Код МРНТИ 52.01.85

А. А. Бояндинова, *Ж. А. Адилханова

Филиал РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан)

МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КАРЬЕРОВ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В статье представлена методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на основе двухуровневого подхода и имитационного моделирования. Рассмотрены этапы укрупненной и детальной диагностики, предусматривающие оценку технико-экономических показателей, анализ отдельных звеньев технологической цепи и выявление «узких» мест. Сформирована система критериев оценки эффективности функционирования геотехнологического комплекса. Предложенная методология позволяет выявлять резервы производственной мощности, оценивать альтернативные варианты организации технологических процессов и обосновывать управленческие решения, направленные на повышение эффективности эксплуатации оборудования и транспортных коммуникаций, снижение затрат и рациональное использование производственных ресурсов.

Ключевые слова: *геотехнологический комплекс, диагностика, техническое состояние, карьер, методология, оценка, цифровые технологии.*

Карьерлердегі геотехнологиялық кешендердің техникалық жағдайын цифрлық технологиялар негізінде диагностикалау әдістемесі

Аңдатпа. Мақалада карьерлердің геотехнологиялық кешендерінің техникалық жағдайын екі деңгейлі тәсіл және имитациялық модельдеу негізінде диагностикалау әдістемесі ұсынылған. Іріленген және егжей-тегжейлі диагностика кезеңдері қарастырылған, олар техникалық-экономикалық көрсеткіштерді бағалауды, технологиялық тізбектің жеке буындарын талдауды және «тар» жерлерді анықтауды көздейді. Геотехнологиялық кешеннің қызмет тиімділігін бағалау критерийлері жүйесі қалыптастырылған. Ұсынылған әдістеме өндірістік қуаттың резервтерін анықтауға, технологиялық процестерді ұйымдастырудың балама нұсқаларын бағалауға және жабдықтар мен көлік байланыстарын пайдалану тиімділігін арттыруға, шығындарды азайтуға және өндірістік ресурстарды рационалды пайдалануға бағытталған басқарушылық шешімдер қабылдауды негіздеуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: *геотехнологиялық кешен, диагностика, техникалық жағдайы, карьер, әдістеме, бағалау, цифрлық технологиялар.*

Methodology for diagnosing the technical condition of open-pit geotechnological complexes based on digital technologies

Abstract. This article proposes a methodology for diagnosing the technical condition of geotechnological complexes in open-pit mines, based on a two-level approach and simulation modeling. It outlines stages for both high-level and detailed diagnostics, which include evaluating technical and economic performance indicators, analyzing individual components of the technological chain, and identifying operational bottlenecks. A system of criteria for assessing the efficiency of a geotechnological complex has been developed. The proposed methodology enables the identification of latent production capacity, the evaluation of alternative technological process configurations, and the substantiation of management decisions aimed at improving the operational efficiency of equipment and transport infrastructure, reducing costs, and ensuring the rational use of production resources.

Keywords: *geotechnological complex, diagnostics, technical condition, open-pit, methodology, assessment, digital technologies.*

Введение

Современное развитие открытых горных работ характеризуется повышением сложности производственных процессов открытой разработки месторождений, ростом интенсивности эксплуатации горного оборудования и увеличением требований к надежности функционирования карьеров. Это обусловливает необходимость совершенствования методов диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на основе цифровых технологий, позволяющих своевременно выявлять отклонения параметров работы оборудования, оценивать состояние взаимообусловленных и взаимозависимых подсистем и давать обоснованные управленческие решения для повышения эффективности работы комплекса.

Проведенный авторами анализ публикаций в данном направлении за последние годы показал, что проводимые исследования охватывают вопросы эксплуатационной надежности, оценки эффективности, мониторинга оборудования и оптимизации ремонтных работ и техобслуживания. Так в работах [1–2] рассмотрены вопросы математического моделирования надежности экскаваторно-автомобильных комплексов и оценки эффективности их функционирования. Авторами статьи [1] был применен системный подход к анализу взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов, в исследовании [2] предложен интегральный показатель эффективности, который базируется на совокупности эксплуатационных критериев. Несмотря на практическую значимость, следует отметить, что в данных подходах не рассматриваются вопросы диагностики технического состояния отдельных единиц оборудования. Оценка надежности комплекса не обеспечивает детального выявления неисправностей отдельных машин, а применение интегрального показателя зависит от способов нормирования и исходных параметров.

В последние годы широкое применение в горнодобывающей промышленности получили методы цифровых двойников, в частности в направлении мониторинга и анализа эксплуатационных параметров карьерных самосвалов. Так, в работах [3–4] представлены разработки цифровых двойников карьерных самосвалов, ориентированные, главным образом, на мониторинг параметров в режиме реального времени и выявление отклонений. В обзоре [5] рассматриваются существующие исследования в области цифровых двойников производственных систем. Данные исследования отражают растущий интерес к применению цифровых двойников для комплексного анализа состояния техники, повышения эффективности производственных процессов и демонстрируют потенциал объединения цифровых двойников с методами прогнозирования отказов оборудования. Однако эффективность цифровых решений зависит от полноты исходных данных, выбранных моделей и возможности их адаптации к конкретным условиям эксплуатации карьерного транспорта.

Другим активно развиваемым направлением являются оценка надежности, оптимизация эксплуатации и организация технического обслуживания карьерного транспорта. В исследовании [6] приведен сравнительный анализ методов оценки надежности карьерных автосамосвалов, по-

зволяющий обосновать выбор математических подходов к анализу отказов в работе оборудования. Авторами исследования [7] рассмотрены методы формирования парка экскаваторов и автосамосвалов с учетом условий эксплуатации. Однако данные подходы направлены на оценку надежности, оптимизацию производственных процессов и повышение эффективности технического обслуживания, а не учитывают комплексную диагностику фактического состояния отдельных единиц оборудования.

Таким образом, проведенный анализ показал, что существующие подходы к обеспечению надежности и эффективности горно-транспортных комплексов охватывают широкий спектр задач, включая моделирование производственных процессов, мониторинг технического состояния оборудования, выявление отклонений и прогнозирование отказов. Вместе с тем ни один из рассмотренных подходов не обеспечивает углубленную и комплексную диагностику горно-транспортного комплекса в целом с учетом взаимосвязей между его отдельными элементами, индивидуальных условий эксплуатации и совокупности технико-экономических показателей. Это обусловливает необходимость разработки методологии, обеспечивающей комплексную оценку состояния оборудования с учетом взаимосвязей между отдельными элементами технологической системы, которая позволит выявлять причины снижения эффективности и определять резервы повышения производительности.

Методы исследования

Основным методом исследования является метод имитационного моделирования, который позволяет учитывать индивидуальные горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации карьеров, а также воспроизводить последовательность производственных операций и взаимодействие элементов геотехнологического комплекса.

В процессе моделирования учитываются расход энергоресурсов экскаваторами и транспортными средствами, организация движения локомотивосоставов и автосамосвалов, продолжительность производственных циклов, простои оборудования, загруженность транспортных коммуникаций, текущие эксплуатационные затраты и т. п.

Для интерпретации результатов были использованы методы сравнительного и технико-экономического анализа. В качестве критериев оценки приняты производительность комплекса, удельные текущие затраты, коэффициенты использования оборудования, расход энергоресурсов, показатели загрузки транспортной инфраструктуры и целый ряд других. Это позволяет выявлять ограничивающие звенья технологической цепи и определять резервы повышения эффективности функционирования геотехнологического комплекса.

Результаты

Авторами разработана методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров. В принятом подходе диагностика состояния функционирующих геотехнологических комплексов подразделяется на два уровня. Первый уровень диагностики — укрупненная диагностика, которая включает первоначальную экономическую оценку фактического состояния действующего технологического комплекса, по результатам которой устанавливается, существует ли потенциал повышения эффективности работы горно-транспортной системы.

На втором уровне — детальная диагностика — на основе применения динамического подхода осуществляется исследование потенциальных возможностей рассматриваемой системы.

Первичная диагностика технического состояния геотехнологического комплекса представляет собой последовательный процесс выявления факторов, определяющих эффективность ее функционирования, сбора фактических данных и их сопоставления с нормативными и накопленными производственными показателями.

На первом этапе первичной диагностики устанавливаются и систематизируются все основные факторы, влияющие на работу горно-транспортной системы, такие как: горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации карьера, режим работы основного технологического оборудования, типы оборудования и степень их изношенности, организация взаимодействия горного и транспортного оборудования и передвижения транспортных средств, структура транспортных коммуникаций, качество дорожного покрытия. После этого осуществляется сбор фактических технико-экономических показателей функционирования диагностируемого горно-транспортного комплекса карьера. Данные, полученные в результате выполнения указанных действий, сравниваются с данными, содержащимися в базе знаний, содержащей как нормативные данные, так и фактические данные по различным карьерам Казахстана, которые учитывают конкретные условия эксплуатации производственных мощностей геотехнологических комплексов.

По результатам сравнительного анализа устанавливается первичный «диагноз» рассматриваемого объекта, который позволяет ответить на вопрос о диагностируемом объекте: эффективно ли работает геотехнологический комплекс и существует ли резерв повышения его эффективности.

На основе результатов первичной диагностики осуществляется детальная диагностика состояния технологических комплексов, в ходе которой определяются потенциальные возможности рассматриваемого объекта. Исследования проводятся на базе информационно-программного комплекса имитационного моделирования геотехнологической системы на основе применения динамического подхода с учетом индивидуальных особенностей каждого объекта. Принцип динамического подхода в данном случае заключается в том, что исходя из конкретных горно-геологических и горнотехнических условий функционирования рассматриваемого геотехнологического комплекса, осуществляется последовательное изменение одного из параметров (соотношение горного и транспортного оборудования, их техническое состояние и условия эксплуатации, организация движения транспортных средств и т. д.).

Первоначально осуществляется формирование исходных данных. На данном этапе осуществляется формирование исходных данных, предполагающее детальное изучение и углубленный анализ факторов, влияющих на функционирование геотехнологического комплекса карьера. Проводится сбор, систематизация и уточнение информации о горно-геологических и горнотехнических условиях

эксплуатации, техническом состоянии основного технологического оборудования, организации погрузочно-разгрузочных и транспортных процессов и характеристиках транспортных коммуникаций (карьерных дорог и схемы путевого развития). Особое внимание уделяется выявлению взаимосвязей между отдельными параметрами и процессами, определению их влияния на производительность комплекса и установлению возможных причин отклонений фактических показателей от нормативных значений. Такой подход позволяет сформировать максимально полную и достоверную информационную основу для последующих этапов диагностики.

Следующим этапом диагностики является процесс моделирования работы технологического комплекса, что позволяет оперативно и достоверно получать необходимую технико-экономическую информацию по каждому варианту предлагаемого комплекта оборудования и производить их сравнительный анализ. В качестве основной моделируемой единицы принята технологическая смена работы геотехнологического комплекса карьера. Переход от сменных моделируемых показателей к годовым с учетом остановки оборудования на ремонт, снижения производительности во время взрывов и других факторов производится из расчета, что 365 дней в году геотехнологический комплекс работает по схеме 9 + 4 + 1, т. е. из 14-ти 12-часовых смен недели комплекс работает 9 смен (4 смены в выходные дни и пять ночных смен) со 100%-й загрузкой, 4 (дневные смены в будние дни) — 65% и одну смену (в день взрыва) — 35%.

На основе полученных результатов моделирования формируется таблица технико-экономических показателей, которые принимаются в качестве основных критериев оценки текущего состояния геотехнологического комплекса карьера.

Производительность служит одним из основных критериев при диагностике состояния геотехнологических комплексов карьеров. Она определяется по следующей формуле:

$$\mathbf{П}_{год} = n_{см}\,\mathbf{П}_{см} N K,$$

где $\mathbf{П}_{год}$ — годовая производительность геотехнологического комплекса, млн. м^3;

$n_{см}$ — количество смен в сутки;

$\mathbf{П}_{см}$ — сменная производительность геотехнологического комплекса, тыс. м^3 (принимается равной объему руды (горной массы), выгруженной по всем пунктам разгрузки за смену);

N — количество дней в рассматриваемом периоде;

K — коэффициент перевода сменных показателей в показатели за период [8].

Далее с учетом технологических простоев устанавливаются фактические (в каждой конкретной ситуации) показатели производственной мощности геотехнологического комплекса и коэффициент ее реализации. Аналогичные показатели устанавливаются и относительно основных технологических звеньев цепи на этапах погрузки, транспортирования и разгрузки горной массы [9].

В данном случае подразумевается, что должна быть обеспечена одинаковая производительность отдельных звеньев геотехнологического комплекса. Именно тогда достигается максимальная согласованность работы технологического комплекса в целом.

При определении коэффициента использования производственной мощности предприятия используется классический метод. Однако исходными данными для расчетов служат сменные показатели, являющиеся результатом имитационного моделирования. При необходимости по специальной методике также возможны переходы к аналогичным показателям за любой рассматриваемый период.

Основным критерием оценки эффективности работы геотехнологического комплекса принимается показатель удельных текущих затрат на 1 м^3 горной массы. При оценке же работы основного технологического оборудования в качестве основного критерия принимаются коэффициенты использования оборудования. Однако, так как коэффициент использования экскаваторов зависит от времени их работы, существенное влияние на которое оказывает длина обменного тупика, которая в свою очередь зависит от протяженности погрузочного тупика, то в качестве дополнительного критерия при диагностике работы экскаваторного парка был принят коэффициент загруженности погрузочных участков. Рациональное значение данных коэффициентов устанавливается согласно методике нормирования работы горно-транспортного оборудования [8].

Другим важным и системным показателем при диагностике состояния экскаваторного парка является удельный объем горной массы, приходящийся на 1 м^3 ковша. Данный показатель с наибольшей степенью достоверности показывает степень загруженности горного оборудования, что не в полной мере отражается с помощью двух предыдущих коэффициентов.

Для примера в таблице приведены основные критерии диагностики по одному из звеньев технологической цепи – локомотивосоставам.

Таблица 1

Основные технико-экономические показатели диагностики технического состояния локомотивосоставов

Кесте 1

Локомотив құрамдарының техникалық жай-күйін диагностикалаудың негізгі техникалық-экономикалық көрсеткіштері

Table 1

Key technical and economic indicators for the diagnostics of the technical condition of locomotive-hauled trains

Наименование показателя
Коэффициент использования подвижного состава
Средневзвешенное расстояние транспортирования
Средневзвешенная высота подъема
Удельный расход электроэнергии локомотивосоставами
Коэффициент ожидания погрузки из-за занятости экскаваторов
Коэффициент технической готовности подвижного состава
Коэффициент внеплановых простоев оборудования
Диаграмма интервалов движения поездов

При диагностике состояния парков автомобильных и железнодорожных транспортных средств в качестве дополнительных критериев были рассмотрены удельный расход электроэнергии, топлива и шин, а также средневзвешенное расстояние транспортирования и средневзвешенная высота подъема.

В качестве критериев эффективности использования схемы путевого развития (СПР) при диагностике были приняты показатели удельной загрузки СПР по времени и по объемам перевезенной горной массы. Однако показатель удельной загрузки по объемам перевезенной горной массы при сравнении двух различных карьеров может быть однозначно справедлив только при одних и тех же физико-механических свойствах перевозимых пород. Анализ загруженности участков схем путевого развития карьеров по времени при заданной организации процессов взаимодействия горного и транспортного оборудования позволяет рассмотреть, если есть, существующий резерв загрузки схемы путевого развития, а также неоправданно завышенный потенциал излишних путей, которые могут быть разобраны без ущерба эффективности горно-транспортной системы в целом. Относительно показателей использования автотрассы в качестве основного критерия был принят удельный объем горной массы, приходящийся на 1 км автотрассы.

Характерным признаком высокой эффективности работы геотехнологического комплекса являются рациональное соотношение горного и транспортного оборудования и равномерность загрузки входящих в нее отдельных единиц оборудования в единицу времени работы. Поэтому при детальной диагностике технического состояния геотехнологический комплекс в целом рассматривается при рациональном экономически целесообразном соотношении основного технологического оборудования и по эффективности работы отдельных элементов системы (экскаваторы, локомотивосоставы, автосамосвалы, автотрассы, железнодорожные пути, конвейерные ленты). Существенным положительным фактором является то, что каждый экскаватор, локомотивосостав, автосамосвал, участок схемы путевого развития, автодороги или конвейерной ленты рассматриваются как индивидуально, так и по подсистемам. Возможности информационно-программного комплекса имитационного моделирования позволяют по каждому участку определять расход электроэнергии, число составов, прошедших по участку, время занятости участка составом и степень его загруженности во времени, объем горной массы, перевезенной по участку, количество и продолжительность простоев составов на участке, а также производить анализ интервалов движения поездов, анализ наиболее загруженных участков и оценку пропускной способности.

Установление экономически целесообразной производственной мощности геотехнологического комплекса позволяет значительно сократить капитальные вложения и текущие расходы, снизить себестоимость производства продукции, достичь высоких показателей по объему и качеству продукции при минимальных издержках производства, что и является одной из основных задач горнодобывающего предприятия.

Вследствие этого одним из основных этапов диагностики является анализ производственной мощности геотехнологического комплекса по звеньям технологической цепи и оценка степени ее фактической реализации в конкретных условиях функционирования системы. Фактические показатели использования производственной мощности сравниваются с максимально возможными показателями производственной мощности предприятия и между собой, формируемой в рамках каждого из оцениваемых вариантов. В ней отражены показатели фактической производственной мощности по руде, по горной массе и реально достижимой, технологически обусловленной производственной мощности всех звеньев технологической цепи. В результате сравнительного анализа выявляются экономически необоснованные диспропорции в системе по производственной мощности и у каждого технологического звена устанавливается, имеется ли неиспользованный потенциал.

Максимально возможная производственная мощность экскаваторно-железнодорожной или экскаваторно-автомобильной системы карьера устанавливается как минимальная максимально возможная мощность одного из звеньев рассматриваемой системы, которая и является «узким» местом в работе геотехнологического комплекса. Далее осуществляется детальная диагностика выявленной подсистемы, в качестве которой может выступать каждая из пяти основных элементов геотехнологического комплекса — горное оборудование, железнодорожный или автомобильный транспорт, автотрасса или схема путевого развития/конвейерная лента. Так в результате детальной диагностики пользователь имеет возможность получить следующую информацию по каждому локомотивосоставу: число рейсов за моделируемый период, время нахождения состава под погрузкой и на разгрузке, время движения и пробег локомотивосостава, объем вывезенной горной массы, количество и продолжительность простоев, коэффициент использования рабочего времени, расход электроэнергии (дизельного топлива). Получение столь же полной информации возможно по всем остальным элементам геотехнологического комплекса.

В результате проведения детальной диагностики устанавливается «диагноз» исследуемого технологического комплекса с учетом его характерных особенностей, осуществляется прогноз последствий и осложнений, а также выявление резервов существующих производственных мощностей.

Результаты диагностики и имитационного моделирования служат основой для принятия обоснованных управленческих решений, направленных на повышение эффективности функционирования геотехнологического комплекса [10]. На основе выявленных отклонений и производственных резервов определяются мероприятия по оптимизации качественного и количественного состава оборудования, совершенствованию организации технологических процессов, снижению эксплуатационных затрат и устранению «узких» мест отдельных звеньев технологической цепи. Сравнение альтернативных сценариев позволяет выбрать наиболее экономически целесообразные решения с учетом конкретных условий эксплуатации карьера.

Обсуждение результатов

Предложенная методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров основана на двухуровневом подходе, который включает укрупненную оценку эффективности функционирования геотехнологического комплекса и детальную диагностику, выявление «узких» мест и оценку потенциальных резервов повышения эффективности.

Использование системы взаимодополняющих технико-экономических критериев позволяет комплексно оценивать производительность, удельные затраты, коэффициенты использования оборудования и загруженность транспортных коммуникаций. Это обеспечивает выявление диспропорций между отдельными звеньями технологической цепи и определение элементов, ограничивающих производственную мощность комплекса.

К примеру, результаты диагностики показывают, что если удельный расход топлива превышает контрольные цифры на карьерах с аналогичными горно-геологическими и горнотехническими условиями (объем извлекаемой горной массы, средневзвешенные высота подъема и расстояние транспортирования), то подобный перерасход может быть связан либо с нерациональными условиями эксплуатации автотранспорта (дорожное покрытие не соответствует парку имеющихся транспортных средств — не удовлетворяет или превосходит по своему качеству, неоптимальный режим работы оборудования и т. д.), либо топливо просто сливается водителями.

Применение динамического подхода и имитационного моделирования позволяет исследовать различные варианты организации производственных процессов, оценивать влияние изменения параметров оборудования и условий эксплуатации на итоговые показатели работы системы. Это обеспечивает возможность выявления производственных резервов, определения экономически целесообразных направлений оптимизации работы геотехнологического комплекса в целом и отдельных звеньев технологической цепи, а также научного обоснования управленческих решений, направленных на повышение эффективности производства и рациональное использование имеющихся ресурсов.

Заключение

Таким образом, разработана методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на основе имитационного моделирования. Предложенный подход обеспечивает оперативную и обоснованную оценку состояния комплексов с учетом наличия и характера проявления индивидуальных горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации, позволяя проводить как экспресс-анализ, так и детальное исследование отдельных звеньев технологической цепи, определения «узких» мест и оценки потенциальных возможностей производственной системы.

Практическая значимость методологии заключается в возможности использования результатов диагностики для обоснования управленческих решений, снижение удельных текущих затрат, оптимизации производственных мощностей и совершенствования процессов планирования и управления горным производством. Применение имитационного моделирования позволяет осуществлять оценку альтернативных вариантов функционирования комплекса и выбирать наиболее целесообразные направления повышения эффективности эксплуатации оборудования и транспортных коммуникаций.

Перспективы дальнейшего развития методологии связаны с совершенствованием методов прогнозирования состояния геотехнологических комплексов, обоснованием профилактических и «оздоровительных» мероприятий, а также расширением возможностей ее применения при оценке перспектив развития горнодобывающих предприятий.

Благодарность

Данная статья финансировалась Комитетом промышленности Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан по ПЦФ BR23991563 «Создание инновационных ресурсосберегающих технологий добычи и комплексной переработки минерального и техногенного сырья».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Оценка эксплуатационной надежности карьерных комплексов «экскаватор — автосамосвал» // Journal of Mining Institute. – 2020. – Т. 241. – С. 10–21 (на английском языке)*
2. *Park S., Jung D., Choi Y. Новый комплексный ключевой показатель эффективности для оценки систем транспортировки на карьерах: применение стандартов GMG // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Т. 16. – Вып. 10. – Ст. 103589 (на английском языке)*
3. *Elbazi N., Tigami A., Laayati O., Maghraoui A. E., Chebak A., Mabrouki M. Мониторинг карьерных самосвалов на основе технологии «цифровых двойников» с интеграцией экспертной системы: пример исследования на экспериментальном карьере // 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). – Невшехир, Турция, 2023. – С. 168–174 (на английском языке)*
4. *Plavšić J., Mišković I. Цифровой двойник на основе технологий виртуальной реальности для удаленного мониторинга горнодобывающего оборудования: архитектура и практический пример // Virtual Reality & Intelligent Hardwar. – 2024. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 100–112 (на английском языке)*
5. *Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R. S. Исследование систем «цифровых двойников» на горнодобывающих предприятиях: обзор // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 474–492 (на английском языке)*

6. *Moniri-Morad A., Sattarvand J. Сравнительное исследование методов оценки надежности систем: на примере карьерных самосвалов // Journal of Engineering and Applied Science. – 2023. – Т. 70. – Ст. 103 (на английском языке)*
7. *Botyan E., Pushkarev A. Совершенствование методики выбора моделей техники для формирования парка экскаваторов и транспортных средств при модернизации горно-транспортной системы с учетом арктической специфики // Transportation Research Procedia. –2021. – Т. 57. – Вып. 7. – С. 106–112 (на английском языке)*
8. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Информационное обеспечение системы управления технологическими процессами на открытых карьерах // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020. – Албена, Болгария, 2020. – С. 441–448 (на английском языке)*
9. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А., Ткаченко О. Н. Методическое обеспечение корпоративного оперативного планирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса на базе имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12–2. – С. 71–83 (на русском языке)*
10. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А. Ключевые показатели проектных управленческих решений для устойчивого функционирования геотехнологических комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2–1. – С. 182–196 (на русском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Карьерлік экскаватор-самосвал кешендерінің пайдалану сенімділігін бағалау // Journal of Mining Institute. – 2020. – Т. 241. – Б. 10–21 (ағылшын тілінде)*
2. *Park S., Jung D., Choi Y. Ашық кеніштердегі тасымалдау жүйелерін бағалауға арналған жаңа кешенді негізгі өнімділік көрсеткіші: GMG стандарттарын қолдану // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Т. 16. – Шығ. 10. – 103589 (ағылшын тілінде)*
3. *Elbazi N., Tigami A., Laayati O., Maghraoui A. E., Chebak A., Mabrouki M. Сараптамалық жүйемен біріктірілген «цифрлық егіз» технологиясына негізделген карьерлік самосвалдарды мониторингтеу: тәжірибелік карьер мысалында // 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). – Невшехир, Түркия, 2023. – Б. 168–174 (ағылшын тілінде)*
4. *Plavšić J., Mišković I. Тау-кен жабдықтарын қашықтан бақылауға арналған VR негізіндегі цифрлық егіз: архитектура және нақты мысал // Virtual Reality & Intelligent Hardwar. – 2024. – Т. 6. – Шығ. 2. – Б. 100–112 (ағылшын тілінде)*
5. *Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R. S. Тау-кен өндірісіндегі цифрлық егіз жүйелерін зерттеу: шолу // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Т. 1. – Шығ. 4. – Б. 474–492 (ағылшын тілінде)*
6. *Moniri-Morad A., Sattarvand J. Жүйе сенімділігін бағалау әдістерін салыстырмалы зерттеу: тау-кен өндірісіндегі самосвалдар мысалында // Journal of Engineering and Applied Science. – 2023. – Т. 70. – 103 (ағылшын тілінде)*
7. *Botyan E., Pushkarev A. Тау-кен көлік жүйесін жаңғырту барысында экскаваторлар мен көлік құралдары паркін қалыптастыру үшін техника үлгілерін таңдау әдістемесін, Арктиканың ерекшеліктерін ескере отырып, жетілдіру // Transportation Research Procedia. – 2021. – Т. 57. – Шығ. 7. – Б. 106–112 (ағылшын тілінде)*
8. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Ашық карьерлердегі технологиялық үдерістерді басқару жүйесін ақпараттық қамтамасыз ету // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM 2020. – Албена, Болгария, 2020. – Б. 441–448 (ағылшын тілінде)*
9. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А., Ткаченко О. Н. Имитациялық модельдеуге негізделген экскаватор-көлік-конвейер кешенінің жұмысының корпоративті оперативтік жоспарлауын әдістемелік қамтамасыз ету // Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетень. – 2025. – № 12–2. – Б. 71–83 (орыс тілінде)*
10. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А. Геотехнологиялық кешендердің тұрақты жұмыс істеуі үшін жобалық басқару шешімдерінің негізгі көрсеткіштері // Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетень. – 2026. – № 2–1. – Б. 182–196 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. *Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 241. – P. 10–21 (in English)*
2. *Park S., Jung D., Choi Y. A novel integrated key performance indicator for evaluating open-pit mine haulage systems: application of GMG standards // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Vol. 16. – Issue 10. – Article 103589 (in English)*

3. *Elbazi N., Tigami A., Laayati O., Maghraoui A. E., Chebak A., Mabrouki M. Digital Twin-Enabled Monitoring of Mining Haul Trucks with Expert System Integration: A Case Study in an Experimental Open-Pit Mine // 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). – Nevsehir, Turkey, 2023. – P. 168–174 (in English)*
4. *Plavšić J., Mišković I. VR-based digital twin for remote monitoring of mining equipment: Architecture and a case study // Virtual Reality & Intelligent Hardware. – 2024. – Vol. 6. – Issue 2. – P. 100–112 (in English).*
5. *Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R. S. Exploring digital twin systems in mining operations: A review // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Vol. 1. – Issue 4. – P. 474–492 (in English)*
6. *Moniri-Morad A., Sattarvand J. A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks // Journal of Engineering and Applied Science. – 2023. – Vol. 70. – Article 103 (in English)*
7. *Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 57. – Issue 7. – P. 106–112 (in English)*
8. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. An Information Support for Management System of Technological Processes at Open Pits // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM 2020. – Albena, Bulgaria, 2020. – P. 441–448 (in English)*
9. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Zh. A., Tkachenko O. N. Metodicheskoe obespechenie korporativnogo operativnogo planirovanija raboty jekskavatorno-avtomobil'no-konvejernogo kompleksa na baze imitacionnogo modelirovanija [Methodical support for corporate operational planning of an excavator-truck-conveyor complex based on simulation modeling]. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. – 2025. – No. 12–2. – P. 71–83 (in Russian)*
10. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Kljuchevye pokazateli proektnyh upravlencheskih reshenij dlja ustojchivogo funkcionirovanija geotehnologicheskih kompleksov [Key performance indicators of project management decisions for sustainable operation of geotechnological complexes]. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. – 2026. – No. 2–1. – P. 182–196 (in Russian)*

Сведения об авторах:
Бояндинова А. А., д. т. н., доцент, ученый секретарь Филиала РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан), *A.Boyandinova@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0001-5197-4599
Адилханова Ж. А., к. т. н., гл. научный сотрудник Филиала РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан*), Zhanna_mark10@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-2637-4006

Авторлар туралы мәліметтер:
Бояндинова Ә. Ә., т. ғ. д., доцент, «ҚР ҰК МҚК» РМК «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының ғылыми хатшысы (Алматы қ., Қазақстан)
Әділханова Ж. А., т. ғ. к., «ҚР ҰК МҚК» РМК «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының бас ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Boyandinova A. A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Secretary of the «Institute of Mining named after D. A. Kunayev» Branch of the «NC CPMS RK» RSE (Almaty, Kazakhstan)
Adilkhanova Zh. A., Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher of the «Institute of Mining named after D. A. Kunayev» Branch of the «NC CPMS RK» RSE (Алматы қ., Қазақстан)