

УДК 622.68: 622.012.32

**Журавлев Артем Геннадиевич**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [juravlev@igduran.ru](mailto:juravlev@igduran.ru)

**Бахтурин Юрий Алексеевич**

кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [bakh2008@yandex.ru](mailto:bakh2008@yandex.ru)

**Берсенева Виктор Анатольевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [v.a.bersenev@igduran.ru](mailto:v.a.bersenev@igduran.ru)

**Семенкин Александр Владимирович**

младший научный сотрудник  
лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [semenkin@igduran.ru](mailto:semenkin@igduran.ru)

**Черепанов Владимир Александрович**

научный сотрудник  
лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [transport@igduran.ru](mailto:transport@igduran.ru)

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ АДАПТАЦИИ ГОРНО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ\*****Аннотация:**

Приведены результаты исследования методов и этапов переходного процесса адаптации транспортных систем карьеров к изменяющимся условиям разработки сложноструктурных глубокозалегающих месторождений как концептуальной основы стратегии и прогноза их развития. С применением модели с интерактивным вмешательством в организацию транспортного процесса решены задачи по параметрической адаптации горнотранспортных систем при различных сочетаниях основного технологи-

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.117

**Zhuravlev Artem G.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of Laboratory of Open Pit Transport Systems and Geotechnics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [juravlev@igduran.ru](mailto:juravlev@igduran.ru)

**Bakhturin Yuriy A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Leading Researcher,  
Laboratory of Open Pit Transport Systems and Geotechnics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [bakh2008@yandex.ru](mailto:bakh2008@yandex.ru)

**Bersenev Viktor A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of Open Pit Transport Systems and Geotechnics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [v.a.bersenev@igduran.ru](mailto:v.a.bersenev@igduran.ru)

**Semenkin Alexander V.**

Junior Researcher,  
Laboratory of Open Pit Transport Systems and Geotechnics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [semenkin92@mail.ru](mailto:semenkin92@mail.ru)

**Cherepanov Vladimir A.**

Researcher of Laboratory of Open Pit Transport Systems and Geotechnics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [transport@igduran.ru](mailto:transport@igduran.ru)

**SUBSTANTIATION OF ADAPTATION METHODS OF MINING-TRANSPORT SYSTEMS TO CHANGING CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF COMPLEX DEEP-LYING DEPOSITS****Abstract:**

The paper shows the study results of methods and stages of the transition process of adapting the quarry transport systems to changing conditions of complex deep-lying deposits development as a conceptual basis for the strategy and the situation forecasting of their development. Using the model with interactive intervention in the organization of the transport process, the problems of parametric adaptation of mining transport systems with different combinations of basic technological equipment in specific mining conditions of the JSC "Uralasbest" open-pit mine have found their solutions. In order to

\* Статья подготовлена с использованием результатов исследований по конкурсному проекту фундаментальных исследований УрО РАН № 18-5-5-10

ческого оборудования в конкретных горнотехнических условиях карьера ОАО «Ураласбест». В целях совершенствования методической базы оценки адаптации транспортных систем карьеров с учетом современных подходов к технико-экономическому обоснованию проектов разработана методика технико-экономического сравнения современных и перспективных видов карьерного транспорта и алгоритм сравнения различных видов транспорта, позволяющий повысить точность и достоверность результатов сравнения по видам транспорта, определять предпочтительные условия их применения по зонам карьера. Использование усовершенствованной методики технико-экономического сравнения видов транспорта и инновационных решений в области геотехнологии позволило установить, что на карьерах, вновь разрабатывающих сложноструктурные глубокозалегающие месторождения полезных ископаемых, циклично-поточную технологию с автомобильно-конвейерным транспортированием руды целесообразно вводить с самого начала ее добычи.

*Ключевые слова:* переходный процесс, сложноструктурные глубокозалегающие месторождения, адаптация, оптимизация, транспортная система карьера, универсальная интерактивная имитационная модель, технико-экономическое сравнение

*improve the methodological basis to assess the adaptation of transport systems of quarries with modern approaches to the feasibility study of projects, we have developed a technique of technical and economic comparison of modern and promising types of quarry transport and an algorithm for comparing different types of transport, which allows to increase the accuracy and reliability of the results of comparison by means of transport, to determine the preferred conditions for their use in the quarry zones. The use of improved methods of technical and economic comparison of modes of transport and innovative solutions in the field of geotechnology allowed us to establish that in the quarries, where complex deep-seated deposits of minerals are being developed, it is advisable to implement cyclic-flow technology with road-conveyor transportation of ore from the very beginning of its production.*

*Key words:* transition process, complex deep deposit, adaptation, optimization, quarry transportation system, universal interactive simulation model, technical and economic comparison

## Введение

Транспортирование горной массы представляет один из основных и наиболее трудоемких процессов открытых горных работ. По мере роста глубины карьеров доля затрат на карьерный транспорт доходит до 55 % и более в общих затратах на добычу полезного ископаемого. Транспортная составляющая оказывает значительное влияние на решение основных научных и проектных задач. Исследования в области карьерного транспорта проводились во многих научных и учебных институтах. При этом общепризнанным центром таких исследований в конце 50-х - начале 60-х годов 20-го века стал ИГД УФАИ СССР, переведенный с 1963 г. в Минчермет СССР (ИГД МЧМ СССР), а с 1994 г. вернувшийся в Российскую академию наук (ИГД УрО РАН) [1]. Созданная проф. М.В. Васильевым и впоследствии руководимая член-корр. В.Л. Яковлевым Уральская научная школа карьерного транспорта получила развитие в исследованиях практически всех основных аспектов проблем карьерного транспорта:

- разработки научных основ проектирования и эксплуатации автомобильного транспорта;
- создания научных основ применения конвейерного транспорта, в том числе с крутонаклонным подъемом горной массы;
- создания научных основ применения железнодорожного транспорта, в том числе с повышенными уклонами путей;
- обоснования параметров и областей применения технологических комбинированных и специальных видов транспорта;
- разработки общей теории формирования транспортных систем глубоких карьеров и методики выбора видов карьерного транспорта.

В ряде основополагающих работ, посвященных вопросам формирования транспортных систем карьеров (ТСК), член-корр. РАН В.Л. Яковлев показал, что содержательную основу их эволюции составляет адаптация «сложной социально-экономической системы, какой является горнодобывающее предприятие, к воздействиям внешней среды» [1 – 3]. Являясь переходным процессом, адаптация определяет эволюцию ТСК в историческом плане (научно-технический прогресс) и за период жизненного цикла отдельного предприятия, а любой признак организации переходных процессов является адаптивным.

Адаптацию как переходный процесс в ТСК [4] предлагается определить как их реакцию на изменение природных, технологических, технических, экологических, экономических, финансовых и социальных факторов, что выражается в тенденции установления приемлемого уровня функционирования систем. Под приемлемым понимается такой уровень, который обеспечивает динамическое равновесие показателей функционирования транспортных систем и внешней среды. Вопросам методологического и методического обеспечения адаптации (адаптивного управления) технических систем применительно к изменяющимся условиям, в которых реализуются те или иные процессы, уделяется повышенное внимание исследователей.

Исследования в этой области могут быть самого общего методологического плана [5 – 10] и непосредственно таких, которые касаются параметрической адаптации транспортно-логистических систем [11 – 13]. Вопросам методологического и методического обеспечения адаптации (адаптивного управления) ТСК применительно к изменяющимся горно-геологическим, горнотехническим и горно-технологическим условиям уделяется повышенное внимание в ИГД УрО РАН. В последние годы в Лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники велись исследования в соответствии с актуальными задачами развития горнодобывающих предприятий и планами исследований, утвержденными Российской академией наук: «Исследование адаптационных резервов сложных транспортных систем глубоких карьеров», «Теоретическая интерпретация адаптационного формирования транспортных систем глубоких карьеров», «Разработка научных основ формирования транспортных систем карьеров», «Создание моделей процессов транспортирования горной массы с целью обоснования перспективных параметров транспортных систем», «Совершенствование методологии адаптации технических и технологических параметров ТСК на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях», «Разработка современной методики обоснования параметров транспортных систем карьеров, учитывающей возможность трансформации транспортной системы карьера по мере его развития, и переходные процессы, происходящие при трансформациях» и др.

#### *Основная часть*

Адаптация как процесс приспособления системы управления к специфическим свойствам объекта и окружающей среды имеет несколько иерархических уровней, соответствующих различным этапам управления сложным объектом:

1. Параметрическая адаптация. Связана с регулированием параметров элементов системы без изменения их структуры. Относится, как правило, к краткосрочному временному интервалу.

2. Структурная адаптация осуществляется путем изменения структуры системы. Относится, как правило, к долгосрочной перспективе с малой частотой адаптаций.

3. Структурно-параметрическая адаптация. Включает в себя элементы, соответственно, структурной и параметрической адаптации.

В основе структурно-параметрической адаптации ТСК лежит теория последовательного формирования транспортных систем глубоких карьеров в течение срока службы, созданная под руководством член-корр. В.Л. Яковлева [2, 3]. Вместе с тем с момента создания теории при незыблемости основных заложенных в ней принципов

произошли существенные изменения во влиянии факторов их развития, вызванные переходом экономики РФ на рыночные отношения, глобализацией, значительным влиянием на развитие горнорудного производства макроэкономических факторов, совершенствованием средств карьерного транспорта (главным образом, автомобильного) и т.д. Это определяет необходимость обоснования стратегии комплексного освоения и создания ресурсосберегающих инновационных технологий разработки сложноструктурных глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых, совершенствования методической базы оценки ТСК, в том числе методики технико-экономического сравнения видов транспорта, инновационное развитие технологии горных работ, в том числе и безлюдных, развитие новых и специальных видов транспорта.

Теоретико-методическая цель исследований состоит в обеспечении возможности определения поведения и прогнозирования развития горно-транспортной системы, основу чему может составить моделирование в различных видах. Ядром параметрической адаптации ТСК является разработанная в ИГД УрО РАН универсальная интерактивная имитационная модель функционирования сложных горно-транспортных систем карьеров, позволяющая решать широкий круг задач горнорудного производства [14 – 16]. Моделирование заключается в дискретном воспроизведении (шаг дискретизации 1 с) процесса функционирования горно-транспортной системы карьера. Универсальность модели заключается в следующем:

1. Модель разработана для всех основных видов карьерного транспорта и для их сочетаний (автомобильного, железнодорожного, конвейерного, автомобильно-железнодорожного, автомобильно-конвейерно-железнодорожного).

2. Модель может использоваться как для оптимизации параметров транспортных систем карьеров, так и для принятия рациональных решений, которые вырабатываются за счет обеспечения оператора достаточно развитой для этих целей логикой и интерактивного вмешательства в организацию транспортного процесса.

3. Поскольку модель дискретно воспроизводит горно-транспортный процесс и не ориентирована на решение определенного класса задач, она является универсальной и может использоваться при обосновании самых различных параметров ТСК на основе методов планирования экспериментов.

Моделирование осуществляется как в автоматическом режиме по заданным заранее принципам управления, так и в ручном, когда интерактивно принимаются решения о распределении грузопотоков в любой момент времени. Есть возможность добавлять алгоритмы поведения элементов системы для тех или иных специфических задач.

В вопросах имитационного моделирования транспортных процессов можно выделить 2 класса задач. Один связан с оптимизацией какого-либо параметра процесса, а другой – с обеспечением достижения цели при условии бесконфликтного протекания процесса. В первом случае на основе априорной информации или эксперимента можно решать задачу оптимизации. Во втором – процессы развиваются в условиях неопределенности, что не позволяет решать задачу оптимизации процесса. Это требует наличия логики поведения, которая позволила бы оперативно реагировать на возникающие возмущения и принимать такие решения, которые, с одной стороны, дают возможность достижения цели, с другой – позволяют гарантировать бесконфликтное развитие процесса и добиться более совершенного его протекания [13]. Модель реализована для решения задач обоих классов. Примеры оптимизационных задач:

1. Определение рациональных режимов отгрузки горной массы со склада конвейерно-железнодорожного комплекса для условий Джетыгаринского карьера.

2. Оптимизация параметров перегрузочных складов при автомобильно-конвейерно-железнодорожном транспорте.

3. Обоснование пропускной (провозной) способности схем путевого развития карьерного железнодорожного транспорта карьеров Качканарского ГОКа.

#### 4. Обоснование параметров магистрального и карьерного автомобильного транспорта для АК АЛРОСА.

Остановимся подробнее на применении модели с интерактивным вмешательством в организацию транспортного процесса. Такой подход позволил, например, решить задачу по определению сменной производительности сложных горно-транспортных систем при различных сочетаниях основного технологического оборудования в конкретных горнотехнических условиях карьера ОАО «Ураласбест» [15]. На рис. 1 приведен фрагмент схемы путевого развития железнодорожного звена транспортной системы с разделением на участки. Ввиду сложности и разветвленности транспортной системы решение вопросов точного прогнозирования производительности, рационального распределения железнодорожных составов по сети и других смежных задач методами детерминированных вычислений потребует сложных математических моделей без гарантии точного учета всех особенностей функционирования системы. С применением же имитационного моделирования проблема решается относительно просто с хорошим уровнем достоверности.

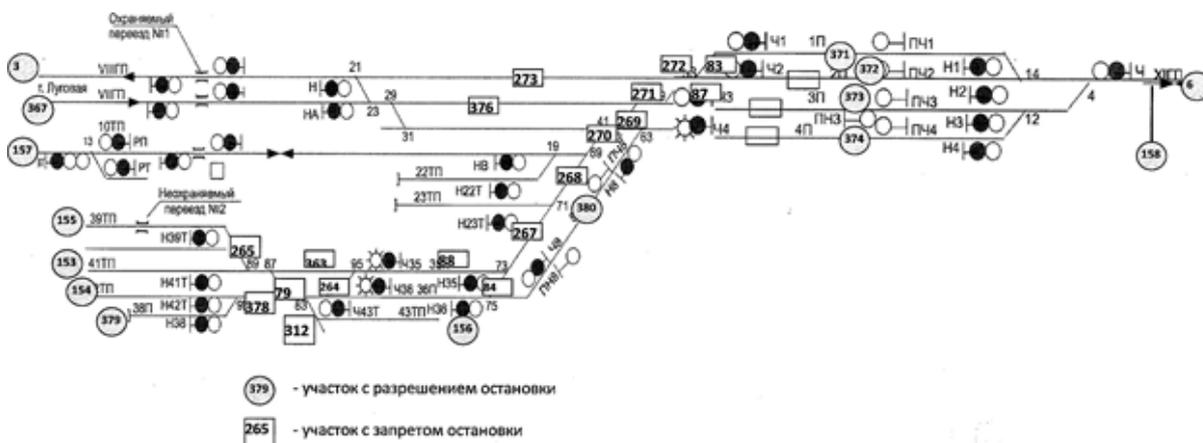
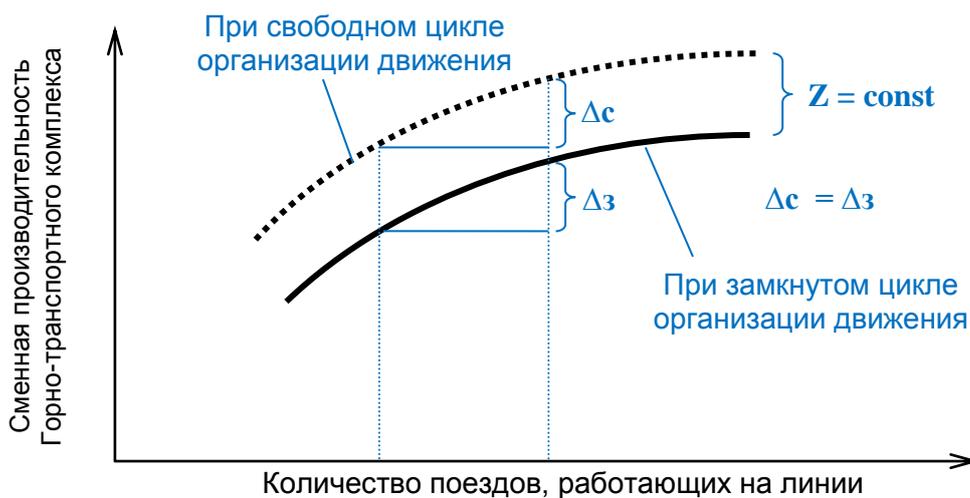


Рис. 1 – Графическое представление схемы путевого развития станции с разделением на участки

Проведенные исследования выявили зависимости сменных объемов перевозок по видам горной массы от количества поездов в работе для различных вариантов размещения и числа мест погрузки и разгрузки как для свободного, так и замкнутого циклов организации работы железнодорожного транспорта. Результаты позволили ОАО «Ураласбест» усовершенствовать систему планирования работы железнодорожного транспорта, оптимизировав расходы с учетом суточных планов по вывозке горной массы.

Дальнейшие исследования по обобщению данных решения аналогичных задач показали, что кривые зависимости объемов перевозок от количества поездов в работе эквидистантны в диапазонах значений сменной производительности (рис. 2). Следовательно, соответствующие значения сменных объемов перевозки горной массы для свободного и замкнутого циклов организации работы железнодорожного транспорта равноудалены, что позволяет еще упростить решение задачи оперативного планирования. Это означает, что определять сменные объемы перевозки горной массы для свободного цикла можно с высокой достоверностью по результатам моделирования для замкнутого цикла организации работы железнодорожного транспорта.

Данный факт существенно упрощает оперативное планирование для горнодобывающих предприятий на практике, так как позволяет определять требуемое количество поездов по видам горной массы отдельно в соответствии с плановыми заданиями – для перевозки руды, породы, скальной горной массы, пыльных отходов.



*Замкнутый цикл организации движения – схема, при которой поезда закрепляются на определенных маршрутах для перевозки определенного типа горной массы (например, руда богатая или пыль с ДОФ и т.п.)*

Рис. 2 – Закономерности изменения сменной производительности поездов для сложных разветвленных схем карьерного железнодорожного транспорта

Следующим важным звеном методов адаптации горно-транспортных систем являются методики технико-экономического сравнения. В целях совершенствования методической базы оценки ТСК разработана методика технико-экономического сравнения современных и перспективных видов карьерного транспорта (укрупненно алгоритм представлен на рис. 3). Ее особенность состоит в возможности с высокой точностью прогнозировать технологические и технико-экономические параметры перспективных видов транспорта (даже таких, опыт применения которых отсутствует или является ограниченным). Ядром методики является адаптивная экономико-математическая модель горнотранспортной системы карьера, которая может подстраиваться под имеющийся перечень исходных данных и требуемые выходные показатели. Недостающие данные рассчитываются по смежным данным, неизвестные технологические и эксплуатационные параметры функционирования системы определяются на основе имитационного моделирования [16]. Методика позволяет решать как прямые (расчет технико-экономических показателей транспорта в заданных горнотехнических условиях), так и обратные задачи (например, обоснование областей эффективного применения тех или иных видов транспорта).

В качестве базовых основ в методике технико-экономического сравнения заложены принципы, сформулированные в фундаментальной работе В.Л. Яковлева [2]:

1. Сравнение должно проводиться в идентичных горнотехнических условиях.
2. Сравнение необходимо проводить не по нескольким вариантам, а осуществлять многовариантное сравнение в выбранном диапазоне горнотехнических условий.
3. Техничко-экономические показатели сравниваемых видов транспорта определяются не для средних условий транспортирования, а дифференцированно по зонам карьера.
4. При выборе наиболее выгодного варианта транспорта критерий оценки сравнительной эффективности должен учитывать показатели технологического процесса добычи, транспортировки и переработки полезных ископаемых в целом.

При этом в качестве критерия оптимальности может быть принят минимум затрат (капитальных и эксплуатационных) за период оптимизации при учете тождественности

эффекта по вариантам, минимум дисконтированных затрат (при отсутствии данных или излишней для данной задачи трудоемкости расчета доходной части) или максимум чистого дисконтированного дохода (ЧДД). С учетом современных подходов к технико-экономическому обоснованию проектов в качестве критериев сравнения используются как отдельные показатели (капитальные и эксплуатационные затраты), так и интегральные – дисконтированные затраты за период оценки. Также применяются удельные показатели: себестоимость транспортирования (руб./ткм), суммарные затраты на 1 т перевезенной горной массы и др.

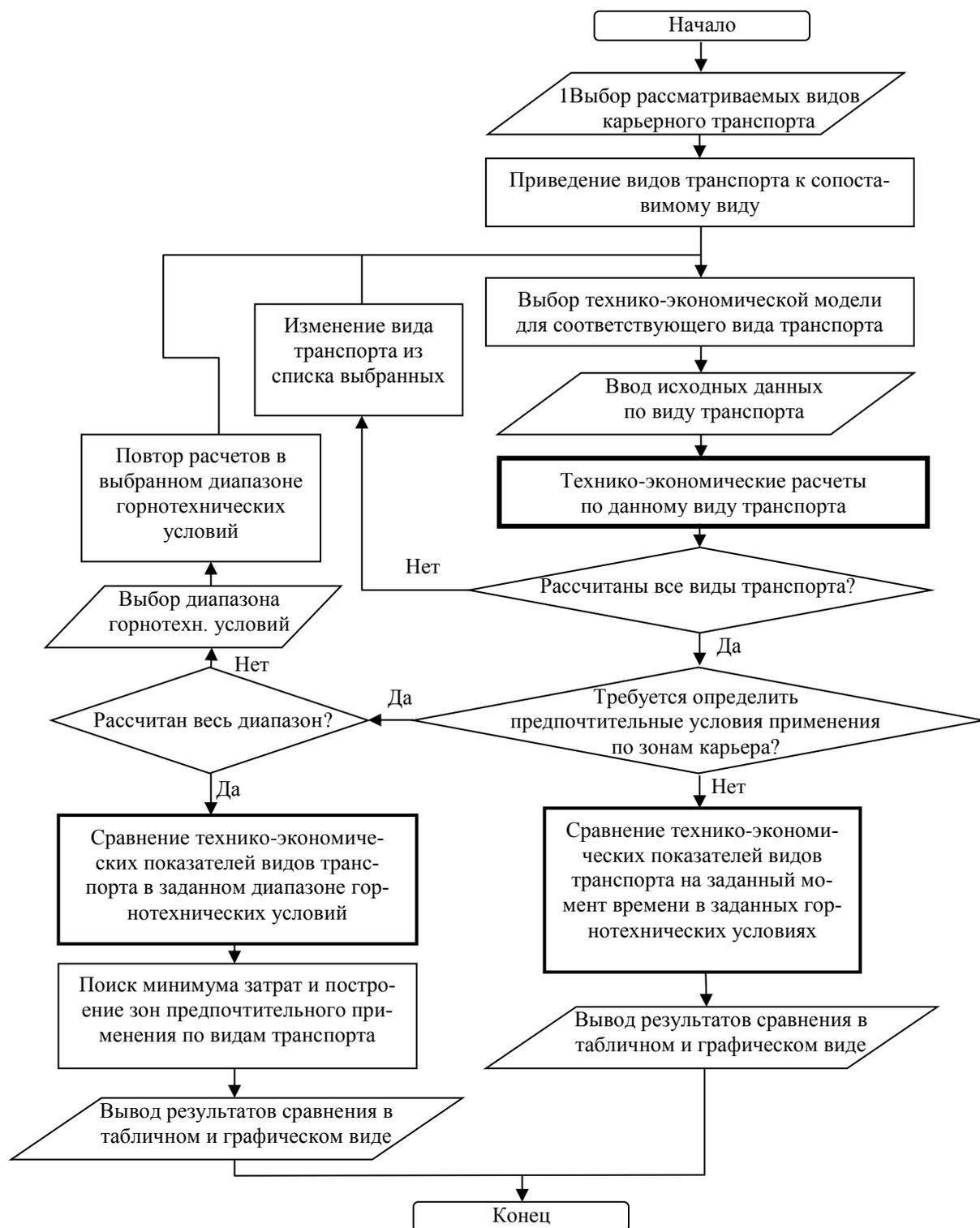
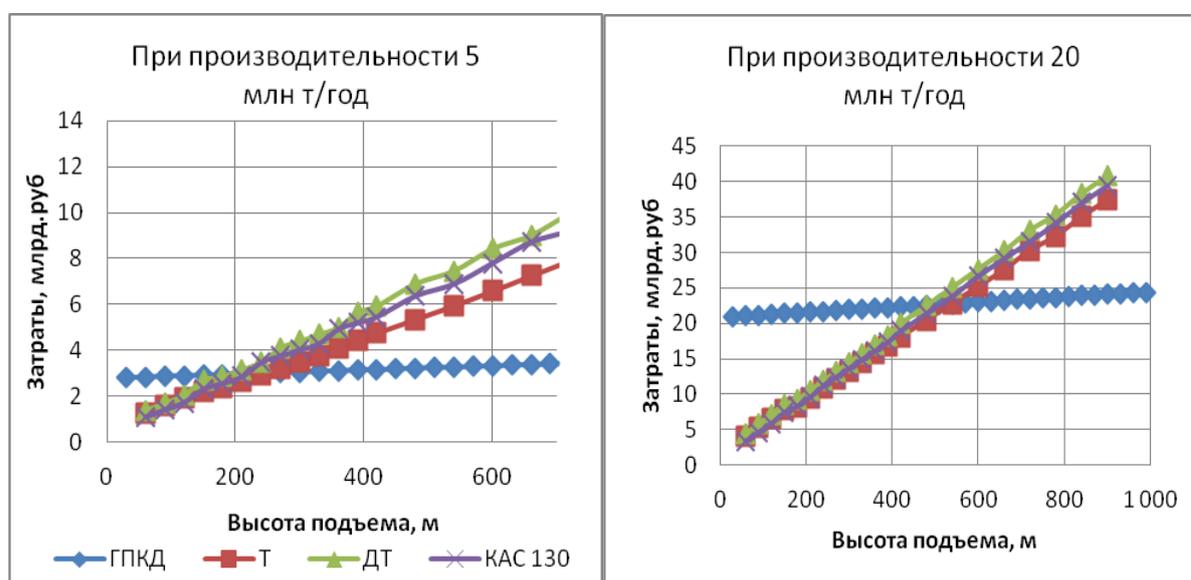


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма автоматизированного расчета параметров и сравнения видов карьерного транспорта

Апробация методики показала увеличение скорости расчетов, возможность решать вопросы стратегии формирования горно-транспортной системы и ее адаптации по мере развития карьера с применением многовариантного подхода.

Учет большого количества факторов позволяет более точно определять стадии планирования моментов адаптационного изменения ТСК. Так, на рис. 4 показаны результаты расчетов, позволяющие прогнозировать наиболее дешевый вид транспорта в зависимости от горнотехнических условий. Видно, что изменение производительности карьера существенно смещает область эффективного применения грузовой подвесной канатной дороги (ГПКД) в сторону больших глубин. Но этот факт повышает риски некупности затрат при подходе к проектной глубине карьера, ведь наибольшую экономию ГПКД обеспечит при достижении больших глубин, когда объемы перевозок существенно снижаются. Следовательно, для разной производственной мощности карьера в одних и тех же условиях (глубина, размеры в плане и т.п.) предпочтительны разные виды транспорта.



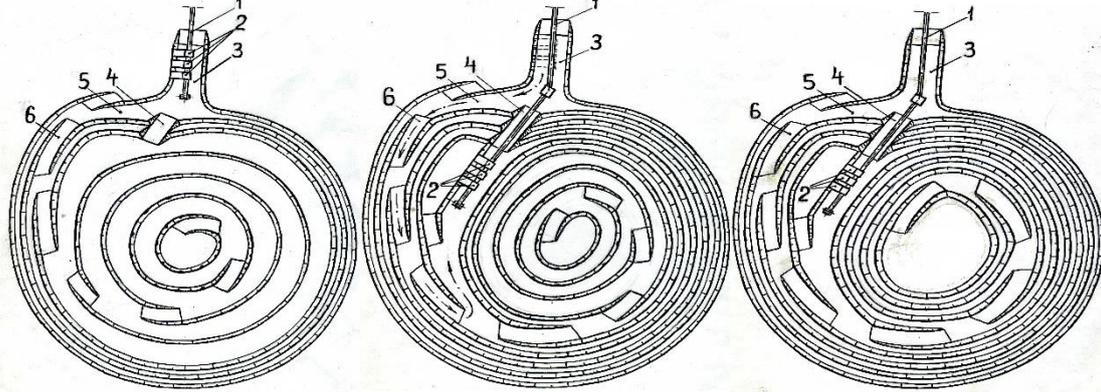
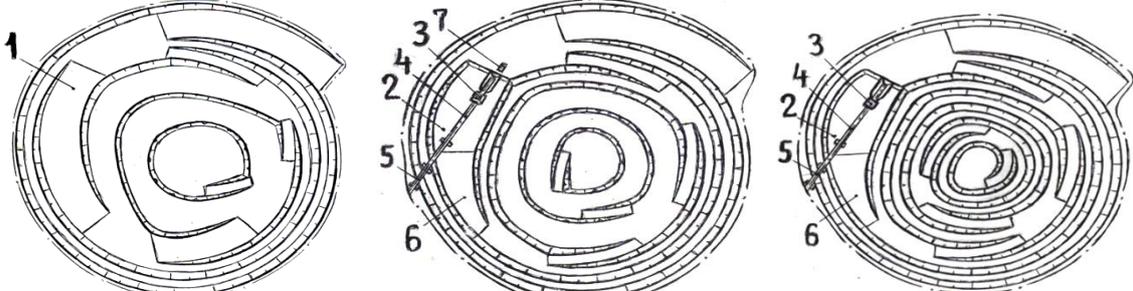
ГПКД – грузовая подвесная канатная дорога; Т – троллейвозы грузоподъемностью 130 т;  
ДТ – дизель-троллейвозы грузоподъемностью 130 т;  
КАС130 – карьерные автосамосвалы грузоподъемностью 130 т

Рис. 4 – Сравнение видов транспорта по дисконтированным затратам за период оценки (20 лет)

Важным элементом методов адаптации ТСК к изменяющимся условиям разработки сложноструктурных глубокозалегающих месторождений является комплексный учет факторов и комбинирование методик и способов адаптации. Так, совместное использование усовершенствованной методики технико-экономического сравнения видов транспорта и инновационных решений в области геотехнологии (для примера в табл. 1 приведены некоторые из них) позволило установить, что на карьерах, разрабатывающих глубокозалегающие месторождения циклично-поточную технологию (ЦПТ) с автомобильно-конвейерным транспортированием руды целесообразно вводить с самого начала ее добычи [17]. Прежде считалось, что конвейерный транспорт на карьерах целесообразно использовать с глубины 150 м и более [2]. Это свидетельствует о том, что установленные зоны рационального применения различных видов карьерного транспорта не являются неизменными и в дальнейшем могут уточняться, что предполагает гибкий подход в целом к общей теории формирования ТСК.

Таблица 1

**Инновационные решения в ЦПТ для разработки глубокозалегающих месторождений**

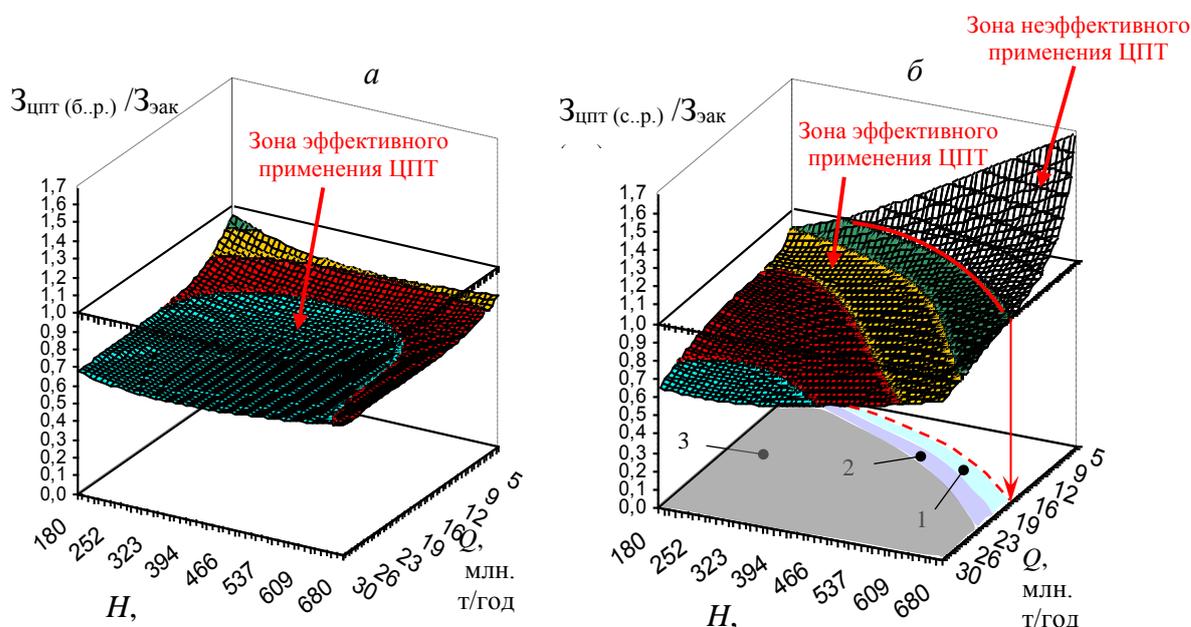
<b>Способ применения циклично-поточной технологии с начала разработки карьера</b>
<p>Для карьеров, разрабатывающих глубокозалегающие месторождения скальных полезных ископаемых с малыми размерами в плане, большой глубиной и значительной производственной мощностью, для ее обеспечения необходима высокая скорость понижения горных работ. Следовательно, размещение дробильно-конвейерного комплекса на борту карьера на первых этапах разработки затруднительно. В этом случае целесообразно использовать полустационарные дробильно-перегрузочные установки (ПДПУ), которые на первом этапе размещают в неглубокой внешней траншее, расположенной за конечным контуром карьера. Нередко есть возможность использовать для размещения ПДПУ на поверхности перепада рельефа местности. Из ПДПУ горная масса поступает на стационарный магистральный конвейер. По мере развития карьера и выхода верхних и средних горизонтов на проектный контур ПДПУ переносится вглубь карьера [18].</p>
 <p>1 — конвейерная линия; 2 — ПДПУ; 3 — внешняя конвейерная траншея; 4 — конвейерная полутраншея; 5 — горизонтальная транспортная берма; 6 — автомобильный съезд</p>
<b>Способ открытой разработки глубокозалегающих крутопадающих месторождений полезных ископаемых</b>
<p>После завершения первого этапа отработки месторождения (автосамосвалы большой грузоподъемности) в верхней части целика под верхним участком съезда формируют горизонтальную площадку. Нижнюю часть съезда срабатывают с уменьшением ширины до съезда для вспомогательной техники. На сформированной горизонтальной площадке монтируют дробильно-перегрузочный пункт (ДПП), а на конечном борту карьера – крутонаклонный конвейер. Полноприводные автосамосвалы малой грузоподъемности транспортируют руду с нижних горизонтов по крутонаклонным съездам до перегрузки через ДПП на крутонаклонный конвейерный подъемник. Использование этого способа позволит сократить затраты на разработку за счет исключения необходимости формирования на конечном борту карьера дополнительной площадки для размещения ДПП и хвостовой части ленточного конвейера с прижимным верхним ленточным контуром с выемкой большого дополнительного объема вскрыши [19].</p>
 <p>1 — первоначальный широкий автосъезд; 2 — площадка ДПУ; 3 — ДПУ; 4 — хвостовая часть конвейера; 5 — крутонаклонный конвейер; 6 — реконструированный автомобильный съезд; 7 — автосамосвал на разгрузке</p>

Усовершенствованная методика технико-экономических расчетов для ЦПТ позволила выполнить новый этап исследований эффективности применения комплексов ЦПТ (в сравнении с экскаваторно-автомобильным комплексом (ЭАК)). Учтены технологические особенности размещения дробильно-конвейерных комплексов, в том числе размещение с разносом борта карьера и без разноса (инновационные схемы). Наиболее корректным является сравнение вариантов по приведенным суммарным удельным капитальным и эксплуатационным затратам [20 – 21]. Для этого действительные затраты на расчетный год за период оптимизации приведены к одному моменту времени и отнесены к значению удельных капитальных затрат, направленных на применение ЭАК с производительностью 5 млн т/год и с высотой подъема горной массы 180 м, условно соответствующим 100 %.

По результатам расчетов цифровое сравнение дискретных значений затрат позволяет оценивать их связи лишь приближенно. Для выявления более точных количественных закономерностей проведено их регрессионное моделирование методом нелинейной функционально-факторной регрессии [22]. Выбор комплекса ЦПТ проводится по критерию, выраженному неравенством  $Z_{\text{ЦПТ}} < Z_{\text{ЭАК}}$ .

Установлено, что отношения затрат на применение комплекса ЦПТ без разноса борта к затратам на рудных ЭАК не превышает значения 0,88, а следовательно, ЦПТ будет выгоднее в большом диапазоне горнотехнических условий. Аналогично изменяется отношение затрат на комплекс ЦПТ к затратам на рудный ЭАК, показанное в графическом виде на рисунке 5а. Но здесь в интервалах производительности комплекса от 5 до 5,5 млн т/год и высоты подъема горной породы меньше 220 м отмечается зона ограничений выбора ЦПТ [30]. В этих условиях эффективное применение ЦПТ возможно при высокой степени достоверности прогнозирования технико-экономических параметров и точной адаптации технических параметров дробильно-конвейерного комплекса (ДКК) к горнотехнологическим условиям.

Наибольшие ограничения эффективности применения ЦПТ имеют место при необходимости разноса бортов карьера для размещения ДКК. Имеются зоны, где эти отношения больше единицы (рис.5б).



Распределение вероятности  $P$  эффективного применения ЦПТ:  
1- (0,5-0,841); 2- (0,841-0,977); 3- (0,977- 1)

Рис. 5 – Модельные сравнения относительных приведенных удельных затрат при применении комплексов ЦПТ и ЭАК для транспортирования вскрышных горных пород в карьерах без разноса бортов (а) и с разносом (б)

Стрелкой показано направление проекции изолинии со значением 1 (эффективность ЦПТ и ЭАК равнозначна) на поле аргументов  $Q$ ,  $H$ . По положению проекции с использованием компьютерной программы «Тренды ФСП-1» [22] определены с достаточно высокой достоверностью  $P=0,9$  ограничения параметров рудных и вскрышных комплексов (1) – (2) [21].

Для вскрышных комплексов ограничение действует в интервале производительности от 5 до 22 млн т/год (от 22 до 30 млн т/год ограничений нет):

$$H_{\text{вск}} < 1089,6 - \frac{2008,25}{Q^{0,516}}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота подъема горной массы, м;

$Q$  – годовая производительность комплекса, млн т/год.

Для рудных комплексов ограничение действует в интервале производительности от 5 до 18 млн т/год (от 18 до 30 млн т/год ограничений нет):

$$H_{\text{руд}} < 1039,63 - \frac{2030,1}{Q^{0,6}}. \quad (2)$$

В зонах, обозначенных цифрами 2 и 3 на рис. 5б, эффективность применения ЦПТ на практике (при проектировании) должна быть обоснована с повышенной точностью (большей детальностью проработки), а технические параметры дробильно-конвейерного комплекса (ДКК) максимально адаптированы к горно-технологическим условиям конкретного карьера.

#### *Заключение*

Обоснован методический подход к адаптации горно-транспортных систем к изменяющимся условиям разработки сложноструктурных глубокозалегающих месторождений, базирующийся на принципах:

- обоснование параметров ТСК должно базироваться на многовариантном подходе, основанном на имитационном компьютерном моделировании функционирования ТСК во взаимосвязи с ключевыми параметрами горно-технологической системы в целом (через трехмерное компьютерное моделирование и т.п.);

- методика технико-экономического сравнения должна быть адаптивной и базироваться на результатах экономико-математического моделирования, должна позволять рассматривать варианты не только традиционных, но и новых видов (инновационных конструкций) транспорта;

- выбор предпочтительного варианта адаптации должен осуществляться не по дискретным значениям, а на сплошных многомерных (многофакторных) моделях (в простейшем случае – трехмерных), что существенно повышает точность прогнозирования и обоснованность принимаемых решений;

- должна осуществляться сквозная оптимизация процессов открытых горных работ (оптимизация только одного процесса не дает максимальной эффективности);

- применение гибкого подхода к адаптации схемы вскрытия, управлению параметрами рабочей зоны и порядку ведения горных работ.

#### **Литература**

1. Яковлев В.Л. Теоретические основы выбора карьерного транспорта рудных карьеров: дис. ... д-ра техн. наук / В.Л. Яковлев; ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1978. – 421 с.
2. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров / В.Л. Яковлев. – Новосибирск: Наука, 1989. – 240 с.

3. Яковлев В.Л. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков, И.В. Соколов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2018. – 360 с.
4. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений / В.Л. Яковлев // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2. – С. 5 - 14. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.005
5. Георгиевский А.Б. Эволюция адаптаций (историко-методологическое исследование) / А.Б. Георгиевский. — Л.: Наука, 1989. — 189 с.
6. Барбашин Д.И. Адаптация средств взаимодействия в сложных технических системах управления / Д.И. Барбашин, А.И. Нистюк // Технические науки – от теории к практике. – 2014. - № 6 - 1. – С. 85 - 89.
7. Anton Pashchenko, Pavel Okhtilev, Semen Potrysaev, YuryIpatov, and Boris Sokolov. Methodology and Structure Adaptation Algorithm for Complex Technical Objects Reconfiguration Models // Cybernetics and Mathematics Application in Intelligent Systems: Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). Vol.2. Series “Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 574. - P. 319 - 328.
8. Boris Sokolov, Karim Benyamna and Oleg Korolev. RFID Technology for Adaptation of Complex Systems Scheduling and Execution Control Models // Proceedings of the 5<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC2016). Vol 3: Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems / eds. RadekSilhavy, Roman Senkerik, Zuzana KominkovaOplatkova, ZdenkaProkopova, Petr Silhavy. – Switzerland: Springer, 2016. – P. 433 - 442. DOI 10.1007/978-3-319-33389-2.
9. Sokolov, B.V., Zelentsov, V.A., Brovkina, O., Mochalov, V.F., Potryasaev, S.A. Models adaptation of complex objects structure dynamics control // Advances in Intelligent Systems and Computing. 4-th Computer Science On-line Conference, CSOC 2015; Zlin; Czech Republic; 27 – 30 April 2015. Volume 348, 2015, Springer Verlag. - P. 21 - 33. DOI: 10.1007/978-3-319-18503-3\_3.
10. Parametric Adaptation Of Models Describing Structure-Dynamics Control Processes In Complex Technical Systems (CTS) Published / Dmitry A. Ivanov, Boris V. Sokolov, Dmitry N. Verzilin, Evgeniy M. Zaychik.: 9 June 2009 by European Council for Modeling and Simulation in ECMS 2009 Proceedings edited by J. Otamendi, A. Bargiela, J. L. Montes, L.M. DoncelPedrera. 23rd European Conference on Modelling and Simulation. – Режим доступа: [www.scs-europe.net](http://www.scs-europe.net). (DOI: 10.7148/2009-0345-0351).
11. Доенин В.В. Адаптация транспортных процессов / В.В. Доенин. –М.: Издательство «Спутник», 2009. – 219 с.
12. Козлов П.А. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей / П.А. Козлов, В.С. Колокольников, В.И. Сорокин // Транспорт Урала. — 2016. — № 3 (50). — С. 3 – 8.
13. Дулин С.К. Разработка системы имитационного моделирования движения железнодорожного транспорта на основе интерактивно задаваемых правил организации движения / С.К. Дулин, А.С. Селецкий, В.И. Уманский // Российская ассоциация искусственного интеллекта [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.raai.org/conference/cai-08/files/cai-08\\_paper\\_283.doc](http://www.raai.org/conference/cai-08/files/cai-08_paper_283.doc).
14. Имитационное моделирование и автоматизированное управление горно-транспортными работами в карьерах / Р.Г. Салахиев, Ю.А. Бахтурин, А.В. Дедюхин, А.Г. Журавлев // Горный журнал. — 2012. — № 1. — С. 82 – 85.
15. Бахтурин Ю.А. Параметрическая адаптация транспортных систем карьеров на основе универсальной интерактивной имитационной модели / Ю.А. Бахтурин // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4. – С. 44 - 49. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.071.

16. Журавлев А.Г. Моделирование параметров транспортных систем карьеров / А.Г. Журавлев // Черная металлургия. – 2015. – № 12. – С. 22 - 26.
17. О моменте ввода циклично-поточной технологии на карьерах / В.Л. Яковлев, Г.Д. Кармаев, В.А. Берсенева, И.Г. Сумина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2015. - № 3. – С. 4 - 11.
18. Пат. № 2498068 Российская Федерация. Карьер / В. А. Берсенева, Г.Д. Кармаев, Ю.А. Бахтурин, И.Г. Сумина; заявитель и патентообладатель ИГД УрО РАН; заявл. 10 ноября 2013; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31
19. Пат. 2693798 Российская Федерация, МПК Е 21С 41/26. Способ открытой разработки месторождений полезных ископаемых / В.А. Берсенева, А.В. Глебов, Ю.А. Бахтурин, А.В. Семенкин; заявитель и патентообладатель ИГД УрО РАН № 2018144995, заявл. 19.12.2018. Опубл. 04.07.19. Бюл. № 19
20. Учет фактора времени при определении эффективности применения комплексов ЦПТ / А.В. Семенкин // Известия УГГУ. – 2017. – № 1. – С. 72 - 75.
21. Семенкин А.В. Исследование экономического показателя затрат при циклично-поточной технологии на рудных карьерах / А.В. Семенкин, В.А. Антонов // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 1. – С. 103 – 111.
22. Антонов В.А. Метод нелинейной функционально-факторной регрессии в экспериментальных горно-технологических исследованиях / В.А. Антонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10 (специальный выпуск 23). – С. 90 - 98.