



Постулаты развития транспортных систем горных предприятий

В.Ю. Коптев¹ ✉, А.В. Коптева¹, О.А. Аристова², М.А. Александров³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² АО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ АО «А-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ koptev_vyu@pers.spmi.ru

Резюме: В статье рассмотрены закономерности развития транспортных систем горнодобывающих предприятий в условиях изменяющихся горнотехнических, экономических и технологических факторов. Развитие транспортных систем исследуется с позиций системного анализа, транспортной логистики, цифровой трансформации производства и концепции цифровых двойников. Показано, что устойчивое функционирование транспортных систем обеспечивается структурной адаптацией, повышающей их гибкость и устойчивость к внешним и внутренним воздействиям. Предложена концептуальная последовательность развития транспортной системы, включающая взаимосвязанные этапы формирования потребности, адаптации, гибкости и обеспечения стабильности функционирования. На основе анализа действующих горнодобывающих предприятий рассмотрены практические примеры структурной модернизации транспортных систем, направленной на повышение надёжности, устойчивости грузопотоков и эффективного применения транспортного оборудования. Показано, что применение новых транспортных элементов и развитие цифровой архитектуры предприятия создают предпосылки для формирования цифровых двойников транспортных систем и реализации концепции интеллектуального горного предприятия.

Ключевые слова: грузопоток, горное производство, транспортная система, логистическая система, цифровизация, цифровой двойник горнодобывающего предприятия

Для цитирования: Коптев В.Ю., Коптева А.В., Аристова О.А., Александров М.А. Постулаты развития транспортных систем горных предприятий. *Горная промышленность*. 2026;(4S):194–201. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-194-201>

Principles for development of transport systems at mining operations

V.Yu. Koptev¹ ✉, A.V. Kopteva¹, O.A. Aristova², M.A. Alexandrov³

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Polymetal Engineering JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

³ A-Engineering JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ koptev_vyu@pers.spmi.ru

Abstract: The article examines patterns governing the development of transport systems at mining operations in conditions of varying mining, geotechnical, economic, and technological factors. Evolution of these transport systems is investigated from the perspective of systems analysis, transport logistics, digital transformation of production, and the digital twin concept. It is demonstrated that sustainable operation of the transport systems is ensured through structural adaptation, which enhances their flexibility and resilience to both external and internal factors. A conceptual sequence for the development of the transport system is proposed, comprising the interconnected stages of demand formulation, adaptation, flexibility enhancement, and provision of operational stability. Case studies of structural modernization aimed at improving reliability of transport systems, stabilizing material flows, and enabling efficient utilization of the haulage equipment are discussed based on analyzing active mining operations. It is shown that integration of novel transport components and advancement of the company's digital architecture create opportunities for development of digital twins of the transport systems and implementation of the Smart Mine concept.

Keywords: material flow, mining operations, transport system, logistics system, digitalization, digital twin of the mining operation

For citation: Koptev V.Yu., Kopteva A.V., Aristova O.A., Alexandrov M.A. Principles for development of transport systems at mining operations. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):194–201. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-194-201>



Введение

Горнодобывающая отрасль относится к числу непрерывно развивающихся отраслей промышленности. Технологический цикл добычи полезных ископаемых представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, включающую бурение, взрывные работы, экскавацию, транспортирование, складирование и обогащение полезных ископаемых.

Развитие систем добычи, подобно эволюции живой природы, представляет собой естественный и необратимый процесс, сопровождающийся изменением структуры системы, её адаптацией к окружающей среде, видообразованием. При наступлении критических ситуаций происходит переход через точку сингулярности, сопровождающийся разрушением или переходом на новый этап развития.

Производственная (техническая) система должна обладать устойчивостью, обеспечивающей достижение поставленных целей. Основной задачей транспортной системы горного предприятия является обеспечение стабильного транспортирования полезного ископаемого и вскрышных пород к конечным пунктам назначения (обогачительным фабрикам, складам, отвалам). Производственный процесс должен осуществляться непрерывно, своевременно и с достижением планируемых показателей. Стабильность функционирования транспортной системы определяется достижением планируемого результата и обеспечивается выполнением условия:

$$Q \leq Q_{\text{т}} = Q_{\text{план}}, \quad (1)$$

где Q – расчётный грузопоток; $Q_{\text{т}}$ – производительность транспортной системы; $Q_{\text{план}}$ – планируемое для переработки количество груза.

Нарушение данного условия приводит к снижению эффективности транспортной системы, необходимости корректировки технических решений и вмешательству подсистемы управления.

Эффективность функционирования транспортной системы определяется степенью достижения плановых показателей при минимальных эксплуатационных затратах и максимальной экономической эффективности. Целевая функция логистической системы описывается выражением:

$$\Pi = D - 3 \rightarrow \max, \quad (2)$$

где Π – прибыль предприятия; D – доход предприятия; 3 – суммарные затраты.

Дополнительными критериями являются выполнение производственного плана, показатели надежности, величина отклонений от расчетных параметров и экономическая эффективность.

Развитие горных работ сопровождается изменением пространственного положения добычных участков, направлений и объемов грузопотоков, что требует постоянной модернизации транспортной системы. Ее устойчивость обеспечивается не сохранением неизменной структуры, а способностью адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Основным механизмом такой адаптации выступает гибкость транспортной системы, позволяющая перераспределять грузопотоки, компенсировать отказы оборудования и учитывать изменения производственной программы [1–3].

Авторами настоящей статьи в предыдущих исследованиях уже было показано, что комплексная реализация ряда концепций позволяет создать «умное» горнодобывающее

предприятие [4]. Эти концепции направлены на обеспечение устойчивости системы путём трансформации существующих добывающих предприятий в интеллектуальные производства. Согласно ранее полученным результатам к основным направлениям такой трансформации относятся: непрерывный мониторинг технологических процессов, повышение безопасности и качества выполнения работ, обеспечение рациональной эксплуатации оборудования, выбор оптимальных режимов его работы, оперативная корректировка проектных решений и повышение эффективности процессов обогащения полезных ископаемых [5–7].

Уникальность каждого месторождения и его развития требует учитывать характерные особенности горнодобывающего предприятия (ГДП) [8]. Специфика ГДП заключается в постоянном изменении пространственного положения зон добычи, увеличении расстояний транспортирования, необходимости поддержания непрерывности грузопотоков и адаптации транспортной системы к изменяющимся условиям эксплуатации. В результате требуется наращивание технологических линий, увеличивается протяжённость маршрутов, глубина расположения мест добычи, величина уклонов, проведение новых выработок и углубления стволов, перенос и создание пунктов перегрузки для подземных работ; обустройство уступов для открытых горных работ. Всё это сопровождается ростом затрат на добычу и транспортирование горной массы.

Существенную помощь в создании новых транспортных систем и модернизации уже действующих оказывает система цифрового двойника (Digital Twin) [9–11]. Использование цифровых двойников предоставляет возможность выполнять виртуальные испытания проектируемых транспортных систем, анализировать их функционирование в различных производственных условиях, прогнозировать возможные изменения и оптимизировать принимаемые технические решения без риска для реального производства [12–14]. Благодаря анализу данных в режиме реального времени цифровые двойники обеспечивают прогнозирование поведения транспортных систем при различных сценариях эксплуатации, повышая качество принимаемых управленческих решений [15; 16].

Постановка проблемы

На современных ГДП горная масса транспортируется «валовым» способом. Добываемая масса представляет собой многокомпонентное минеральное сырьё, в котором содержание ценных компонентов, как правило, невелико и варьируется от сотых долей процента до нескольких процентов от общего объёма. Основную массу составляют пустые породы (вскрышные и вмещающие), направляемые в отвалы несмотря на то, что на их выемку, отделение от массива и транспортирование уже затрачены значительные материальные и энергетические ресурсы [17–19].

Согласно докладу Международной группы по ресурсам UNEP [20] современное управление минеральными ресурсами требует системного подхода и долгосрочного планирования развития горнодобывающих предприятий. В теории развития систем принято выделять два уровня управления развитием ГДП: макро- и микроуровень. На региональном уровне (макро) стратегическая задача заключается в преодолении структурного кризиса. Для этого необходимы: определение и поддержка приоритетных отраслей [21]; транснациональное управление [22], устойчивость развития горнодобывающих компаний [23; 24] и примене-



ние ESG-стратегии (Environmental, Social, and Governance), предусматривающей долгосрочный план развития бизнеса, учитывающий экологические, общественные и управленческие аспекты деятельности компании и создающий условия устойчивого и долгосрочного прогресса. Следует отметить, что для многих отечественных предприятий на современном этапе первоочередной задачей остаётся обеспечение финансовой устойчивости и предотвращение банкротства. Лишь после достижения необходимого уровня экономической стабильности становится возможной реализация долгосрочных программ развития. В этой связи основной целью управления становится повышение производительности при одновременном снижении совокупных затрат.

Развитие ГДП основывается прежде всего на поиске эффективных управленческих и адаптационных решений. На конкретных примерах показано, что совершенствование системы управления позволяет существенно повысить эффективность транспортной системы. Отдельно требуется отметить необходимость повышения энергоэффективности системы посредством внедрения интеллектуальных систем управления [25–27]. На уровне отдельного элемента транспортной системы управление сводится к обеспечению надёжного выполнения им своих логистических функций и операций. При этом управление выступает самостоятельной логистической функцией, поддерживающей работоспособность элемента и обеспечивающей эффективное перемещение материального потока с сохранением требуемых характеристик.

Когда же речь идёт об уровне всей логистической системы, управление должно обеспечивать её устойчивую работу так, чтобы система могла эффективно обмениваться с внешней средой (рынком) потоками сырья, готовой продукции и услуг [28–30]. При этом управление также должно давать логистической системе способность адаптироваться к меняющимся внешним условиям (например, к падению спроса или снижению доступности источников сырья) и обеспечивать её поступательное развитие, то есть воспроизводство.

В настоящее время недостаточно исследованы вопросы развития транспортных систем за счёт совершенствования их структуры, включая введение новых элементов, изменение функциональных связей и формирование цифровой архитектуры управления. Именно структура транспортной системы во многом определяет её устойчивость, адаптивность и возможность дальнейшей интеллектуализации [31; 32].

Современная транспортная система должна обеспечивать возможность изменения маршрутов грузопотоков, перераспределения производительности между отдельными элементами и устойчивое функционирование при изменении объёмов добычи, отказах оборудования и проведении технического обслуживания.

С позиций системного анализа развитие транспортной системы целесообразно рассматривать как последовательность взаимосвязанных этапов:

Потребность → Развитие → Адаптируемость → Гибкость → Стабильность.

При этом развитие заключается не только в строительстве новых транспортных объектов, но и в структурной модернизации действующей системы. Повышение её гибкости достигается посредством изменения состава элементов и характера их взаимодействия, что обеспечивает

перераспределение грузопотоков и сохранение требуемой производительности при изменении условий эксплуатации [33].

Таким образом, устойчивость транспортной системы определяется не неизменностью её структуры, а способностью своевременно адаптироваться к изменяющимся условиям за счёт структурной гибкости и вариативности принимаемых технических решений.

Материалы и методы

В основе исследования лежит систематический обзор актуальных научных публикаций и изучение практического опыта в области повышения эффективности взаимодействия процессов ГДП. Особое внимание уделялось работам, посвящённым системам управления материальными и информационными потоками, а также внедрению эффективных транспортных систем.

В работе использованы следующие современные методы исследования систем: основы системного анализа; положения транспортной логистики; анализ статистики отказов, определение показателей надёжности и распределения грузопотоков; экономические показатели – анализ приведенных затрат и прибыли; методы решения изобретательских задач (анализ метода ТРИЗ).

Системный анализ транспортных систем включал: исследование технических возможностей применяемого оборудования; анализ существующих грузопотоков; анализ статистики отказов; поиск технических решений для придания гибкости транспортной системе при обеспечении устойчивости транспортной системы (стабильности её работы).

Концепция «Индустрия 4.0» [34; 35] показывает, что цифровая трансформация открывает новые пути для роста эффективности: интеграция человека, компьютеров и технологий, использование больших данных, связность процессов, применение ИИ, средств продвинутой аналитики, цифровых двойников, роботизированных комплексов.

Одновременно переосмысление сложившихся логистических парадигм позволило по-новому оценить транспортную сеть и выявить её более уязвимые элементы. Существует свод логистических правил, норм и методов, направленный на бережное расходование ресурсов и организацию потоков. Логистическое преимущество в организации производств возникает благодаря эффективному взаимодействию многих участников. Поэтому при разработке стратегии для ГДП нужно добиться синергии – согласованной работы всех технологических процессов и сторон.

Результаты и их обсуждение

Как отмечалось ранее, транспортные системы горных предприятий должны быть устойчивыми. Рассмотрим пример на основе конвейерного транспорта. В случае когда руда транспортируется с нескольких разных зон одним комплексом, для повышения устойчивости всей системы необходимо предусмотреть возможность перенаправлять рудопоток с одной зоны на другую. Это может потребоваться при аварии, неравномерных добыче или развитии горных работ.

Таким образом, несмотря на высокую эффективность конвейерного транспорта, для его нормальной эксплуатации следует уделять пристальное внимание параметрам как отдельного конвейера, так и всей конвейерной цепи в целом.

Крыло №1

Крыло №2

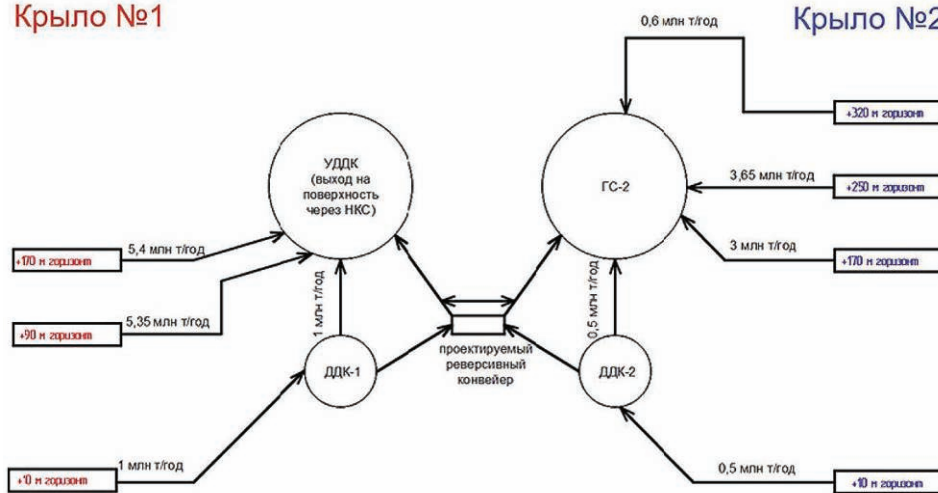


Рис 1
Функциональная транспортная система Рудника №1: ДДК-1 и ДДК-2 – дробильно-доставочные комплексы; ГС-2 – главный ствол скипового подъёмника; НКС – наклонный конвейерный ствол; цифрами показаны горизонты и грузопотоки

Fig. 1
Functional transport network of Mine No. 1: ДДК-1 and ДДК-2 – crushing-and-delivery complexes; ГС-2 – the main skip hoist shaft; НКС – inclined conveyor shaft; the figures indicate mine levels and material flows

Ниже в качестве практических примеров придания гибкости транспортной системе рассматривается развитие двух рудных горнодобывающих предприятий. На примере одного из горнодобывающих предприятий (условное обозначение – «Рудник № 1», рис. 1) два комплекса обеспечивают выдачу горной массы на поверхность с различными грузопотоками: конвейерный и скиповой подъём. Поломка оборудования любого из комплексов, изменения объёмов добычи и др. выводят транспортную систему из стабильного состояния. С углублением горных работ на новых, более низких горизонтах +90 м, +10 м и –70 м существующая схема транспортировки руды уже не в полной мере отвечает современным требованиям к энергоэффективности, уровню автоматизации и промышленной безопасности. В связи с этим возникла необходимость подобрать альтернативный, более эффективный вид транспорта.

Анализ статистики отказов, определение показателей надежности и распределения грузопотоков привели к пересмотру существующей транспортной схемы с добавлением нового узла, который представляет собой реверсивный конвейер с целью перегрузки руды. Анализ существующей схемы показал перегрузку комплекса ГС-2, отсутствие резервных маршрутов транспортирования и невозможность перераспределения грузопотоков при изменении условий эксплуатации, что снижает устойчивость транспортной системы.

Неравномерность загрузок участков выдачи руды на поверхность и максимальная загрузка комплекса ГС-2 на данный момент привели к следующим негативным последствиям: аварийные отказы, являющиеся случайной величиной, стали принимать частый характер проявления; расход электроэнергии комплекса ГС-2, который зависит от количества циклов подъёмов скипа увеличен в связи с полной загрузкой комплекса; согласно данным с предприятия за май 2022 г. простой ГС-2 составил 86 ч.

Одной из причин возникновения аварийных отказов является максимальная загрузка скипового подъёма и загрузочного конвейера. Отсутствие возможности отгрузки руды с ДДК-1 на ГС-2 приводит к уменьшению устойчивости конвейерной системы. В случае аварийной остановки конвейеров крыла 1 нет возможности перенаправить грузопоток на ГС-2 крыла 2. При увеличении добычи на участках крыла 1 горизонта +10 м нет возможности управления грузопотоками.

Для существующей конвейерной линии и обеспечения стабильности транспортной системы горного предприятия предложен вариант с установкой реверсивного конвейера, что уменьшает простои в выдаче руды в связи с отказами техники в каком-либо крыле. Реверсивный конвейер выполняет функции двух конвейеров и перенаправляет грузопоток поочерёдно (по мере необходимости) в противоположных направлениях. Часто такие системы применяются на перегрузочных пунктах и для загрузки бункеров. Введение реверсивного конвейера обеспечивает перераспределение грузопотоков, снижает вероятность простоев при отказах оборудования, повышает устойчивость транспортной системы и уменьшает эксплуатационные затраты.

Проведенный экономический анализ позволил определить прогнозируемую среднемесячную недополученную чистую прибыль предприятия в результате возможных простоев наклонного конвейерного ствола (рис. 2). Таким образом, в связи с наличием конвейерной линии на руднике и необходимости ее эффективной работы предложенный вариант с установкой реверсивного конвейера, т.е. путем увеличения степени динамизации веполя, придает стабильность системе и уменьшает простои в выдаче руды в связи с отказами техники в каком-либо крыле и увеличивает прибыль рудника.



Рис. 2
Ожидаемая недополученная прибыль при простоях наклонного конвейерного ствола

Fig. 2
Projected profits lost due to downtime of the inclined conveyor shaft



На подземном руднике Шерегешского месторождения АО «ЕВРАЗ ЗСМК» после ввода нового концентрационного горизонта +10 м возникла необходимость повышения пропускной способности конвейерной линии с одновременным приёмом нескольких грузопотоков. При переходе горных работ с горизонта +115 м на +10 м камеры дробления переносятся ниже. При новом расположении камер дробления требуется увеличить протяжённость трассы до ~105 м, сохранив прежнюю точку разгрузки и камеру привода. При сохранении установленного оборудования и расположения погрузочного комплекса скипового подъёмника с увеличением производственной мощности критическим элементом транспортной системы становится конвейерная линия. Новый суммарный расчетный грузопоток составит 831,2 т/ч ($Q_1 = 640,7$ т/ч и $Q_2 = 190,5$ т/ч).

При этом точка загрузки в скиповый ствол остаётся неизменной на отметке –50,2 м. В связи с этим возникает необходимость удлинить наклонный ленточный конвейер, который транспортирует дроблённую руду от комплекса подземного дробления к загрузке в скипы.

Проведенный анализ существующей схемы транспортирования руды на поверхность скиповым подъёмником и использования существующего оборудования, во избежание строительства новых горно-капитальных выработок, предложена реконструкция конвейерной линии. Вместо действующего наклонного ленточного конвейера длиной 19 м с углом наклона 10° рассмотрены три альтернативные схемы реконструкции: удлиненный конвейер с промежуточным приводом (вариант 1), удлиненный наклонный конвейер с головным приводом в точке сброса (вариант 2), применение двух последовательно установленных конвейеров длиной по 55 м с перегрузкой (вариант 3): первый конвейер транспортирует Q_1 до перегрузочного узла; второй, по ситуации – $Q_1 + Q_2$.

Для каждого варианта определены характерные области применимости, связанные с геометрией трассы, производительностью, тяговыми и пусковыми режимами, а также произведены расчёты показателей надёжности, экономичности и энергоёмкости при минимальных изменениях выработки и комплексов загрузки.

В транспортной системе «комплекс подземного дробления – ленточный конвейер – камера загрузки скипов» изменяется геометрия трассы и параметры конвейера, а точка разгрузки в скип остаётся неизменной. Их изменение при реконструкции определяет тяговые усилия, пусковые режимы, фактическое заполнение ленты рудой и удельную энергоёмкость.

В табл. 1 приведена сводная таблица экономических показателей альтернативных вариантов. Капитальные единовременные затраты K^* по каждому варианту определяются суммированием стоимости оборудования по составленным калькуляциям узлов конвейеров. Годовые эксплуатационные расходы определяются оплатой труда работников $C_{\text{фот}}$, амортизационными отчислениями $C_{\text{ам}}$, затратами на техническое обслуживание и ремонт электродвигателей $C_{\text{рем}}$, затратами на электроэнергию $C_{\text{эл}}$, а также материальными затратами на замену ленты и частичную замену роликкоопор $C_{\text{мат}}$.

Дополнительно учитывались горноподготовительные работы K_1 , руб., по устройству камер (ниш) для размещения промежуточной приводной станции (вариант 1) и оборудования перегрузочного узла (вариант 3). Расчет выполнен укрупненно по единичным расценкам в базисном уровне

Таблица 1
Сводная таблица
экономических показателей
альтернативных вариантов

Table 1
A summary of the economic
efficiency metrics for the
alternative development
scenarios

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
K^* , руб.	6 026 816	2 204 567	9 048 674
$C_{\text{ам}}^*$, руб/год	602 682	220 457	904 867
$C_{\text{год}}^*$, руб/год	5 863 881	5 027 504	8 311 993
Z^* , руб/год	6 587 099	5 292 052	9 397 834
K , руб.	2 298 787	2 204 567	3 456 630
$C_{\text{эл}}$, руб/год	2 696 646	2 247 205	2 482 334
$C_{\text{фот}}$, руб/год	2 343 600	2 343 600	4 687 200
$C_{\text{год}}$, руб/год	5 491 078	5 027 504	7 752 789
Z , руб/год	5 766 932	5 292 052	8 167 585

цен на имеющийся период с последующим переводом в текущие цены по укрупненному индексу $I = 400$.

Приведенные затраты (критерий выбора): $Z_1 = C_{\text{год},1} + r \cdot K_1$ при $r = 0,12$.

Совершенствование структуры за счёт введения новых элементов в транспортную систему и применение новых, с расширенными функциональными свойствами повышает её устойчивость. Эффективность системы можно повысить через повышение степени динамизации, то есть через переход к более гибкой и быстро адаптируемой структуре.

Сформулированные критерии выбора схемы удлинения конвейерной линии формируют теоретическую и методическую базу для дальнейшего углублённого анализа и совершенствования технических решений в области конвейерного транспорта с возможностью их применения при проектировании и реконструкции транспортных систем горных предприятий.

Заключение

Развитие транспортной системы ГДП является закономерным следствием изменения горно-геологических условий, параметров добычи полезных ископаемых и требований к эффективности производственных процессов. В отличие от традиционного подхода, рассматривающего транспортную систему преимущественно как совокупность технических средств транспортирования, в работе предложено её рассмотрение в качестве динамической организационно-технологической системы, способной к адаптации в условиях изменяющейся внешней и внутренней среды.

В результате проведённого исследования сформулированы постулаты развития транспортных систем горных предприятий, отражающие взаимосвязь между развитием горных работ, необходимостью адаптации транспортной системы, формированием её гибкости, обеспечением устойчивости функционирования и последующей интеллектуализацией процессов управления.

Установлено, что обеспечение стабильности функционирования транспортной системы достигается не сохранением неизменной структуры, а способностью системы своевременно адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. При этом ключевым механизмом адаптации выступает гибкость системы, позволяющая изменять структуру транспортных связей, перераспределять грузо-



потоки и внедрять новые технические решения без существенного снижения производительности.

Примеры реконструкции транспортных схем позволили компенсировать негативное влияние роста расстояний транспортирования, изменения объемов и направлений грузопотоков и снижения отказов отдельных элементов системы.

Установлено, что современный этап развития транспортных систем характеризуется переходом от локальной автоматизации отдельных процессов к формированию интегрированной цифровой среды управления.

Закономерным результатом данного процесса является создание цифровых двойников транспортной системы, обеспечивающих мониторинг, прогнозирование и оптимизацию режимов функционирования в режиме реального времени.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации действующих транспортных систем ГДП, а также при разработке цифровых двойников и интеллектуальных систем управления горным производством.

Список литературы / References

1. Jain A., Jain P.K., Chan F.T.S., Singh S. A review on manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*. 2013;51(19):5946–5970. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.824627>
2. Jahed A., Moghaddam R.T. Mathematical modeling for a flexible manufacturing scheduling problem in an intelligent transportation system. *Interdisciplinary Journal of Management Studies*. 2021;14(1):189–208. <https://doi.org/10.22059/ijms.2020.261618.673203>
3. Martirosyan A., Ilyushin Y., Afanaseva O., Kukharova T., Asadulagi M., Khloponina V. Development of an oil field's conceptual model. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025;38(2):381–388. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.02b.12>
4. Коптев В.Ю., Коптева А.В. Анализ предпосылок создания транспортных систем «умного» горнодобывающего предприятия. *Горная промышленность*. 2025;(1S):92–96. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-92-96>
Koptev V.Yu., Kopteva A.V. Analysis of prerequisites to create transportation systems of a smart mining enterprise. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):92–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-92-96>
5. Ediriweera A., Wiewiora A. Barriers and enablers of technology adoption in the mining industry. *Resources Policy*. 2021;73:102188. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102188>
6. Липницкий Н.А., Огородников Р.Г., Устинова Я.В. Создание имитационной модели работы подземных усреднительных складов руды рудника сложноструктурных соляных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(1):142–158. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_142
Lipnitsky N.A., Ogorodnikov R.G., Ustinova Ya.V. Simulation modeling of underground blending warehouse operation at structurally complex salt deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(1):142–158. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_142
7. Волчихина А.А., Васильева М.А. Разработка оборудования и совершенствование технологии инерционного сгущения закладочных гидросмесей на финальных этапах транспортирования. *Записки Горного института*. 2025;271:168–180. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16360> (дата обращения: 19.04.2026).
Volchikhina A.A., Vasilyeva M.A. Development of equipment and improvement of technology for inertial thickening of backfill hydraulic mixtures at the final stages of transportation. *Journal of Mining Institute*. 2025;271:168–180. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16360> (accessed: 19.04.2026).
8. Глебов А.В., Яковлев В.Л. Проектирование геотехнических комплексов карьера с обеспечением устойчивого функционирования горно-добывающего предприятия. *Записки Горного института*. 2026;279:90–97. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16786> (дата обращения: 19.04.2026).
Glebov A.V., Yakovlev V.L. Design of geotechnical complexes for open-pit mines to ensure the sustainable operation of mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2026;279:90–97. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16786> (accessed: 19.04.2026).
9. Гончаров А.С., Саклаков В.М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии. В кн.: *Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы Всерос. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 11–13 октября 2018 г.* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2018. С. 24–26.
10. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(11):1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
11. Ladj A., Wang Z., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C. A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021;58:168–179. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.018>



12. Zhukovskiy Yu., Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R. Assessment of the impact of technological development and scenario forecasting of the sustainable development of the fuel and energy complex. *Energies*. 2023;16(7):3185. <https://doi.org/10.3390/en16073185>
13. Afanasyev A.S., Egoshin A.M., Alekseev S.V. Simulation model of the organization of technological transport movement at a mining enterprise. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012008>
14. Михайлов А.В., Казаков Ю.А., Гарифуллин Д.Р., Короткова О.Ю., Агагена А. Анализ структуры мобильного комплекса для добычи органогенного сырья карьерным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6-1):317–330. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_317
Mikhailov A.V., Kazakov Yu.A., Garufullin D.R., Korotkova O.Yu., Agaguena A. Analysis of the mobile complex structure for organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6-1):317–330. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_317
15. Oke A. Linking manufacturing flexibility to innovation performance in manufacturing plants. *International Journal of Production Economics*. 2013;143(2):242–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.09.014>
16. Abbaspour H., Drebenstedt C. Truck-shovel vs. in-pit crushing and conveying systems in open pit mines: a technical evaluation for selecting the most effective transportation system by system dynamics modeling. *Logistics*. 2023;7(4):92. <https://doi.org/10.3390/logistics7040092>
17. Громов Е.В. Обоснование возможности реконструкции подземной транспортной схемы рудника при переходе на перспективные способы транспортирования руды (на примере гор. +170 м Кукисвумчоррского месторождения). *Проблемы недропользования*. 2017;(1):38–47. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.038>
Gromov E.V. Grounding the possibility of reconstruction the underground mine transport system by transition to perspective ore transportation processes (on the example of +170 m level of the Kukisvumchorsky deposit). *Problems of Subsoil Use*. 2017;(1):38–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.038>
18. Galkin V.I., Sheshko E.E., Dyachenko V.P., Sazankova E.S. The main directions of increasing the operational efficiency of high productive belt conveyors in the mining industry. *Eurasian Mining*. 2021;(2):64–68. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.14>
19. AlHayek S., Souib S., Meechang K., Medini K. Exploring agile methods application in manufacturing. In: Thüerer M., Riedel R., von Cieminski G., Romero D. (eds) *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous Environments. APMS 2024. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 732*. Cham: Springer; 2024, pp. 48–60. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71637-9_4
20. Ayuk E.T., Pedro A.M., Ekins P., Gatune J., Milligan B., Oberle B. et al. *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing extractive industries towards sustainable development*. Nairobi: International Resource Panel; 2020. 374 p.
21. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
22. Auld G., Betsill M., VanDeveer S.D. Transnational governance for mining and the mineral lifecycle. *Annual Review of Environment and Resources*. 2018;43:425–453. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030223>
23. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).
24. Petrakov D., Jafarpour H., Qajar J., Aghaei H., Hajiabadi, H. Introduction of a workflow for tomographic analysis of formation stimulation using novel nano-based encapsulated acid systems. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(2):327–333. <https://doi.org/10.5937/jaes0-29694>
25. Shklyarskiy Ya., Andreeva Iu., Sutikno T., Jopri M.H. Energy management in hybrid complexes based on wind generation and hydrogen storage. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2024;13(3):1483–1494. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i3.6757>
26. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Gurevich I. Influence of Background Voltage Distortion On Operation Of Passive Harmonic Compensation Devices. *Energies*. 2024;17(6):1342. <https://doi.org/10.3390/en17061342>
27. Бельский А.А., Емельянов Е.А. Оптимизация параметров автономного ветродизельного комплекса, эксплуатируемого на горных территориях. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2026;18(1):69–80. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-1-69-80>
Belsky A.A., Emelyanov E.A. Optimization of parameters of an autonomous wind-diesel power plant operated in mountainous areas. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026;18(1):69–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-1-69-80>



28. Труфанова И.С., Невзоров Д.Н. Применение конвейерных поездов как внешнего транспорта обогащательных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):64–78. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_64
Trufanova I.S., Nevzorov D.N. The use of conveyor trains as external transport for enrichment enterprises. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):64–78. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_64
29. Menukhova T.A., Borodina Y.V. Intelligent system for centralized freight traffic planning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;194:072008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/7/072008>
30. Menukhova T.A., Egorov S.V. Unified multimodal transport center – A tool for the development of the environmental geology of transport. *Procedia Engineering*. 2017;189:138–144. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.023>
31. Choi Y. Recent advances in smart mining technology. *Applied Sciences*. 2023;13(6):3726. <https://doi.org/10.3390/app13063726>
32. Lu Y., Liu C., Wang K.I.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020;61:101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
33. Safiullin R., Tian H. Method of effective implementation of intelligent hardware complexes in the management of passenger transportation processes within urban agglomerations. *The Open Transportation Journal*. 2024;18(1):e26671212272101. <https://doi.org/10.2174/0126671212272101231128060918>
34. Echternach-Jaubert M., Pellerin R., Gamache M. Opportunities for research to achieve the vision of the Smart Mine. *CIM Journal*. 2024;15(4):201–234. <https://doi.org/10.1080/19236026.2024.23775277>
35. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития. *Стратегии бизнеса*. 2018;(5):43–49. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2018-5-43-49>
Tarasov I.V. Industry 4.0: concept & development. *Business Strategies*. 2018;(5):43–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2018-5-43-49>

Информация об авторах

Коптев Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8353-4742>; e-mail: koptev_vyu@pers.spmi.ru

Коптева Александра Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; исполнительный директор Международного центра компетенций в горнотехническом образовании, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2697-3049>

Аристова Ольга Александровна – старший инженер горно-механического отдела дирекции по проектированию, АО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Александров Максим Алексеевич – инженер-проектировщик III категории по технологическому оборудованию, АО «А-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Information about the authors

Vladimir Yu. Koptev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8353-4742>; e-mail: koptev_vyu@pers.spmi.ru

Alexandra V. Kopteva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor, Department of Electric Power and Electromechanics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University; Executive Director, International Competence Centre for Mining Engineering Education under the auspices of UNESCO, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2697-3049>

Olga A. Aristova – Senior Engineer, Mining and Mechanical Department, Project Management Division, Polymetal Engineering JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

Maxim A. Alexandrov – Design Engineer (Category III), Process Equipment, A-Engineering JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

Article info

Received: 13.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 07.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 07.08.2026