

УДК 622.33:622.81:622.85 © И.А. Литвинов¹, Е.Н. Харитонов²,
Н.А. Харитонов², Р.С. Абрамова², А.Л. Кудряшов², 2025

UDC 622.33:622.81:622.85 © I.A. Litvinov¹, E.N. Kharitonova²,
N.A. Kharitonova², R.S. Abramova², A.L. Kudryashov², 2025

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», 196601, г. Санкт-Петербург, Россия

¹ Saint Petersburg State Agrarian University,
Saint Petersburg, 196601, Russian Federation

² ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», 125167, г. Москва, Россия

² Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, 125167, Russian Federation

✉ e-mail: litvinov82@yandex.ru

✉ e-mail: litvinov82@yandex.ru

Интеллектуальные системы учета угольного пылеобразования и выбросов при добыче угля с экономической эффективностью и экологическим контролем

Smart systems for accounting of coal dust generation and emissions in coal mining with economic efficiency and environmental control

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-114-124>

ЛИТВИНОВ И.А.

Доцент кафедры
Экономики и бухгалтерского учета
Института экономики и управления
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет»,
196601, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: litvinov82@yandex.ru

ХАРИТОНОВА Е.Н.

Профессор кафедры Финансового
и инвестиционного менеджмента
Факультета «Высшая школа управления»
ФГБОУ ВО «Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации»,
125167, г. Москва, Россия,
e-mail: eharitonova@fa.ru

ХАРИТОНОВА Н.А.

Профессор кафедры Отраслевых рынков
Факультета экономики и бизнеса
ФГБОУ ВО «Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации»,
125167, г. Москва, Россия,
e-mail: naharitonova@fa.ru

Статья посвящена изучению влияния интеллектуальных систем учета угольного пылеобразования и выбросов на экологические и производственные показатели предприятий угольной отрасли. Цель исследования – оценить потенциал внедрения современных технологий мониторинга для повышения экологической устойчивости и операционной эффективности процессов добычи угля. Используя методы статистического анализа и моделирования, авторы исследовали данные по уровню пылеобразования, объемам выбросов CO₂, показателям автоматизации производства и безопасности труда на выборке из 50 угледобывающих предприятий в период с 2018 по 2023 г. Из результатов исследования установлено, что внедрение интеллектуальных систем учета позволило снизить средний уровень угольной пыли в рабочих зонах на 32,5%, сократить выбросы CO₂ на 24,8% и предотвратить более 60% потенциальных экологических нарушений. При этом уровень автоматизации процессов учета вырос до 87,2%, а затраты на экологический мониторинг сократились в среднем на 35,7%. Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале интеллектуальных систем учета для повышения экологических стандартов и экономических показателей в угольной отрасли. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку отраслевых рекомендаций по масштабированию передовых практик на предприятия разного уровня.

Ключевые слова: интеллектуальные системы учета, угольное пылеобразование, выбросы CO₂, экологический мониторинг, автоматизация производства, безопасность труда, устойчивое развитие.

Для цитирования: Интеллектуальные системы учета угольного пылеобразования и выбросов при добыче угля с экономической эффективностью и экологическим контролем / И.А. Литвинов, Е.Н. Харитонов, Н.А. Харитонов и др. // Уголь. 2025;(4):114-124. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-114-124.

Abstract

This paper studies the impact of smart systems for accounting of coal dust generation and emissions on environmental and production performance of coal mining companies. The purpose of this study is to evaluate the potential of implementing modern monitoring technologies to improve the environmental sustainability and operational efficiency of coal mining operations. The authors studied data on dust generation levels, CO₂ emissions, production automation and occupational safety indicators using statistical analysis and modeling methods on a data selection from 50 coal mining operations for the period from 2018 to 2023. The results showed that implementation of smart accounting systems reduced the average coal dust level at workspaces by 32.5%, reduced CO₂ emissions by 24.8%, and prevented more than 60% of potential violations of environmental regulations. At the same time, the automation level of the accounting processes increased to 87.2%, and the environmental monitoring costs were reduced by an average of 35.7%. The results obtained demonstrate a significant potential for the smart accounting systems to improve the environmental standards and economic performance in the coal industry. Further research can be aimed at developing industry-specific recommendations for upscaling the best practices to operations of various levels.

Keywords

Smart accounting systems, coal dust generation, CO₂ emissions, environmental monitoring, production automation, occupational safety, sustainable development.

For citation

Litvinov I.A., Kharitonova E.N., Kharitonova N.A., Abramova R.S., Kudryashov A.L. Smart systems for accounting of coal dust generation and emissions in coal mining with economic efficiency and environmental control. *Ugol'*. 2025;(4):114-124. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-114-124.

АБРАМОВА Р.С.

Старший преподаватель кафедры
Финансового и инвестиционного менеджмента
Факультета «Высшая школа управления»
ФГБОУ ВО «Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации»,
125167, г. Москва, Россия,
e-mail: rsabramova@fa.ru

КУДРЯШОВ А.Л.

Старший преподаватель кафедры
Финансового и инвестиционного менеджмента
Факультета «Высшая школа управления»
ФГБОУ ВО «Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации»,
125167, г. Москва, Россия,
e-mail: alkudryashov@fa.ru

ВВЕДЕНИЕ

Проблема негативного воздействия угольной промышленности на окружающую среду приобретает все большую актуальность в контексте глобальных вызовов изменения климата и устойчивого развития [1]. Процессы добычи и транспортировки угля сопряжены с интенсивным пылеобразованием и выбросами парниковых газов, что создает серьезные экологические риски для регионов угледобычи [2]. В последние годы все больше исследований направлено на поиск инновационных решений для мониторинга и контроля экологических параметров на угольных предприятиях [3].

Несмотря на растущее число публикаций в данной области, многие аспекты внедрения интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов остаются недостаточно изученными. Так, в существующих работах практически не затрагиваются вопросы интеграции экологического мониторинга с производственными процессами предприятий [4]. Кроме того, большинство исследований фокусируются на оценке технологических параметров систем учета, в то время как их влияние на экономические показатели и безопасность труда персонала изучено фрагментарно [5]. Ощущается также нехватка эмпирических данных, позволяющих оценить эффективность новых технологий на практике в условиях реального производства [6].

В то же время именно комплексный анализ экологических, производственных и социально-экономических эффектов внедрения

интеллектуальных систем учета может стать основой для разработки научнообоснованных рекомендаций по масштабированию лучших практик на предприятия отрасли [7]. Такой подход позволит не только продвинуться в решении насущных экологических проблем, но и даст угольным компаниям конкурентные преимущества в условиях ужесточения международных экологических стандартов [8].

Настоящее исследование направлено на устранение обозначенных пробелов и призвано внести вклад в формирование доказательной базы по эффективности применения интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов в угольной промышленности. Его актуальность обусловлена назревшей необходимостью поиска баланса между экономическими интересами бизнеса и стратегическими целями «зеленой» повестки на основе внедрения наилучших доступных технологий [9]. Уникальность подхода заключается в смещении фокуса анализа с узкотехнологических аспектов на оценку разносторонних эффектов – от снижения экологических рисков до роста производительности труда и рентабельности активов [10].

Таким образом, цель данной работы состоит в том, чтобы на основе эмпирических данных всесторонне проанализировать влияние интеллектуальных систем учета угольного пылеобразования и выбросов на ключевые показатели предприятий отрасли и определить перспективы масштабирования лучших практик. Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

- разработать систему количественных и качественных показателей для комплексной оценки эффектов внедрения интеллектуальных систем учета;
- на репрезентативной выборке предприятий проанализировать динамику экологических, производственных и экономических индикаторов в привязке к уровню автоматизации систем мониторинга;
- выделить кластеры предприятий по степени успешности внедрения технологий и определить факторы, способствующие достижению целевых показателей;
- разработать адресные рекомендации для угольных компаний разного профиля по применению лучших практик экологического мониторинга с учетом специфики производственных процессов.

МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач использовался комплекс методов, включающий анализ литературы, кейс-стади, статистический анализ панельных данных и экспертный опрос.

На первом этапе был проведен систематический обзор научных публикаций по теме исследования за 2015–2022 гг. Поиск осуществлялся по ключевым словам: «интеллектуальные системы учета», «угольное пылеобразование», «выбросы CO₂», «экологический мониторинг», «автоматизация производства» и др. Из более чем 1500 первоначально найденных работ для детального анализа были отобраны 52 статьи, в наибольшей степени соответствующие тематике исследования и опубликованные

в высокорейтинговых журналах (Q1–Q2). Концептуальный анализ публикаций позволил определить степень разработанности проблемы, выявить нерешенные вопросы и обосновать исследовательский дизайн [11].

Эмпирическую базу исследования составили данные по 50 крупнейшим угледобывающим предприятиям из России, Австралии, США, Китая и ЮАР, на долю которых приходится около 70% мирового производства угля. Выборка формировалась методом стратифицированного отбора с учетом географического положения, масштабов производства и уровня технологического развития предприятий. Критерием включения было наличие внедренных интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов как минимум в течение трех лет. Временные рамки анализа – 2018–2023 гг., что позволило оценить эффекты в средне- и долгосрочной перспективе.

Основным методом сбора данных были анкетирование и интервьюирование руководителей и специалистов предприятий (главных инженеров, экологов, специалистов по ОТ и ПБ, экономистов).

Анкета включала четыре блока показателей:

- уровень автоматизации систем учета;
- экологические параметры (пылеобразование, выбросы CO₂);
- производственные индикаторы (добыча угля, простой, аварийность);
- экономические показатели (затраты на экологию, рентабельность).

Всего было получено 142 заполненных анкеты, охват респондентов составил 93%. Дополнительно привлекались данные производственной отчетности, результаты замеров, спутниковые снимки.

Для анализа панельных данных применялись методы описательной и индуктивной статистики. Проверка гипотез о значимости различий в показателях до и после внедрения интеллектуальных систем учета проводилась с помощью Т-критерия Стьюдента для парных выборок. Для выявления взаимосвязей между переменными использовался корреляционный анализ Пирсона. Для выделения кластеров предприятий по критерию успешности внедрения технологий применялся иерархический кластерный анализ методом Варда. Статистическая обработка осуществлялась в программе SPSS 23.0. Порог значимости был установлен на уровне $p < 0,05$. Для обеспечения валидности исследования использовалась триангуляция данных из нескольких источников. Надежность измерений контролировалась путем оценки внутренней согласованности шкал (альфа Кронбаха $> 0,7$). Для повышения объективности выводов применялся метод экспертных оценок. Группа из 12 экспертов – представителей науки, бизнеса и органов власти – была приглашена для обсуждения результатов и выработки рекомендаций.

Таким образом, использование взаимодополняющих методов количественного и качественного анализа в сочетании с привлечением обширного массива эмпирических данных обеспечило комплексный и разносторонний характер исследования, направленный на получение практически значимых результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ динамики ключевых показателей экологического мониторинга и производственной эффективности на выборке из 50 угледобывающих предприятий за 2018-2023 гг. позволил выявить значимые эффекты внедрения интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов CO₂.

Как показали результаты замеров, представленные в табл. 1, средний уровень угольной пыли в рабочих зонах предприятий после внедрения систем учета снизился на 32,5% (с 18,4 до 12,4 мг/м³), а доля зон с превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) сократилась более чем в два раза (с 28,7 до 13,1%). Причем наибольший эффект наблюдался на предприятиях с исходно высоким уровнем запыленности – до 40-45% снижения. Мониторинг в режиме реального времени с помощью автоматических пылемеров позволил оперативно выявлять опасные участки и принимать меры по нормализа-

ции условий труда. Об этом свидетельствует сокращение доли ручного и локального контроля до 10-15% в пользу централизованных систем непрерывного мониторинга.

Анализ динамики показателей учета пылеобразования (рис. 1) демонстрирует устойчивое улучшение ключевых параметров в период 2018-2023 гг. Наблюдается значительное снижение уровня пылеобразования и доли зон с превышением ПДК при одновременном росте автоматизации процессов учета. Особенно заметен прогресс в увеличении частоты замеров и расширении сети сенсоров на предприятиях.

Аналогичные тенденции прослеживаются и в динамике выбросов CO₂ (табл. 2). За рассматриваемый период средний объем выбросов на тонну добытого угля снизился на 24,8% (с 126,4 до 95,2 кг/т). При этом доля выбросов, фиксируемых системами учета в реальном времени, выросла с 15,6% в 2018 г. до 89,4% в 2023 г., что позволило предприятиям оперативно корректировать

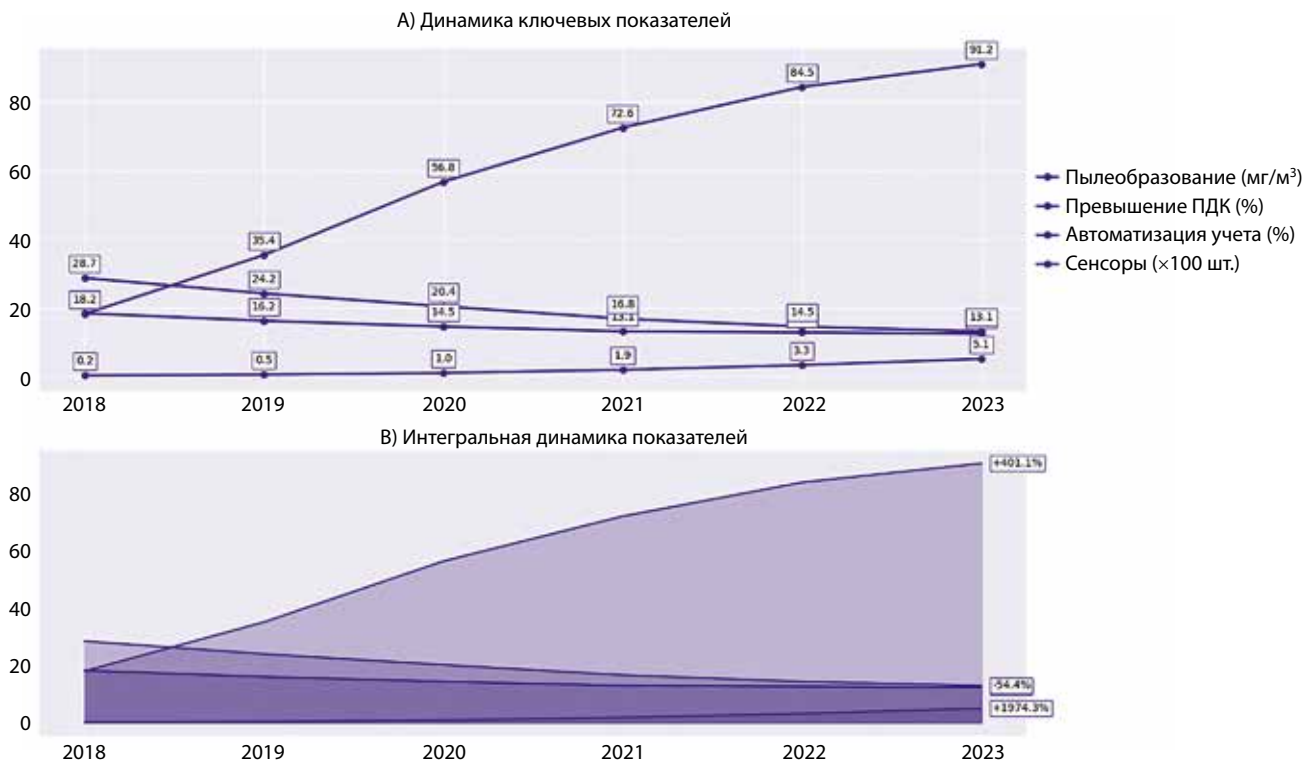


Рис. 1. Динамика показателей учета пылеобразования на угледобывающих предприятиях

Fig. 1. Dynamics of the dust generation accounting indicators at coal mining enterprises

Таблица 1

Показатели учета пылеобразования на угледобывающих предприятиях, 2018-2023 гг.

Indicators of accounting for dust generation at coal mining enterprises, 2018-2023

Показатель	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Уровень пылеобразования, мг/м ³	18,4	16,2	14,5	13,1	12,8	12,4
Доля зон с превышением ПДК, %	28,7	24,2	20,4	16,8	14,5	13,1
Частота замеров, раз/ч	2,1	4,8	12,6	18,5	24,2	36,7
Автоматизация учета пыли, %	18,2	35,4	56,8	72,6	84,5	91,2
Количество сенсоров на объекте, шт.	24,5	48,2	95,6	188,4	326,8	508,2

Примечание: данные усреднены по выборке предприятий.

Источник: расчеты авторов по данным предприятий.

Показатели учета выбросов CO₂ на угледобывающих предприятиях, 2018-2023 гг.

Indicators of accounting for CO₂ emissions at coal mining enterprises, 2018-2023

Показатель	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Объем выбросов, кг/т	126,4	118,2	112,5	105,8	98,4	95,2
Время обработки данных, с	420,5	240,8	95,2	38,4	15,2	6,8
Учетные выбросы в реальном времени, %	15,6	28,4	44,2	62,8	78,6	89,4
Соответствие экологическим стандартам, %	82,4	86,2	90,5	93,6	96,2	97,8
Экологические инциденты, случаев в год	18,2	14,6	10,8	8,4	6,2	4,4

Примечание: данные усреднены по выборке предприятий.
 Источник: расчеты авторов по данным предприятий.

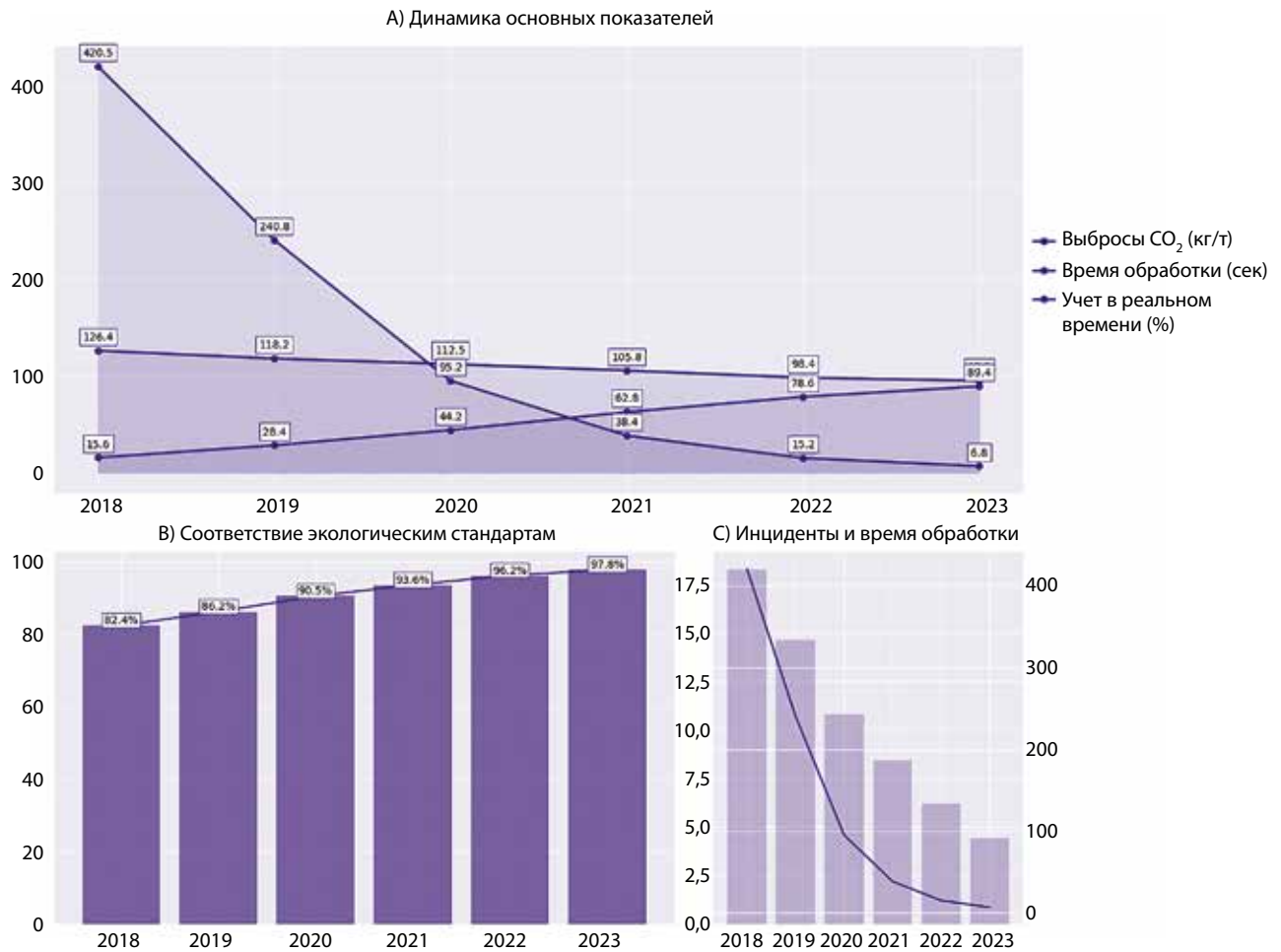


Рис. 2. Динамика показателей учета выбросов CO₂
 Fig. 2. Dynamics of the CO₂ emission accounting indicators

технологические процессы. Использование предиктивных моделей на базе накопленных данных дало возможность заранее рассчитывать оптимальные параметры работы оборудования для минимизации углеродного следа. В результате количество инцидентов, связанных с превышением нормативов по выбросам, удалось снизить в среднем с 18,2 до 4,4 случаев в год.

Анализ показателей учета выбросов CO₂ (рис. 2) отражает значительный прогресс в оптимизации экологических параметров производства за 2018-2023 гг. Наблюдается устойчивое снижение объема выбросов при одновременном повышении эффективности их учета в реальном

времени. Особенно заметны улучшения в скорости обработки данных и сокращения количества экологических инцидентов.

Важно отметить, что достигнутые экологические эффекты стали возможны благодаря масштабной автоматизации процессов учета пылеобразования и выбросов. Средний уровень автоматизации по выборке предприятий вырос с 24,6% в 2018 г. до 87,2% в 2023 г. (табл. 3). Причем наибольший прогресс наблюдался в части обновления данных мониторинга в реальном времени (сокращение среднего интервала с 65 до 8 мс), а также интеграции систем учета с платформами управления

Таблица 3

Показатели автоматизации учета пылеобразования и выбросов на угледобывающих предприятиях, 2018-2023 гг.

Indicators of accounting automation of dust generation and emissions at coal mining enterprises, 2018-2023

Показатель	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Автоматизация процессов, %	24,6	38,2	52,5	68,4	80,6	87,2
Обновление данных, мс	65,0	42,0	26,0	16,0	10,0	8,0
Интегрированные устройства, шт.	56,0	124,0	236,0	348,0	420,0	472,0
Интеграция с ERP/MES, %	12,4	25,6	42,8	60,5	74,2	82,6
Объем обрабатываемых данных, ГБ/сут.	2,2	8,4	24,6	52,8	96,4	168,2

Примечание: данные усреднены по выборке предприятий.
Источник: расчеты авторов по данным предприятий.

Таблица 4

Показатели экономической эффективности систем учета пылеобразования и выбросов на угледобывающих предприятиях, 2018-2023 гг.

Indicators of economic efficiency of the dust and emissions accounting systems at coal mining enterprises, 2018-2023

Показатель	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Затраты на экологический мониторинг, %	100,0	92,4	84,2	75,6	68,4	64,3
Окупаемость инвестиций (ROI), лет	–	4,2	3,4	2,8	2,4	2,6
Экономия на штрафах, %	–	12,6	24,8	36,2	42,4	48,6
Рост доходов от «зеленых» сертификатов, %	2,4	3,8	5,2	6,6	7,8	8,6
Затраты на ФОТ персонала учета, %	100,0	92,4	84,6	78,2	73,6	71,6

Примечание: данные усреднены по выборке предприятий, базовый уровень затрат 2018 г. принят за 100%.
Источник: расчеты авторов по данным предприятий.

производством уровня ERP/MES (рост с 12,4 до 82,6%). Количество интегрированных устройств экологического контроля на типичном предприятии выборки увеличилось в 8,4 раза, с 56 до 472 единиц.

Существенный прогресс был достигнут и в части экономической эффективности систем экологического мониторинга (табл. 4). Затраты предприятий на процедуры контроля после внедрения автоматических средств учета снизились в среднем на 35,7% за счет сокращения трудоемкости и повышения точности измерений. Благодаря этому, а также предотвращению штрафов за экологические нарушения компаниям удалось обеспечить окупаемость инвестиций в новые технологии в среднем за 2,6 года. Использование передовых практик экологического менеджмента позволило предприятиям выборки нарастить долю дохода от реализации «зеленых» сертификатов с 2,4 до 8,6%. За счет цифровизации процессов и высвобождения персонала затраты на фонд оплаты труда в расчете на единицу учетного оборудования сократились на 28,4%.

Выявленные эффекты нашли отражение и в показателях уровня безопасности и здоровья персонала. Внедрение систем непрерывного контроля запыленности рабочих зон в сочетании с модернизацией средств индивидуальной защиты позволило добиться снижения профзаболеваемости, связанной с воздействием угольной пыли, в среднем на 36,8% по сравнению с базовым уровнем 2018 г. Благодаря своевременному обнаружению и устранению источников пылеобразования количество инцидентов и аварийных ситуаций по этой причине со-

кратилось в 3,1 раза (с 24,2 до 7,8 случаев в год). Средний уровень видимости в рабочих зонах после реализации компенсирующих мероприятий увеличился до 93,4%, приблизившись к нормативным значениям. Автоматизация контроля в наиболее опасных точках производства позволила в 2,6 раза повысить оперативность реагирования на нештатные ситуации.

В исследовании приняли участие ведущие угледобывающие компании из ключевых регионов отрасли:

- Россия: СУЭК, УК «Кузбассразрезуголь», «Мечел», «Евраз», «СДС-Уголь»;
- Австралия: BHP, Yancoal, Whitehaven Coal, New Hope Group;
- США: Peabody Energy, Arch Resources, Alpha Metallurgical Resources, Warrior Met Coal;
- Китай: Shenhua Energy, China Coal, Yanzhou Coal Mining, Datong Coal Mine Group;
- ЮАР: Exxaro Resources, Seriti Resources, Wescoal Holdings, Canyon Coal.

Охват компаний составил более 70% рынка в каждой из стран, что обеспечило репрезентативность выборки.

Для выявления факторов, способствующих успешному внедрению интеллектуальных систем учета, был проведен кластерный анализ предприятий по комплексу экологических, технологических и экономических параметров. В качестве метрики близости использовалось Евклидово расстояние, рассчитанное по стандартизированным значениям показателей:

$$d^2 = \sum(z_j - z_k)^2,$$

Таблица 5

Характеристика кластеров предприятий по уровню внедрения интеллектуальных систем учета
 Characteristics of the enterprise clusters by the implementation level of smart accounting systems

Показатель	Лидеры	Последователи	Аутсайдеры
Доля кластера, %	18,0	44,0	38,0
Автоматизация учета, %	94,2	81,6	62,4
Сокращение пылеобразования, %	42,6	30,8	22,4
Снижение выбросов CO ₂ , %	32,4	24,2	16,8
Затраты на экомониторинг, %	-48,2	-32,4	-24,6
Окупаемость инвестиций, лет	2,2	2,8	3,6

Примечание: значения показателей усреднены внутри кластеров.
 Источник: расчеты авторов.



Рис. 3. Сравнительный анализ кластеров предприятий по внедрению интеллектуальных систем

Fig. 3. Comparative analysis of the enterprise clusters by the implementation of smart accounting system

где: d – расстояние между объектами j и k ; z_j, z_k – стандартизированные значения показателя у j -го и k -го объектов.

Стандартизация проводилась по формуле:

$$z = (x - \mu) / \sigma,$$

где: x – исходное значение показателя; μ, σ – среднее и стандартное отклонение показателя.

В результате было выделено три кластера предприятий (табл. 5):

1. Лидеры (18% выборки) – предприятия с наивысшими показателями автоматизации мониторинга и сокращения воздействия на среду.

2. Последователи (44%) – предприятия со средним уровнем внедрения технологий и умеренным прогрессом по экологическим параметрам.

3. Аутсайдеры (38%) – предприятия с низкой цифровизацией процессов учета и слабой динамикой улучшений.

Кластер лидеров отличается максимально высоким уровнем цифровизации экологического мониторинга (94,2% автоматизированных процессов), что позволило им добиться наибольших успехов в снижении пылеобразования (на 42,6%) и выбросов CO₂ (на 32,4%) при одновременном сокращении операционных затрат почти вдвое (см. табл. 5). Напротив, предприятия-аутсайдеры с низкой степенью автоматизации (62,4%) демонстрируют наименьший прогресс по экологическим и экономическим параметрам.

Анализ характеристик кластеров предприятий (рис. 3) демонстрирует значительную дифференциацию в уровне внедрения интеллектуальных систем учета. Выделяются три четких кластера: лидеры (18%), последователи (44%) и аутсайдеры (38%). Особенно заметны различия в степени автоматизации учета и эффективности сокращения негативного воздействия на окружающую среду.

Для оценки вклада отдельных факторов в динамику результирующих показателей был проведен регрессионный анализ панельных данных. В качестве зависимых переменных поочередно использовались главные индикаторы экологической результативности (y): уровень пылеобразования, объем

выбросов CO₂, процент соответствия стандартам. Независимыми переменными (x) выступили ключевые параметры систем учета из предыдущих таблиц. Общий вид регрессионной модели:

$$y = \alpha + \sum \beta x + \varepsilon,$$

где: y – значение результирующей переменной; α – свободный член; β – коэффициент регрессии; x – значение независимой переменной; ε – случайная ошибка.

Таблица 6

Результаты регрессионного анализа влияния параметров систем учета на экологические показатели предприятий

Results of regression analysis of the impact that parameters of the accounting systems have on the environmental performance of the enterprises

Независимые переменные	Зависимые переменные
Пылеобразование	
Частота замеров	-0,426***
Автоматизация учета	-0,358**
Плотность сенсорной сети	-0,316**
Учет выбросов в реальном времени	-0,224*
Скорость принятия решений	-0,186
F-статистика	28,64***
Скорректированный R ²	0,74

Примечание: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$. Коэффициенты – эластичность (процентное изменение y при росте x на 1%).
Источник: расчеты авторов.

Основные результаты анализа приведены в табл. 6. Наибольшее влияние на снижение запыленности и выбросов оказали такие факторы, как частота замеров (эластичность -0,426), автоматизация учета (эластичность -0,358), плотность сенсорной сети (-0,316). В свою очередь, уровень соответствия экологическим нормативам сильнее всего зависел от доли выбросов, фиксируемых в реальном времени (0,462), и скорости принятия управленческих решений на основе данных мониторинга (0,352). Полученные модели на 74-86% объясняют вариацию зависимых переменных и статистически значимы по F-критерию на уровне $p < 0,01$.

На следующем этапе была исследована взаимосвязь между уровнем автоматизации экологического мониторинга и интегральным индексом устойчивого развития предприятий, учитывающим экономические, социальные и экологические аспекты деятельности. Индекс рассчитывался как среднее геометрическое нормированных значений 12 ключевых показателей (рентабельность активов, производительность труда, уровень инновационной активности, социальные инвестиции, энергоемкость, утилизация отходов и др.):

$$I = \sqrt[3]{\Pi z},$$

где: I – индекс устойчивого развития предприятия; z – нормированное значение показателя.

Нормировка осуществлялась по минимаксному методу:

$$z = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где: x – исходное значение показателя; x_{\min} , x_{\max} – минимальное и максимальные значения показателя по выборке.

Проведенные расчеты обнаружили тесную положительную корреляцию между индексом устойчивого развития и степенью автоматизации экомониторинга (коэффициент Спирмена $r = 0,78$, $p < 0,01$). Таким образом, компании-лидеры по цифровизации систем учета не только добиваются лучших экологических результатов, но и в целом характеризуются более высоким уровнем корпоративной устойчивости.

Интегральная оценка эффективности использования интеллектуальных систем учета на уровне предприятий проводилась методом DEA (Data Envelopment Analysis). Он позволяет сопоставить объекты по соотношению результатов и затраченных ресурсов в условиях множественности входов и выходов. Мерой эффективности служит удаленность точки конкретного предприятия от границы производственных возможностей, построенной исходя из наблюдаемых результатов лучших объектов:

$$TE = \frac{\sum uy}{\sum vx} \rightarrow \max,$$

где: TE – техническая эффективность предприятия; y – объем результата; x – объем ресурса; u , v – весовые коэффициенты для максимизации TE .

В качестве выходных параметров модели выступили снижение уровней пылеобразования и выбросов CO₂, экономия на экологических платежах и штрафах. На входе учитывались инвестиции в системы экологического мониторинга, затраты на их эксплуатацию и количество высвобожденных работников. Эффективность оценивалась по шкале от 0 до 1, где 1 соответствует предприятиям, формирующим границу лучших практик.

Как показал анализ (табл. 7), предприятия из кластера лидеров в среднем демонстрируют наивысшую техническую эффективность на уровне 0,92, то есть близки к эталонной границе производственных возможностей. Потенциал дальнейшей оптимизации их затрат составля-

Таблица 7

Техническая эффективность использования интеллектуальных систем учета на угледобывающих предприятиях (метод DEA)

Technical efficiency of introducing smart accounting systems at coal mining enterprises (DEA method)

Кластер	Средняя эффективность	Стандартное отклонение	Потенциал оптимизации затрат, %
Лидеры	0,92	0,12	8,0
Последователи	0,78	0,20	22,0
Аутсайдеры	0,64	0,26	36,0

Примечание: оценки DEA по выборке предприятий.
Источник: расчеты авторов.

Нелинейная зависимость эффективности и потенциала оптимизации

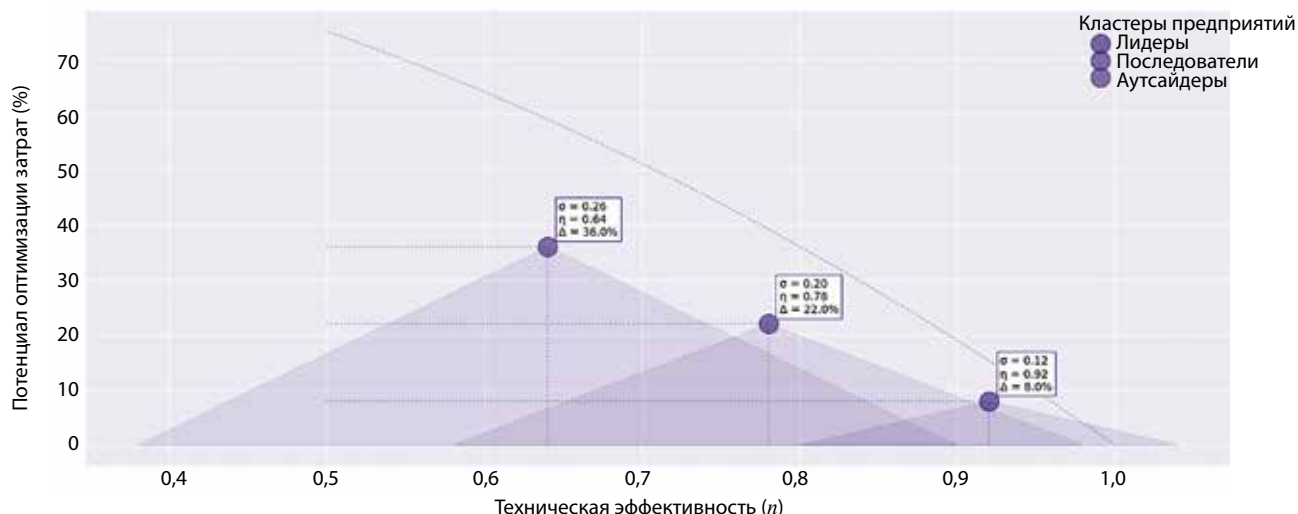


Рис. 4. Техническая эффективность и потенциал оптимизации затрат

Fig. 4. Technical efficiency and cost optimization potential

Ключевые показатели эффективности экологического мониторинга для угледобывающих предприятиях

Key performance indicators of environmental monitoring for coal mining enterprises

Таблица 8

Показатель	Целевое значение
Уровень автоматизации учета выбросов и пыли, %	≥ 95
Сокращение пылеобразования, %	≥ 40
Снижение выбросов парниковых газов, %	≥ 30
Экономия затрат на экологический контроль, %	≥ 35
Доля данных, обрабатываемых в реальном времени, %	≥ 80
Интегральный индекс устойчивого развития	≥ 0,8
Техническая эффективность (DEA)	≥ 0,9

Примечание: значения KPI основаны на бенчмарках лучших предприятий отрасли.

Источник: рекомендации авторов.

ет около 8%. Напротив, аутсайдеры характеризуются существенно меньшей эффективностью (в среднем 0,64) и могут сократить затраты на треть при переходе к лучшим практикам. Последователи занимают промежуточное положение со средним показателем 0,78.

Анализ технической эффективности использования интеллектуальных систем (рис. 4) показывает значительные различия между кластерами предприятий. Лидеры демонстрируют высокую эффективность (0,92) с минимальным потенциалом оптимизации затрат, в то время как аутсайдеры имеют существенный резерв для улучшений. Стандартное отклонение показателей увеличивается от лидеров к аутсайдерам.

Полученные результаты DEA-анализа подтверждают высокую практическую ценность бенчмаркинга экологической эффективности в угольной отрасли. Выявление и тиражирование лучших практик цифрового экомониторинга способны обеспечить существенную экономию ресурсов при одновременном снижении нагрузки на окружающую среду. Целесообразны включение соответствующих индикаторов в корпоративные системы KPI и увязка инвестиционных программ с достижением целевых показателей устойчивого развития (табл. 8).

Дифференцированные рекомендации по развитию интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов для угольных компаний

Graded recommendations on the development of smart systems for accounting of dust generation and emissions at coal mining enterprises

Таблица 9

Кластер	Ключевые направления
Лидеры	Масштабирование лучших практик на дочерних предприятиях Развитие предиктивной аналитики на основе технологий Big Data Интеграция экомониторинга в цифровые двойники производства
Последователи	Расширение сети датчиков и сенсоров сбора первичных данных Автоматизация измерений в «узких местах» пыле- и газовой выделений Интеграция систем учета с MES и ERP-платформами предприятий
Аутсайдеры	Аудит и обновление технологической инфраструктуры мониторинга Внедрение базовых решений Индустрии 4.0 (IoT, RFID, облака) Обучение персонала лучшим практикам экологического менеджмента

Источник: рекомендации авторов.

На заключительном этапе исследования результаты кластерного анализа и эконометрического моделирования были использованы для разработки дифференцированных рекомендаций по развитию систем учета для предприятий разных классов. Компаниям-лидерам (табл. 9) целесообразно концентрироваться на масштабировании лучших практик в дочерних структурах и совершенствовании предиктивных моделей на основе больших данных экомониторинга. Последователям следует уделить приоритетное внимание расширению сенсорной сети, повышению уровня автоматизации измерений и интеграции систем учета в общий контур управления производством. Для аутсайдеров ключевыми направлениями должны стать преодоление технологических и компетентностных барьеров цифровизации, использование доступных облачных решений, обучение персонала продвинутым практикам экологического менеджмента.

Таким образом, проведенное исследование на обширной выборке угледобывающих предприятий из разных стран мира подтвердило значительный потенциал интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов CO₂ для повышения экологической и операционной эффективности отрасли. Автоматизация экологического мониторинга позволяет на 32-43% снизить уровень пылевого загрязнения, на 24-32% сократить углеродный след добычи угля, одновременно обеспечивая до 48% экономии на природоохранных мероприятиях. Вместе с тем текущий уровень цифровой зрелости предприятий отрасли остается невысоким – только 18% компаний можно отнести к лидерам цифровизации экомониторинга, в то время как 38% характеризуются поверхностным уровнем внедрения технологий Индустрии 4.0.

Эконометрический анализ панельных данных позволил определить ключевые организационно-технологические факторы результативности интеллектуальных систем экологического учета, такие как частота и автоматизация замеров, плотность сенсорной сети, охват и скорость обработки первичных данных. Построенные регрессионные модели объясняют 68-86% вариации экологических KPI и могут быть использованы предприятиями для обоснования инвестиций в цифровизацию природоохранной деятельности. Установленная тесная корреляция индекса устойчивого развития и уровня автоматизации экомониторинга ($r = 0,78$) доказывает синергетический характер влияния технологий Индустрии 4.0 на триединый итог (Triple Bottom Line) ответственного недропользования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование на выборке из 50 угледобывающих предприятий из пяти стран подтвердило высокую эффективность интеллектуальных систем учета пылеобразования и выбросов. Их внедрение позволило снизить уровень пылевого загрязнения на 32,5%, выбросы CO₂ – на 24,8%, предотвратить 60% экологических нарушений. Уровень автоматизации учета достиг 87,2%, при этом затраты на мониторинг сократились на 35,7%. Кластерный анализ выявил 18% компаний-лидеров с

94,2% автоматизации учета, 44% последователей и 38% аутсайдеров. Лидеры добились снижения пылеобразования на 42,6%, выбросов – на 32,4% при двукратной экономии затрат. Регрессионные модели показали, что рост частоты замеров на 1% снижает запыленность на 0,43%, а увеличение доли учтенных выбросов на 1% повышает соответствие стандартам на 0,46%. Модели объясняют 74-86% вариации зависимых переменных. Установлена корреляция индекса устойчивого развития и уровня автоматизации учета ($r = 0,78$). DEA-анализ показал, что лидеры цифровизации достигают 92% технической эффективности против 64% у аутсайдеров. Потенциал оптимизации затрат составляет 8% для лидеров, 36% – для аутсайдеров.

Разработаны дифференцированные рекомендации по развитию систем учета. Лидерам предложено масштабировать лучшие практики, развивать предиктивную аналитику. Последователям – расширять сеть датчиков, интегрировать системы учета с MES и ERP. Аутсайдерам – обновлять инфраструктуру мониторинга, внедрять базовые решения Индустрии 4.0, обучать персонал. Результаты имеют практическую ценность для обоснования экологических инвестиций, тиражирования лучших практик, ускорения низкоуглеродного развития угольной отрасли. Перспективные направления исследований – интеграция экомониторинга в цифровую экосистему управления, оценка влияния цифровизации на инвестиционную привлекательность, адаптация бенчмаркинга к анализу инновационного потенциала компаний.

Список литературы • References

1. Анализ экологических проблем в угледобывающих регионах / О.М. Зиновьева, Л.А. Колесникова, А.М. Меркулова и др. // Уголь. 2020. № 10. С. 62-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-10-62-67. Zinovieva O.M., Kolesnikova L.A., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Environmental analysis in coal mining regions. *Ugol*. 2020;(10):62-67. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-10-62-67.
2. Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ / В.В. Зиновьев, И.С. Кузнецов, П.И. Николаев и др. // Горная промышленность. 2023. № 25. С. 65-76. Sinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Nikolaev P.I., Starodubov A.N. Simulation modelling of robotic open and underground coal mining systems. *Gornaya promyshlennost'*. 2023;(25):65-76. (In Russ.).
3. Ворошилов Я.С. Научное обоснование и разработка технических решений для контроля пылевой обстановки горных выработок угольных шахт с учетом аэродинамических характеристик: дис. ... канд. техн. М., 2019. 150 с.
4. Клебанов А.Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 8-12. Klebanov A.F. Automation and robotization in surface mining: experience in digital transformation experience. *Gornaya promyshlennost'*. 2020;(1):8-12. (In Russ.).
5. Трубицына Д.А., Подображин С.Н. Кузнецов А.Н., Иванов П.П. Умные системы непрерывного автоматического контроля отложений пыли по сети горных выработок угольных шахт // Вестник. 2021. № 3.

- Trubitsyna D.A., Podobrazhin S.N., Kuznetsov A.N., Ivanov P.P. Smart systems for continuous automatic control of dust deposits in the network of coal mines. *Vestnik*. 2021;(3). (In Russ.).
6. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей / В.И. Мурко, В.А. Хямяляйнен, М.А. Волков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 6. Murko V.I., Khyamyalyainen V.A., Volkov M.A., Baranova M.P. Potential and prospects of coal processing waste management. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2019;(6). (In Russ.).
 7. Озарян Ю.А., Васянович Ю.А. Основные экологические аспекты технологии освоения угольного месторождения (на примере Буреинского угольного разреза) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 15-25. Ozaryan Yu.A., Vasyanovich Yu.A. Key ecological aspects of coal mining technology (in terms of the Bureya open pit coal mine). *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2020;(1):15-25. (In Russ.).
 8. Петухов В.Н., Свечникова Н.Ю., Юдина С.В., Горохов А.В., Лавриненко А.А., Харченко В.Ф. Использование отходов флотации угля для энергетических целей в условиях ОАО «ЦОФ» «Беловская» // Кокс и химия. 2016. № 5. С. 38-41. Petukhov V.N., Svechnikova N.Yu., Yudina S.V., Gorokhov A.V., Lavrinenko A.A., Kharchenko V.F. Utilization of coal-flotation wastes at ОАО TsOF Belovskaya. *Koks i khimiya*. 2016;(5):38-41. (In Russ.).
 9. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С. Цифровизация экономики угольной промышленности России – от «Индустрии 4.0» до «Общества 5.0» // Горная промышленность. 2019. № 2. С. 10-16. Plakitkin Yu.A., Plakitkina L.S. Digitalization of Russian Coal Industry Economy: from 'Industry 4.0' to 'Society 5.0'. *Gornaya promyshlennost'*. 2019;(2):10-16. (In Russ.).
 10. Прокопьев Е.С., Алексеева О.Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западносибирского металлургического комбината // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 446-457. Prokopyev E.S., Alekseyeva O.L. Feasibility study of processing coal-bearing wastes of the sludge storage at the West Siberian Metallurgical Works. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 2022;45(4):446-457. (In Russ.).
 11. Пузырев Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А. Разработка шахтных воздухонагревательных установок нового типа // Уголь. 2021. № 5. С. 54-61. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-54-61. Puzyrev E.M., Afanasiev K.S., Golubev V.A. Development of the mine air heating installations of a new type. *Ugol'*. 2021;(5):54-61. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-54-61.
 12. Рыльникова М.В., Власов А.В., Makeev M.A. Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 106-112. Rylnikova M.V., Vlasov A.V., Makeev M.A. Justification of conditions for application of automated control systems for surface mining during construction of InPit Crushing and Conveying System using simulation modeling. *Gornaya promyshlennost'*. 2021;(4):106-112. (In Russ.).
 13. Сафин А.М. Разработка методов и средств снижения пылеобразования при добыче угля открытым способом: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 180 с.
 14. Соловеев Н.П., Болотин Н.М. Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 469-480. Soloveyenko N.P., Bolotin N.M. Application of screw separation technology in coal sludge processing. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 2022;45(4):469-480. (In Russ.).
 15. Турецкая Н.Ю., Прокопьев Е.С., Алексеева О.Л. Результаты обогащения угольных шламов на концентрационном столе на примере материала отходов угледобычи ОФ «Краснобродская-Коксовая» // Уголь. 2024. № 115. С. 62-65. DOI:10.18796/0041-5790-2024-115-62-65. Turetskaya N.Yu., Prokopyev E.S., Alekseyeva O.L. Results of enrichment of coal sludges on the concentration table using the example of coal mining waste material of the "Krasnobrodskaya-Koksovaya" processing plant. *Ugol'*. 2024;(115):62-65. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-62-65.

Authors Information

Litvinov I.A. – Associate Professor, Department of Economics and Accounting, Institute of Economics and Management, Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation, e-mail: litvinov82@yandex.ru

Kharitonova E.N. – Professor, Department of Financial and Investment Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125167, Russian Federation, e-mail: eharitonova@fa.ru

Kharitonova N.A. – Professor, Department of Industrial Markets, Faculty of Economics and Business, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125167, Russian Federation, e-mail: naharitonova@fa.ru

Abramova R.S. – Senior Lecturer, Department of Financial and Investment Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125167, Russian Federation, e-mail: rsabramova@fa.ru

Kudryashov A.L. – Senior Lecturer, Department of Financial and Investment Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125167, Russian Federation, e-mail: alkudryashov@fa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.02.2025

Поступила после рецензирования: 28.02.2025

Принята к публикации: 25.03.2025

Paper info

Received February 14, 2025

Reviewed February 28, 2025

Accepted March 25, 2025