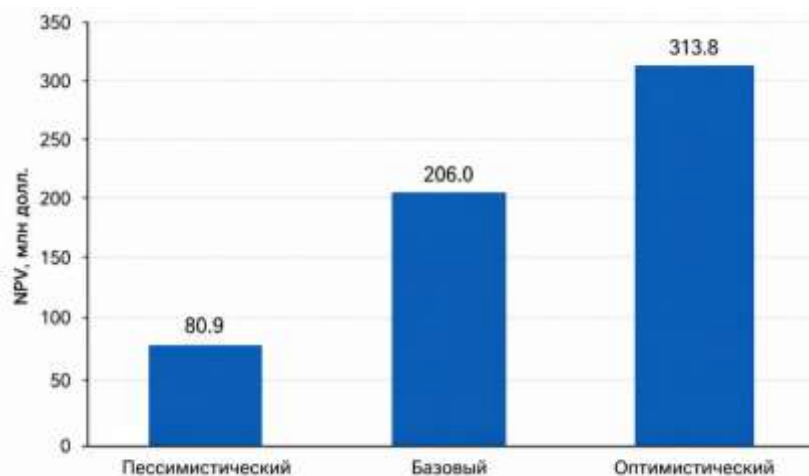


Рисунок 2 - зависимость NPV от сценария (млн.долл)

Диаграмма показывает, что проект остаётся инвестиционно привлекательным во всех рассмотренных сценариях, но размер создаваемой стоимости существенно зависит от набора допущений по ключевым факторам. В пессимистическом варианте NPV составляет около 80,9 млн долл., то есть даже при неблагоприятных условиях проект генерирует положительную чистую приведённую стоимость и сохраняет экономический смысл, хотя запас прочности относительно невелик [5-7].

В базовом сценарии NPV возрастает до примерно 206,0 млн долл., что свидетельствует о значительном «буфере» по отношению к исходным инвестициям и комфортном уровне доходности для инвестора. Оптимистический сценарий демонстрирует максимальное значение NPV порядка 313,8 млн долл., показывая, что

при благоприятном сочетании цен, извлечения и затрат проект превращается в высокодоходный актив. Сопоставление трёх столбцов визуально подчёркивает высокую чувствительность стоимости проекта к изменениям исходных параметров и необходимость учитывать диапазон возможных исходов, а не только базовую оценку. На рисунке 3 приведен график кумулятивного дисконтированного денежного потока.

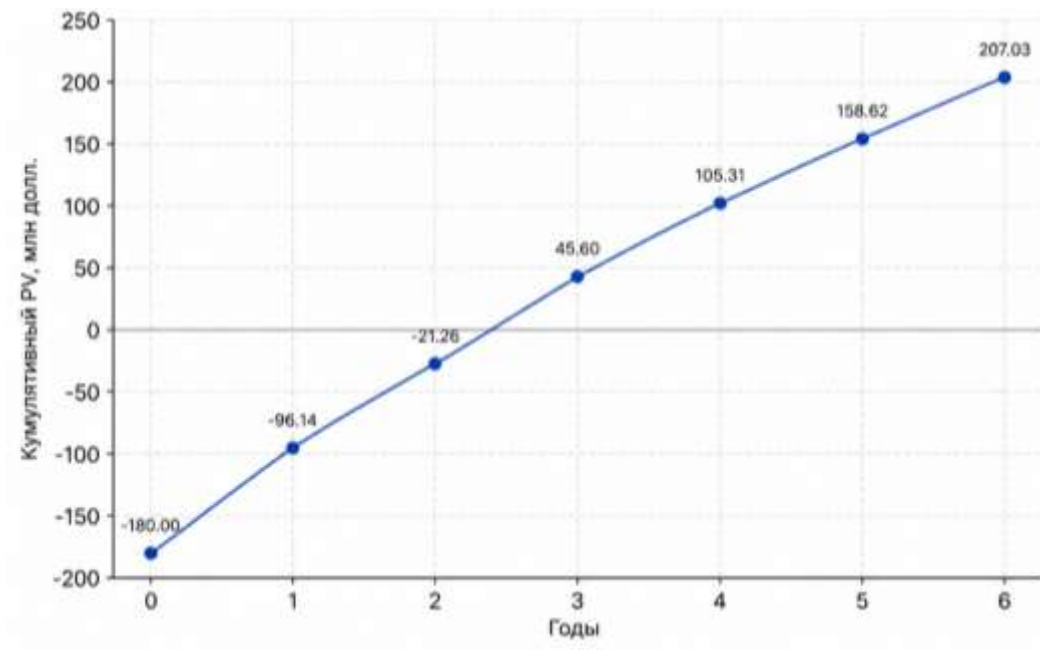


Рисунок 3 - График кумулятивного дисконтированного денежного потока (млн.долл.).

График кумулятивного дисконтированного денежного потока показывает, как проект последовательно «выбирается» из зоны убытков и выходит в зону прибыли в приведённых (дисконтированных) ценах. В нулевой год значение составляет около -180 млн долл., что соответствует первоначальным капитальным вложениям, полностью формирующим отрицательный стартовый баланс [6, 8-9].

К концу 1-го года накопленный дисконтированный поток увеличивается до примерно -96 млн долл., а к концу 2-го года — до около -21 млн долл., то есть за два операционных года проект отрабатывает значительную часть первоначального CAPEX, но ещё остаётся в отрицательной зоне. Между 3-м и 4-м годами кривая пересекает нулевой уровень (от ~45,6 до ~105,3 млн долл.), что соответствует дисконтированному сроку окупаемости: именно в этот интервал инвестор возвращает свои приведённые вложения и начинает получать чистый доход.

Дальнейший рост кривой до примерно 207 млн долл. к концу 6-го года показывает, что после момента окупаемости проект продолжает генерировать значительный положительный дисконтированный поток. Наклон линии после точки

безубыточности остаётся достаточно крутым, что свидетельствует о высоком запасе прочности: даже при возможном снижении цен или ухудшении производственных параметров проект имеет потенциал сохранить положительный NPV. Для лиц, принимающих решения, такой график наглядно связывает риск возврата капитала с временем: чем позже кривая пересекает ноль и чем более пологим становится её рост, тем выше чувствительность проекта к неблагоприятным изменениям внешней среды [10,12].

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают, что количественные модели поддержки принятия решений в горной промышленности должны строиться как связка производственной и финансовой подсистем. PEA рассматривается именно как ранняя интегрированная оценка, включающая параметры добычи, переработки, затрат, рисков и ожидаемой жизнеспособности проекта, а последующие стадии PFS/FS повышают достоверность этих оценок.

С практической точки зрения базовый DCF-подход обеспечивает удобную и сопоставимую основу для отбора проектов, однако он не полностью отражает ценность управленческой гибкости. Публикации по реальным опционам в горной отрасли подчеркивают, что DCF и NPV целесообразно дополнять опционной логикой, особенно для ранних стадий, когда можно отложить запуск, изменить масштаб проекта или скорректировать технологическую схему в ответ на новую информацию.

Для горного планирования это означает следующее:

- при выборе последовательности обработки блоков следует максимизировать не только текущий денежный поток, но и устойчивость проекта к падению цены и извлечения;

- при сравнении вариантов технологической схемы нужно оценивать вклад в NPV через изменение извлечения, разубоживания и OPEX;

- при оценке инвестиционной привлекательности недр следует рассматривать пакет показателей: NPV, IRR, PI, окупаемость, сценарный диапазон и чувствительность.

Таким образом, количественная модель становится не просто расчетом отчетных коэффициентов, а механизмом согласования интересов инженеров, экономистов и инвесторов. Особенно важно это для активов с высокой геологической неопределенностью, где точечная оценка без анализа сценариев способна завышать надежность выводов.

Выводы. Количественные модели поддержки принятия решений при планировании горных работ должны интегрировать геолого-технологические параметры и инвестиционные показатели в единую расчетную систему, поскольку

ранние горно-экономические оценки типа РЕА прямо связывают план горных работ с денежными потоками и жизнеспособностью проекта.

В демонстрационном расчете базовый проект имеет положительный NPV 206,03 млн долл., IRR 45,6% и PI 2,14, что характеризует его как инвестиционно привлекательный в пределах принятых предпосылок.

Вывод по таблицам 4 и 5 состоит в том, что ключевыми драйверами стоимости выступают цена металла и коэффициент извлечения; следовательно, качество переработки и устойчивость товарного выпуска имеют не меньшую значимость, чем собственно объем добычи.

Вывод по рисункам 2 и 3 состоит в том, что даже при положительном базовом NPV необходимо анализировать диапазон сценариев и временной профиль возврата капитала, так как именно они определяют риск инвестиционного решения.

Для повышения качества оценки инвестиционной привлекательности недр базовую модель DCF следует дополнять сценарным анализом, чувствительностью и, по возможности, моделями реальных опционов, что особенно важно для ранних стадий проектов с высокой неопределенностью [9-12].

Практическая значимость

Представленная структура может использоваться при подготовке учебных и прикладных технико-экономических материалов по недропользованию, при сравнении вариантов календарного планирования, а также при предварительном отборе инвестиционных проектов в горной отрасли. Она особенно полезна на стадиях, где необходимо быстро связать горно-технические параметры проекта с инвестиционной оценкой и показать инвестору, какие факторы формируют стоимость актива и риск отклонения результата от плана.

References

1. Козлов С.В., Плотников Р.В. Систематизация атрибутов многокритериальных моделей в горнодобывающей отрасли // Недропользование и транспортные системы. 2024. Т. 14. № 1. С. 25–57. DOI: 10.18503/SMTS-2024-14-1-25-57.
2. Елохова И.В., Плотников Р.В. Подход к моделированию инвестиционной привлекательности отрасли в региональном аспекте // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2024. Т. 17. № 1. С. 110–125. DOI: 10.15838/esc.2024.1.91.6.
3. Иванова Н.П., Сафронов Д.А. Оценка инвестиционной привлекательности угольной отрасли России // Экономика и предпринимательство. 2021. № 8. С. 250–258.

4. Гилярёва Л.В., и др. Ключевые показатели проектных управленческих решений для устойчивого функционирования геотехнологических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2026. № 2-1. С. 182–196.
5. Плотников Р.В., Елохова И.В. Особенности оценки инвестиционной привлекательности компаний реального сектора экономики // Информационное общество. 2025. № 1. С. 70–78.
6. Третьяков А.В. Инвестиционная привлекательность минерально-сырьевого комплекса России: современные тенденции и факторы роста // Недра XXI век. 2022. № 5. С. 52–59.
7. Бурлин Е.Б. Оценка инвестиционной привлекательности корпорации: методический подход // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № S1. С. 45–60.
8. Ряхлин М.Ю. Техничко-экономический аудит в горной промышленности: методические подходы и ключевые показатели // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 10. С. 120–135.
9. Сидоров В.В., Лопатников А.В. Оценка стоимости непроизводящих горнодобывающих компаний: проблемы и решения // Металлы. 2025. № 5. С. 35–47.
10. Иванов Д.С., Фёдоров П.Н. Потенциал развития горнодобывающего сектора России: экономический анализ и сценарное моделирование // Уголь. 2024. № 12. С. 15–23.
11. Смирнова Е.В. Технологические и маркетинговые тенденции в горнодобывающей промышленности и их влияние на инвестиционную привлекательность проектов // Горная промышленность. 2026. № 1. С. 34–45.
12. Лебедев А.Г. Цифровизация горнодобывающей отрасли и её влияние на методы оценки инвестиционных проектов // Экономика и управление в машиностроении. 2023. № 4. С. 90–99.