



# Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых

В.Л. Яковлев

Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ yakovlev@igduran.ru

**Резюме:** Специфика разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений требует поэтапного изменения технологических параметров горных работ в связи с уточнением качественных характеристик полезного ископаемого и физико-механических свойств горных пород. Предложен новый методологический подход к решению проблем освоения недр на основе принципов системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности, дополненных введением понятия «переходные процессы». Определены наиболее значимые научные, технологические и организационно-технические вопросы, требующие исследования: 1) оценка объема и качества запасов; 2) обоснование границ карьера и его глубины; 3) последовательность формирования карьерного пространства и его рабочей зоны во взаимосвязи с развитием транспортной системы карьера; 4) переход от открытого к подземному (комбинированному) способу разработки. Сформулирована научно-методическая постановка решения проблем развития действующих горных предприятий, состоящая из трех разделов: 1) разработка долгосрочной стратегии инновационно-технологического развития, включающей решение комплекса задач; 2) выработка подходов к развитию технологии горного производства, включая оптимизацию параметров технологических процессов; 3) разработка комплекса организационно-экономических мероприятий и управленческих воздействий с целью предотвращения кризисных ситуаций или выхода из них, в том числе резервирование и управление ресурсами, ситуационный технико-экономический анализ и устранение «узких мест».

**Ключевые слова:** глубокозалегающие месторождения, горнотехническая система, методологический подход, стратегия разработки, технологические процессы, системность, комплексность, междисциплинарность, инновационная направленность

**Благодарности:** Статья подготовлена на основе результатов исследований по Теме «Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений (2019–2021 гг.) и паспорта утвержденной Минобрнаукой РФ и Минфином РФ в качестве Госзадания на 2022–2024 гг.

**Для цитирования:** Яковлев В.Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2022;(1S):34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

## Key Stages and Results of Research to Formulate Methodological Basis for the Strategy to Develop Mining Systems for Deep-Seated Deposits of Solid Minerals

V.L. Yakovlev

Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ yakovlev@igduran.ru

**Abstract:** Specific features of mining deep-seated deposits characterized with complex structure require a step-by-step change in parameters of the technological processes due to the clarification of the qualitative characteristics of minerals as well as the physical and mechanical properties of rocks. A new methodological approach to addressing the challenges associated with subsurface development is proposed based on the principles of consistency and complexity combined with the interdisciplinary and innovative approach and supplemented by introduction of the 'transient process' concept. The following most significant scientific, technological, organizational and technical issues that require investigation have been identified: 1) assessment of the volume and quality of reserves; 2) justification of the open pit boundaries and its depth; 3) the sequence of forming the open pit space and its working zone in relation to the development of the open pit transport system; 4) transition from the surface to the underground (combined) mining system. A scientific and methodological formulation of the solution to the problems of developing the existing mining operations is proposed, which consists of the following three sections: 1) development of



a long-term strategy of innovative and technological development that would include solution of complex tasks; 2) formulation of approaches to development of mining technology, including optimization of technological process parameters; 3) working out a set of organizational and economic measures and managerial actions to prevent crisis situations or recover from them, including redundancy and resource management, situation-based technical and economic analysis and elimination of bottlenecks.

**Keywords:** deep-seated deposits, mining system, methodological approach, development strategy, technological processes, consistency, complexity, interdisciplinary approach, innovative approach

**Acknowledgments:** The article is based on the research results of the project entitled "Methods of accounting for transient processes of technology development in mining of deep deposits with complex structure (2019-2021)" and the passport approved by the Ministry of Education and Science and the Ministry of Finance of the Russian Federation as the State Assignment for 2022–2024.

**For citation:** Yakovlev V.L. Key Stages and Results of Research to Formulate Methodological Basis for the Strategy to Develop Mining Systems for Deep Seated Deposits of Solid Minerals. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.



**В.Л. Яковлев,**  
чл.-корр. РАН,  
Советник РАН,  
профессор, д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник  
Института горного дела  
Уральского отделения РАН

## Введение

Уникальной особенностью инновационного развития горнотехнических систем является определяющая зависимость технико-экономических показателей их функционирования от горно-геологических и физико-географических условий разработки месторождений полезных ископаемых.

Рост глубины разработки, уменьшение среднего содержания главных полезных компонентов в добываемом сырье, опережающий рост извлекаемых из недр объемов горной массы по сравнению с ростом объемов конечной продукции объективно связаны с увеличением затрат на добычу и переработку минерального сырья, которое может быть компенсировано повышением комплексности использования минеральных ресурсов, увеличением коэффициента извлечения полезных ископаемых из недр и сопутствующих компонентов при обогащении на основе создания и применения инновационных технологий горного производства.

Специфика разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений состоит в том, что по мере развития горных работ уточняются геологические параметры, качественный состав, мощность и элементы залегания полезного ископаемого, физико-механические свойства горных пород, что требует периодического поэтапного изменения технических и технологических параметров горных работ с учетом взаимосвязей технологических процессов горного производства с целью повышения эффективности функционирования горной системы предприятия.

## Обзор исследований в горной промышленности

Еще в конце 80-х годов XX столетия в публикациях научных трудов и в докладах на научно-технических конференциях ученых академических институтов и вузов горного профиля обосновывалась необходимость новых подходов к исследованию, проектированию и планированию горных работ, схем вскрытия и систем разработки, формированию транспортных систем карьеров с учетом роста их глубины, к переходу на подземные и комбинированные технологии.

Особенно остро необходимость новых подходов к исследованию и решению проблем горного производства возникла в связи с распадом СССР, переходом в России и странах СНГ от плановой к рыночной экономике, резким снижением объемов и ростом себестоимости добычных и горно-капитальных работ.

В обобщенном виде можно выделить несколько групп проблем в развитии минерально-сырьевой базы России, в производстве и потреблении минерального сырья:

1. После распада СССР разведанные и освоенные месторождения многих видов минерального сырья (хромиты, марганцевые и урановые руды и др.) оказались за пределами России, а потому ряд перерабатывающих и металлургических предприятий, особенно в Уральском регионе, оказались отрезанными от источников минерального сырья.
2. В период перехода от плановой к рыночной экономике практически распались геологоразведочные службы, а действующие горнодобывающие и металлургические предприятия почти вдвое снизили объемы производства.
3. В еще большей степени, чем производство продукции минерального сырья, снизилось его внутреннее потребление, в частности машиностроительными предприятиями, в связи с чем на горных предприятиях все в больших масштабах стало применяться импортное горное, транспортное и обогатительное оборудование.
4. На большинстве горнодобывающих предприятий наиболее богатые по содержанию полезных компонентов и расположенные в верхней зоне участки месторождений оказались отработанными, и требовалось вскрытие глубоких горизонтов как на открытых, так и подземных горных разработках, что связано со значительными капитальными вложениями.
5. В силу специфики природно-климатических условий России и горно-геологических особенностей месторождений их освоение требует больших мате-



риальных и трудовых затрат, в том числе на строительство и развитие транспортных коммуникаций, инфраструктуры, на применение оборудования в северном исполнении. Особенно это характерно для уже разрабатываемых и в еще большей степени подлежащих разведке и последующему освоению месторождений Северо-Запада и Северо-Востока России, Полярного Урала, северных регионов Сибири.

6. Основных проблем собственно горного производства много, но главные из них:
- физический и моральный износ оборудования (40–60%);
  - низкая производительность труда (в 3–5 раз ниже лучших мировых аналогов), связанная в основном с организацией управления производством.

Начальным этапом исследований по разработке методологических основ стратегии освоения месторождений твердых полезных ископаемых является осознание автором статьи необходимости решения проблем комплексного освоения недр в период работы в Институте горного дела Севера СО РАН (1986–1995), когда в соавторстве с проф. С.А. Батугиным была опубликована монография «Закономерности развития горного дела» [1], в которой ключевое слово данной статьи «стратегия» отсутствует, но представленные в ней закономерности, особенности условий и тенденций развития основаны не только на учете региональных особенностей горного дела в Якутии, но и с учетом мировых тенденций, разрыва в уровнях производства и потребления полезных ископаемых в индустриально развитых и развивающихся странах, к последним, к сожалению, относится и Россия.

Первые шаги в постановке решения проблем развития горного производства в России и путей их решения представлены в работе автора «Состояние и перспективы развития горнодобывающей промышленности России и стран СНГ» [2].

На основе анализа научно-технической литературы, с учетом опыта разработки региональной научно-технической программы «Руда Урала» в работе [3] изложены концептуальные положения и практические рекомендации по выбору стратегии освоения минеральных ресурсов Урала.

В период с 1995 г., когда автор статьи после 10 лет работы директором ИГДС СО РАН (г. Якутск) вернулся в Екатеринбург и был назначен, а затем избран директором Института горного дела, в 1994 г. перешедшего из Минчермета в состав Уральского отделения РАН, до 2004 г., когда в результате реформ было создано Министерство образования и науки как федеральный орган исполнительной власти, отвечающий за формирование и реализацию государственной научно-технической политики, и до 2006 г., когда директором института был избран д-р техн. наук С.В. Корнилов, и началась реализация пилотного проекта по организации исследований в институте путем включения в качестве Госзадания четырех тем, обеспеченных базовым бюджетным финансированием, а финансирование фундаментальных исследований осуществлялось по конкурсным проектам Программ Президиума РАН, ОНЗ РАН и УРО РАН.

В этот период были опубликованы работы [4–6], в которых рассматривались методологические аспекты стратегии освоения минеральных ресурсов.

В условиях завершения переходного периода от плановой к рыночной экономике была аргументирована необходимость учитывать три особенности технологического развития в горнодобывающих отраслях:

– смещение освоения новых месторождений в регионы с более сложными природными и горно-геологическими условиями и с недостаточно развитой инфраструктурой, дефицитом кадров, источников энергии и производств, перерабатывающих исходное минеральное сырье (в Якутию, на Северный, Приполярный и Полярный Урал), в связи с сокращением или исчерпанием запасов минерально-сырьевых ресурсов в традиционно развитых горнодобывающих районах страны;

– накопление в старых горнопромышленных районах большого количества отходов обогащения и металлургии, являющихся значительным резервом сырья для поддержания действующих производств, в целом отрицательно влияющих на экологическое состояние территорий из-за общего ухудшения качества минеральных ресурсов, характеризующегося устойчивым увеличением расхода сырой руды на 1 т концентрата;

– компенсация ожидаемого увеличения энерго- и ресурсоемкости горного производства за счет модернизации физически и морально устаревшего оборудования, технологий рудоподготовки и обогащения, а также совершенствования параметров технологических процессов, схем вскрытия и систем разработки с ростом глубины месторождений твердых полезных ископаемых.

Существо разработанного и реализуемого в институте методологического подхода в обосновании стратегии формирования и развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых [7; 8] состоит в том, что при всей специфике его реализации применительно к разрабатываемым в настоящее время месторождениям и освоению запасов минерального сырья в районах действующих горнопромышленных агломераций, а также в регионах, где отсутствуют предприятия по добыче и переработке полезных ископаемых, в том числе недостаточно развита инфраструктура, необходимо решать наиболее значимые научные технологические и организационно-технические вопросы, требующие исследования:

1. Оценка объема и качества запасов, степени их разведанности, условий залегания, качественной и технологической характеристики, принятие решения о целесообразности их комплексного освоения.
2. Обоснование способа разработки глубокозалегающего месторождения и возможности (целесообразности) перехода от открытого к подземному или комбинированному способу.
3. Обоснование границ карьера, его глубины, углов откоса бортов, последовательности развития рабочей зоны, выделение этапов разработки.
4. Формирование транспортной системы карьера во взаимосвязи с развитием карьерного пространства и его рабочей зоны, применение новых видов технических средств и схем транспорта с заменой действующих, но чаще в дополнение к ним.
5. Поэтапная разработка месторождений, формирование временно нерабочих бортов карьеров и последующая их разработка с использованием специальных технологий и технических средств взрывания, экскавации, транспорта.
6. Вскрытие новых горизонтов, в том числе с возможным изменением физико-механических свойств и вещественного состава слагающих их горных пород.
7. Разработка месторождений сложного геологического строения залежей основного полезного ископае-



мого при наличии попутных полезных компонентов, значительной изменчивости их содержания и других свойств, требующих селективной разработки, усреднения и периодического изменения параметров систем разработки, рудоподготовки и обогащения.

При выполнении исследований по основным технологическим процессам горного производства следует учитывать факторы природной изменчивости геологических параметров месторождений, обосновывающих необходимость их исследования и учета по данным Геологического отчета, и нарастание информации по этапам предварительной, детальной и эксплуатационной разведки, главными из которых являются:

1. Тела полезного ископаемого залегают в виде жил, линз, пластов переменной мощности; содержат включения пустых пород или некондиционных руд разных размеров и формы, осложнены складчатыми или разрывными тектоническими нарушениями;
2. Мощность и элементы залегания, устойчивость горных пород, их трещиноватость, естественная блочность, сложность, пределы прочности и деформационные свойства меняются в широких пределах;
3. По простиранию и глубине залежей изменяется качественный состав полезного ископаемого, имеют место закономерная или случайная зональность общего баланса минералов, высокая неравномерность их содержания и гранулометрического состава – от сплошных до тонковкрапленных руд.

Все это требует детальной геометризации размещения полезного ископаемого в недрах и учета при выборе горной техники и технологий, адаптивных к изменениям геологической среды, планирования горных работ в режимах селективной выемки и усреднения, создания инновационных технологий добычи и рудоподготовки с учетом закономерностей переходных процессов при изменении условий функционирования горно-обогатительного предприятия.

При выполнении исследований учитывались зарубежные публикации по стратегическому планированию горных работ на примере модели сетевых потоков [9], гибридного метода линейного программирования [10], геoinформационного моделирования для геотехнологического инжиниринга [11], методологии планирования горных работ в карьерах [12] при сравнении различных видов перспективного планирования в условиях геологической неопределенности [13].

Сформулирована научно-методическая постановка проблем развития действующих предприятий, состоящая из трех разделов:

1. Разработка долгосрочной стратегии инновационно-технологического развития, включающей решение комплексных задач:
  - анализ горно-геологической информации об объемах, качестве и пространственном расположении оставшихся запасов основных и попутных полезных компонентов;
  - обоснование кондиций с учетом уточненных качественных признаков добываемого сырья и конъюнктуры отечественного и мирового рынка на товарную продукцию;
  - уточнение границ открытых и подземных горных работ и их последовательного, параллельного или комбинированного применения;

- обоснование объемов добычи и номенклатуры товарной продукции как основы для выработки и принятия управленческих воздействий в технологическом и организационно-экономическом развитии на краткосрочную и долгосрочную перспективу.
2. Выработка подходов к развитию технологии горного производства, включая:
    - исследование режима горных работ в увязке с порядком их развития и формированием рабочей зоны (очистного пространства), обеспечивающим предпосылки для управления качеством добываемого сырья;
    - аудит и анализ структуры парка оборудования и на их основе – модернизацию действующих, а также создание и применение новых машин и механизмов;
    - целевая оптимизация параметров технологических процессов и их взаимодействия применительно к конкретным условиям функционирования предприятия.
  3. Разработка комплекса организационно-экономических мероприятий и управленческих воздействий с целью выхода из кризисных ситуаций или их предотвращения, в том числе:
    - обоснование способов резервирования и управление ресурсами предприятия всех видов (товарная продукция, финансы, оборудование, материалы и т.п.);
    - ситуационный технико-технологический анализ организационной структуры горного производства и поиск «узких» мест, сдерживающих снижение текущих издержек или повышение доходности, а также обеспечивающих безопасность ведения работ;
    - комплексный анализ управленческих решений и системная увязка элементов и подсистем горного предприятия как организационно-экономической и финансовой системы и пр.

Результаты многолетних фундаментальных и прикладных исследований ИГД УрО РАН по Программам Президиума РАН Отделения наук о Земле РАН и УрО РАН, междисциплинарным и интеграционным проектам с институтами Уральского, Сибирского и Дальневосточного отделений РАН, Госзаданиям Минобрнауки по проблемам комплексного освоения запасов минерального сырья месторождений твердых полезных ископаемых (табл. 1) соответствуют целям и задачам «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 декабря 2018 г. №2914-Р, как основы для формирования и реализации государственной политики в области геологического изучения недр, их производства использования минерально-сырьевой базы на федеральном и региональном уровнях, а также для разработки государственной программы Российской Федерации.

В начале XX в. не только в России, но и в странах Западной Европы, во всей остроте встали вопросы выбора стратегии освоения запасов минерального сырья разрабатываемых и перспективных месторождений полезных ископаемых.

При выполнении в Институте исследований по проекту «Мировые тенденции и Российские проблемы производства и потребления минерального сырья» (2007) Программы Президиума РАН №19 «Прогноз технологического развития экономики России с учетом мировых интеграци-



Таблица 1  
Результаты исследований по темам государственных заданий

Table 1  
Research results by the state assignments topics

| Название темы, руководители  | Результаты исследований  |
|--|--|
| Тема 1. Теоретические основы ресурсосберегающих технологий добычи и переработки минерального и техногенного сырья с целью комплексного решения проблем развития минерально-сырьевой базы (2010–2012), руководители темы В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков     | Разработан методический подход исследования факторов, определяющих порядок формирования карьерного пространства при разработке глубокозалегающих рудных месторождений, основывающийся на многоуровневом последовательном порядке определения их значимости и степени влияния на конечный результат как в краткосрочном, так и в долгосрочном плане за счет принципиально новых разработанных в работе критериев экономической оценки   |
| Тема 2. Теоретические основы стратегии комплексного освоения и создания ресурсосберегающих технологий разработки глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых (2013–2015), руководители темы В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков                 | Разработаны геотехнологические основы стратегии комплексного освоения глубокозалегающих рудных месторождений на основе учета динамики развития горнотехнологической системы открытой, подземной и комбинированной разработки во времени и пространстве   |
| Тема 1. Теоретические основы стратегии комплексного освоения месторождений и технологий их разработки с учетом особенностей переходных процессов в динамике развития горнотехнических систем (2016–2018), руководители темы В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков | Предлагаемый методологический подход, основанный на исследовании переходных процессов, является универсальным и может использоваться при проектировании освоения глубокозалегающих месторождений, планировании, организации и управлении добычей и рудоподготовкой минерального сырья на действующих горных предприятиях с учетом нарастания геологической информации, внедрения разработанных инновационных мероприятий, изменения параметров и показателей горнотехнической системы горного предприятия по мере развития горных работ  |
| Тема № 0405-2019-0005 «Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых» (2019–2021). Госзадание 075-01039-20-00, руководитель темы В.Л. Яковлев           | Разработан способ проведения крутонаклонных траншей для автотранспортных средств, способных преодолевать крутые уклоны, что позволяет снизить объем горно-капитальных работ, увеличить глубину карьера без дополнительного разноса бортов.<br>Разработан метод структурно-функционального анализа горнотехнической системы освоения переходной зоны при комбинированной разработке глубокозалегающих месторождений. Одной из важнейших характеристик предложенного метода выбора параметров комбинированной технологии является использование, наряду с энергоэффективными подземными комплексами самоходных машин, оборудования и коммуникаций транспортной системы карьера |

онных процессов» (координатор акад. В.В. Ивантер) были выделены для учета в последующих исследованиях Российские тенденции развития горного производства:

1. Существенное снижение производства и потребления в 1991–1998 гг. и постепенное увеличение в 1999–2004 гг.
2. Отставание воспроизводства запасов по сравнению с темпами их добычи.
3. Развитие горного производства на действующих предприятиях и на месторождениях, ранее вовлеченных в эксплуатацию.
4. Снижение уровня внутреннего потребления многих продуктов переработки стратегически важных видов минерального сырья.
5. Преимущественное применение на горных предприятиях импортной техники и оборудования.
6. В связи с невозможностью самостоятельного развития в рыночных условиях переход горных и металлургических предприятий к корпоративному производству в рамках холдингов. Пример: УГМК объединяет 22 предприятия, в том числе 11 – горных. Уже тогда с тревогой были восприняты намерения западных стран использовать минеральные ресурсы стран «третьего мира», к которым они относили и Россию. Об этом свидетельствует опубликованная в журнале «Глюкауф» (2004) статья руководителя департамента Горной промышленности и науки проф. Х. Вагнера и почетного доктора горных наук Г.В. Феттвайса (Австрия), в которой рассматриваются вопросы горной науки и технологии разработки месторождений полезных ископаемых в западных

странах в начале нового столетия [14]. Вот цитата из этой статьи: «...западные промышленно развитые страны не имеют права полностью устранившись от развития горной науки и возложить основную ответственность на добывающие страны третьего мира. Существует настоятельная необходимость в разработке долгосрочной политики стабильного снабжения минеральными ресурсами Европы и других стран Запада с тем, чтобы сохранить позиции ведущего экономического региона. Запланированная ЕС «Восточная экспансия» по присоединению ряда важных добывающих стран может рассматриваться как идеальная возможность пересмотреть политику Европы в области горной науки».

К сожалению, следует отметить, что Европе и Западу в целом удалось в последующие годы, включая и современный период, реализовать запланированную «Восточную экспансию». Об этом свидетельствует опубликованная в 2011 г. в журнале «Маркшейдерия и недропользование» №4 (54) и №5 (55) статья вице-президента РАЕН, д-ра техн. наук, проф. Е.А. Козловского (министра геологии СССР в 1975–1989 гг.) «Национальная безопасность в свете минерально-сырьевых проблем» [15], в которой дана оценка состояния и перспектив развития минерально-сырьевого комплекса России:

1. Состояние сырьевых баз многих важнейших горнодобывающих регионов страны и действующих предприятий резко ухудшилось.
2. Важнейшими факторами, определяющими критическое состояние минерально-сырьевого комплекса России на современном этапе, являются выбытие до-



бывающих мощностей при существующих низких темпах ввода в эксплуатацию новых месторождений и значительное сокращение объемов геологоразведочных работ.

3. Указанные печальные факторы в ближайшей перспективе могут привести к существенному сбою в работе минерально-сырьевого комплекса и, как результат, к замедлению темпов экономического развития и к угрозе экономической безопасности страны.

В период с 1995 по 2000 г. в институте были сформированы основные положения нового подхода к обоснованию стратегии освоения минеральных ресурсов:

1. Россия занимает ведущее место в мире по минерально-сырьевому потенциалу, который оценивается как достаточный для проведения независимой и эффективной экологической политики.
2. Экономика России в XXI в. сохранит свою сырьевую направленность.
3. К числу общих технико-экономических закономерностей горнодобывающего комплекса относится прямая зависимость затрат на производство 1 т товарной продукции от качества исходного сырья и готового продукта.
4. Низкая конкурентоспособность многих видов продукции горного производства России в значительной степени определяется более сложными геологическими и горнотехническими условиями разрабатываемых и перспективных месторождений полезных ископаемых.
5. Стратегическим фактором развития страны должна стать структурная перестройка национальной экономики на основе собственной минеральной-сырьевой базы с целью повышения ее эффективности.
6. Лейтмотив стратегического направления принятия решений состоит в реализации положения: торговать следует не тем, что добываешь, а тем, что производишь.

Большое внимание в исследовании проблемы эффективного и безопасного комплексного освоения недр было уделено оценке мировых тенденций и российских проблем в производстве и потреблении минерального сырья [16].

По многим видам минерального сырья ведущими мировыми экспортёрами являются Австралия, ЮАР, Бразилия. Что касается России, то она экспортирует многие виды минерального сырья и продукты его переработки, в том числе потому, что отечественное машиностроение не потребляет весь объем производимого минерального сырья, что создает замкнутый круг: машиностроители не берут продукцию горно-металлургического комплекса, а горные предприятия, да и предприятия других отраслей, предпочитают закупать импортную технику.

По объемам добычи черных и цветных металлов Россия занимает четвертое-пятое место в мире, в частности, по меди – четвертое место в мире по ее производству и второе – по ее экспорту, а по потреблению меди Россия находится лишь на четырнадцатом месте.

Снижение объемов добычи большинства видов минерального сырья в России и странах СНГ после распада СССР и перехода к рыночной экономике позволило характеризовать состояние горнодобывающих отраслей промышленности к 1998 г. как кризисное:

– объемы работ снизились почти в 2 раза, численность работающих – на 10–15%, количество оборудования оста-

лось на прежнем уровне, отсюда – себестоимость резко возросла;

– сбыта продукции нет, предприятия нерентабельны и т.п.

Уже тогда были определены актуальные проблемы развития горного производства в России и необходимость их решения на основе научно обоснованной стратегии освоения недр и научно-технической политики в условиях социально-экономических реформ.

Предыстория включения в план Института Темы №1 такова: в 2006 г. началась реализация пилотного проекта по укрупнению тематики, когда вместо одной или нескольких тем для каждой лаборатории в план Института были включены 4 темы, по которым предусматривалось участие всех научных подразделений.

Параллельно с этим выполнялись исследования по конкурсным проектам фундаментальных исследований Президиума УрО РАН, отделения наук о Земле УрО РАН, в том числе по комплексным и междисциплинарным проектам с участием Институты горного профиля Кольского научного центра, Сибирского и Дальневосточного отделений РАН, а также Институты Уральского отделения других отраслей (геологии, металлургии, экономики, экологии и др.).

За последние 5 лет сложилась ситуация, что конкурсные проекты (2015–2017) и (2018–2020) начинались на год раньше темы №1, и еще до их окончания в тему №1 включались их результаты по методологическим аспектам решения проблемы комплексного освоения недр.

Финансирование по проекту (2018–2020) вместо трех лет осуществлялось только два года, при этом в 2019 г. вопрос финансирования решался только во II квартале, поэтому выполнение исследований в 2020 и 2021 гг. проводится, а в 2022–2024 гг. планируется проводить на основании научного задела, результаты которого опубликованы в монографиях и публикациях в рецензируемых и индексируемых РИНЦ, ВАК, WoS (WoC), Scopus (Скопус) изданиях [7–8; 17–26].

Ниже приводятся результаты исследований по Теме 1 за 2019–2021 гг.

Учитывая, что до 50–70% себестоимости добычи для глубоких карьеров составляют затраты на технологический транспорт, предлагается ряд технических и технологических инновационных решений в области формирования и поэтапного развития транспортных систем карьеров, обеспечивающих снижение себестоимости добычных и вскрышных работ и вовлечение в эксплуатацию запасов полезных ископаемых по мере развития горных работ [20; 21].

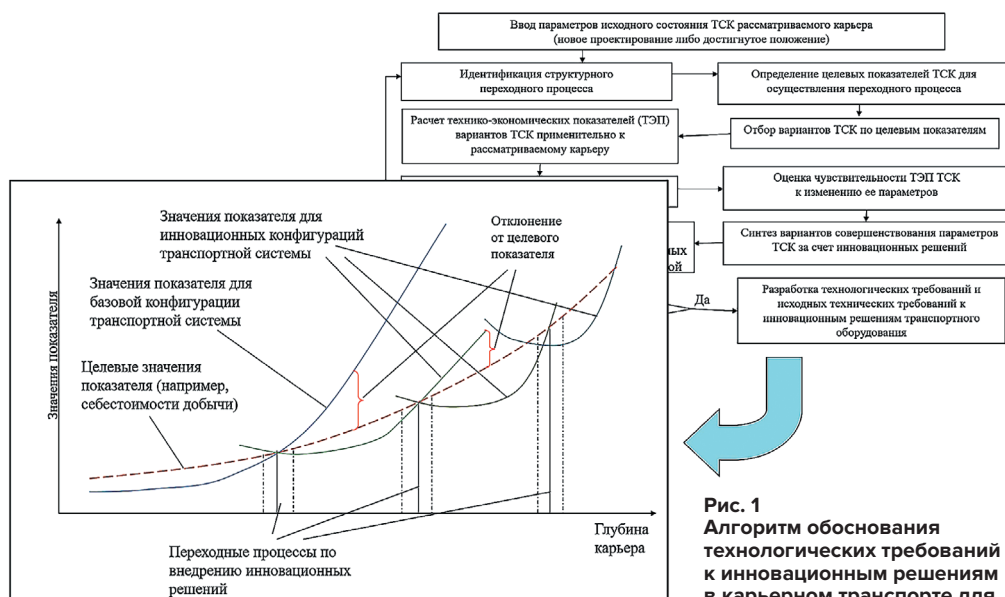
К числу важнейших технологических решений в области транспортных систем карьеров относятся:

– применение высокопроизводительных видов транспорта с низкой себестоимостью транспортирования и обеспечивающих вскрытие новых горизонтов без дополнительного увеличения вскрышных работ;

– внедрение энергоэффективных энергосиловых установок на карьерных автосамосвалах при работе в качестве сборочного звена в комбинированных транспортных системах автомобильно-железнодорожного и автомобильно-конвейерного транспорта;

– перенос дробильно-перегрузочного пункта при ЦПТ вслед за понижением горных работ с целью уменьшения высоты подъема автосамосвалов и сокращения эксплуатационных расходов;

– применение в перспективе электрифицированных видов транспорта, в том числе при открыто-подземных (комбинированных) системах разработки.



**Рис. 1**  
**Алгоритм обоснования технологических требований к инновационным решениям в карьерном транспорте для конкретного месторождения**

**Fig. 1**  
**An algorithm to justify technological requirements for innovative solutions in open-pit transport for a particular minefield**

Для реализации указанного методического подхода разработан алгоритм поиска рациональной инновационно-ориентированной стратегии (траектории) формирования параметров карьерного транспорта в динамике развития горных работ (карьера), отличающийся целенаправленным определением технологических требований к инновационным решениям на основе технико-экономических расчетов, отражающих диапазон преодоления отклонений от целевых показателей на всем жизненном цикле горнотехнологической системы, представляемом как последовательность стабильных состояний и переходных процессов (рис. 1).

Методические особенности подхода заключаются в возможности декомпозиции чувствительности технико-экономических показателей (ТЭП) к изменению параметров транспорта в виде многофакторных математических моделей, в учете показателей технического совершенства машин, оценке достижимости целевых ТЭП за счет инновационных решений, возможности применения автоматизированных расчетов и методов направленного поиска.

Учитывая, что охрана труда и техника безопасности при ведении горных работ являются важнейшими аспектами организации производства, предложено при проектировании, планировании и осуществлении переходных процессов по мере развития горных работ на горнодобывающем предприятии учитывать закономерности возникновения опасной производственной ситуации, что позволит обеспечить приемлемый уровень производственного риска при ведении горных работ, в том числе путем формирования атласа, где расписаны алгоритмы действия персонала для предотвращения возникновения и ликвидации последствий опасных производственных ситуаций [22].

Одними из важнейших вопросов открытой разработки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых являются формирование карьерного пространства во взаимодействии с формированием транспортной системы карьера и параметрами системы разработки, принятие инновационных решений, направленных на адаптацию процессов открытых горных работ к изменяющимся в процессе отработки карьера горно-геологическим и горнотехническим условиям по мере развития горных работ.

Важнейшим вопросом при формировании карьерного пространства является мониторинг состояния бортов и уступов конкретных горнодобывающих предприятий.

В связи с многолетним деформированием северо-западного борта Главного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК» принято решение о разносе борта. Разработаны рекомендации по изменению схемы вскрытия, параметров рабочей зоны, порядка отработки и постановки уступов в устойчивое положение. Расконсервацию уступов на начальном этапе рекомендовано производить поперечными заходками для минимизации последствий возможных обрушений приоткосной части высоких уступов с последующим переходом к нормальным рабочим площадкам. В результате изменения схемы вскрытия с организацией дополнительного перегрузочного пункта и перехода на отработку зоны разноса борта одновременно несколькими уступами достигается уменьшение угла наклона борта в его верхней части, вследствие чего уменьшается вес призмы активного давления, то есть повышается устойчивость прибортового массива.

Важнейшее влияние на устойчивость бортов карьеров и обоснование их параметров оказывают буровзрывные работы. Распределение пород по категориям взрываемости, составленное для одного положения поверхности действующего карьера, по мере понижения горных работ становится несоответствующим реальной геологоструктурной обстановке. Требуется обновлять геологоструктурный план карьера на основе дополнительных исследований структурного строения пород и систематического анализа условий и качества взрывания с последующей корректировкой границ пород различной категории взрываемости [23; 24].

При поэтапном технологическом развитии горнотехнической системы горного предприятия обоснована методология оценки эффективности переходных процессов в условиях комбинированной разработки глубокозалегающих рудных месторождений [25], включающая:

- метод комплексного качественно-количественного учета условий и факторов, вызывающих начало и действующих при реализации переходного процесса, заключающийся в сборе, обобщении и интерпретации данных на основе экспертной оценки с применением расчетно-аналитических инструментов;
- метод системного структурно-функционального анализа состояния горнотехнической системы, основанный на изучении свойств (характеристик) и связей (функций) ее подсистем и элементов, позволяющий прогнозировать

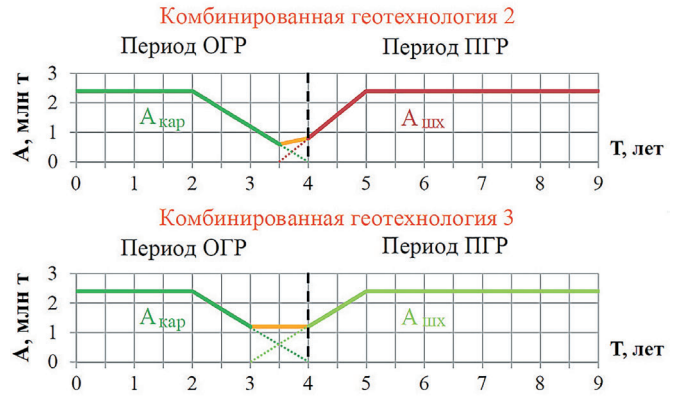
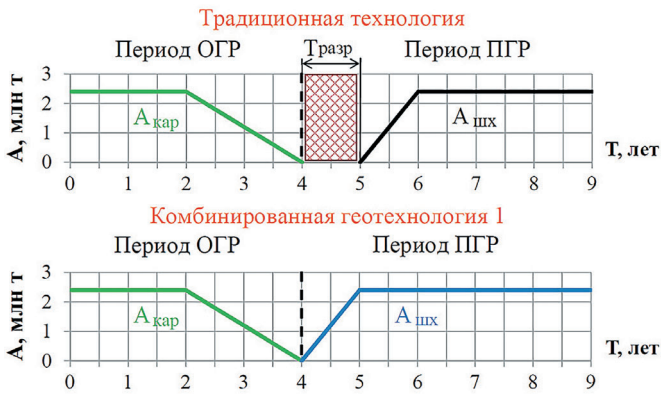


Рис. 2 Календарные графики изменения производственной мощности горного предприятия в переходный период

Fig. 2 Schedules of changes in production capacity of a mining operation in the transition period

основные параметры и показатели, определяющие эффективность принимаемых инновационных решений;

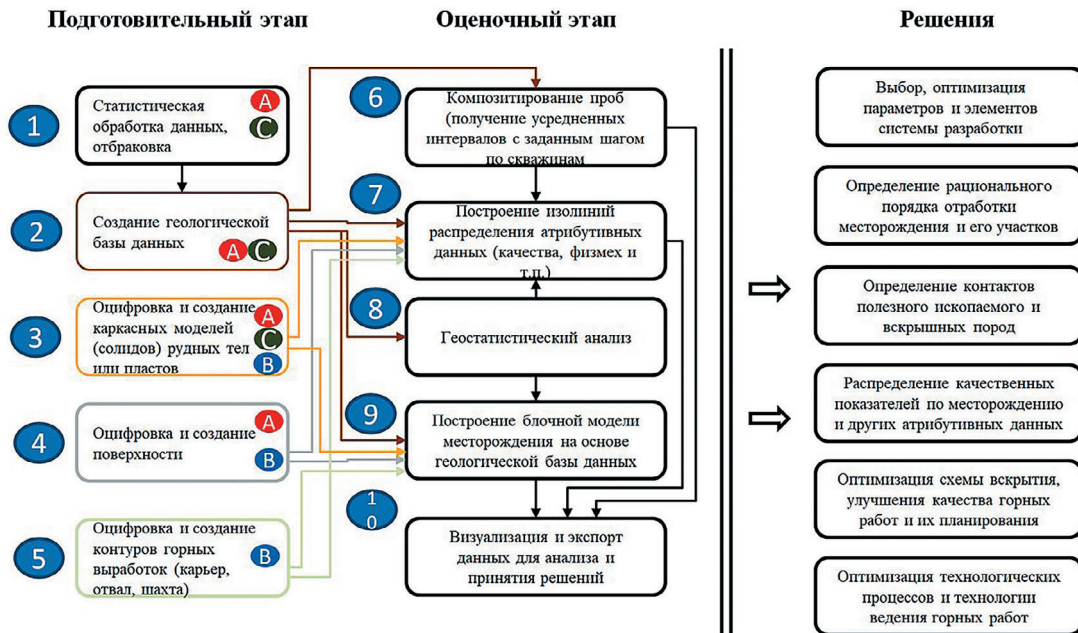
– методику определения параметров и технико-экономических показателей основных технологических процессов добычи руды (проходка выработок, отбойка, выпуск, доставка и транспортирование руды, закладочные работы) комбинированными геотехнологиями с учетом специфических горно-геологических и горнотехнических факторов.

Доказано, что ключевым мероприятием по обеспечению экономической устойчивости горного предприятия, характеризующейся непрерывностью добычи руды при стабильном превышении доходов над расходами, является изменение производственной мощности горного предприятия в изменяющихся условиях факторов внутренней и внешней среды (рис. 2).

Управление качеством извлекаемого из недр минерального сырья при проектировании и освоении запасов глубокозалегающих месторождений осуществляется с учетом изменения их качественных характеристик при нарастающей горно-геологической информации в процессе развития горных работ.

Разработанные методика и блочные модели рудных тел необходимы для подсчета запасов, обоснования условий, проектирования и планирования горных работ [26; 27]. Взаимосвязь процессов геоинформационного моделирования и технологии горных работ приведена на рис. 3.

Созданные блочные модели учитывают распределение качественных показателей и статистические характеристики полезных ископаемых, которые служат основой для:



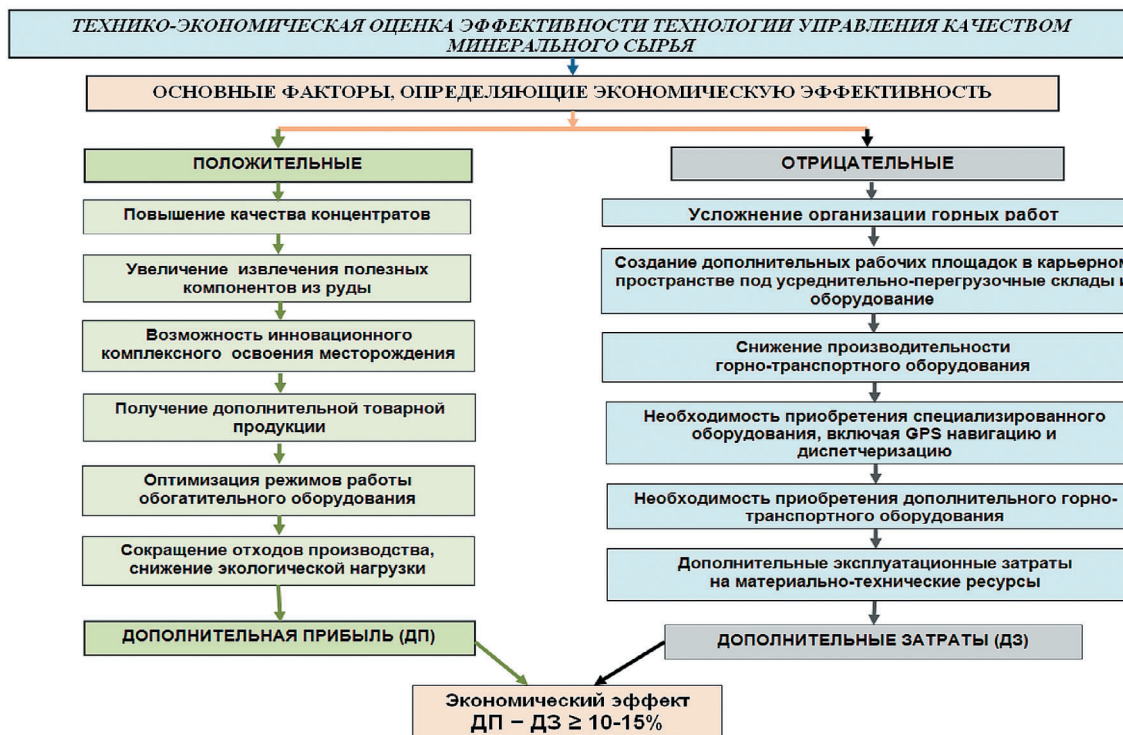
Используемые исходные данные:

- A** Данные детальной разведки (запасы, планы, контура, интервал, колонки скважин, качество и др.).
- B** Проекты, ТЭО и иные материалы (контура выработок, рельеф, параметры системы разработки и др.).
- C** Эксплуатационная разведка и оперативное опробование (детализация качества)

Рис. 3 Блок-схема методики моделирования качественных характеристик полезного ископаемого

Fig. 3 A block diagram of the methodology to model the quality characteristics of minerals





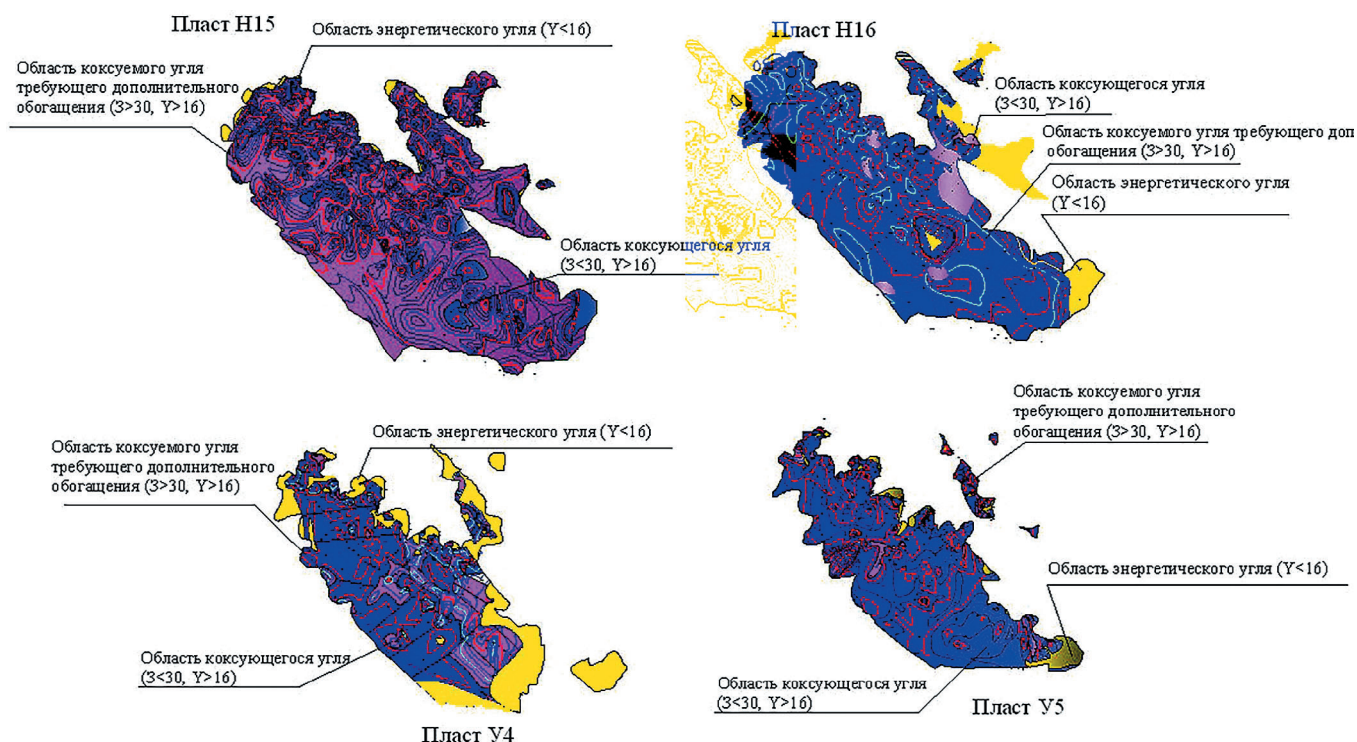
**Рис. 4**  
Схема основных факторов, определяющих экономическую эффективность от внедрения управления качеством минерального сырья

**Fig. 4**  
A schematic diagram of the key factors that determine the economic efficiency of introducing mineral grade management

- районирования в карьерном пространстве технологических типов и сортов руд;
- выбора технологических схем рудоподготовки в зависимости от изменчивости качественных показателей полезных ископаемых, наличия и содержания полезных и вредных примесей, наличия попутных и полезных компонентов в рудном теле, соотношения между сортами минерального сырья;

- повышения извлечения из недр ценных компонентов. Основой для выбора технологии рудоподготовки является экономическая оценка мероприятий по управлению качеством минерального сырья (схема приведена на рис. 4).

На рис. 5 представлены погоризонтные планы, с качественными характеристиками основных пластов Эльгинского месторождения каменного угля.



**Рис. 5**  
Зоны расположения энергетического и коксующегося каменного угля на Эльгинском месторождении

**Fig. 5**  
Locations of the thermal and coking coal at the Elginsky deposit



Моделирование и геометризация выполнены по пластичности и зольности, определяющими качество каменного угля показателям, которые служат основой для построения погоризонтных планов коксуетности углей и учитываются при планировании горных работ с выделением зон и формировании грузопотоков угля, поставляемого потребителям.

### Заключение

1. В условиях завершения переходного периода от плановой к рыночной экономике аргументирована необходимость разработки стратегии научно-технологического развития в горнодобывающих отраслях.
2. Обоснован методологический подход к решению проблем освоения недр на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности с учетом особенностей проектирования освоения новых месторождений, планирования и управления технологическими процессами на действующих горнодобывающих предприятиях.
3. Дано определение инновационного базиса как научно-технологической основы современной стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья с учетом особенностей проектирования освоения новых месторождений, планирования и управления технологическими процессами на действующих горнодобывающих предприятиях.
4. Сформулированы новые подходы к освоению недр Севера, связанные с реализацией стратегии ускоренного поэтапного освоения недр и принципа комплексного освоения территорий.
5. Сформулирован новый принцип размещения рудоподготовительных комплексов – максимальное приближение к местам выемки. Для карьеров это размещение установок сухой магнитной сепарации в прибортовой зоне или в непосредственной близости к отвалам пустых пород, для подземных рудников – организация подземных рудоподготовительных комплексов.
6. Главным показателем, характеризующим высокую степень новизны выполненных исследований, является дальнейшее развитие программно-целевого методологического подхода к исследованию проблем освоения недр путем введения принципиально нового понятия «переходные процессы» и методов учета закономерностей их развития при разработке инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья.
7. Внесен вклад в развитие основ геотехнологической стратегии освоения переходных зон при переходе от открытой к подземной или комбинированной разработке рудных месторождений.
8. Обосновано, что важным этапом разработки систем управления качеством минерального сырья является всестороннее изучение и определение контрастности качественных характеристик ПИ, выделение технологических типов и сортов руд, в том числе по данным геологоразведки, лабораторных исследований, результатов опытно-промышленных экспериментов и промышленной эксплуатации месторождений.
9. Предложена формулировка сущности методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых.

Основной целью дальнейших исследований по включенной в план института Теме I «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем», утвержденной Минобрнаукой РФ, Российской академией наук и Минфином РФ в качестве Госзадания на 2022–2024 гг., является разработка методологических основ стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем.

Основной задачей исследований является обоснование методов адаптации основных технологических процессов к изменяющимся условиям с учетом их технологической взаимосвязи между собой, а также поэтапного развития горных работ при проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий.

Основными результатами являются:

- обоснование методов установления периодичности изменения техники и технологии горных работ при поэтапной разработке глубокозалегающих месторождений;
  - установление и оценка основных факторов, влияющих на показатели горно-технологических систем при открытой, подземной и комбинированной разработке глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых;
  - разработка математического и методического инструментария для учета изменяющихся показателей транспортной системы карьера в переходных процессах (в том числе на основе компьютерного моделирования);
  - оценка условий эффективного применения комплексов циклично-поточной технологии;
  - технические решения по сбережению материальных ресурсов при производстве буровзрывных работ;
  - обоснование методов выбора технологической схемы рудоподготовки в карьере (усреднение, сортировка, селективная отработка и предобогащение) на основе оценки контрастности химических и текстурно-структурных свойств минерального сырья;
  - научное обоснование развития системы безопасности горных работ с учетом изменения условий их производства с учетом методики управления производственными рисками, основанными на контроле опасных производственных ситуаций;
  - разработка методик оценки, установление оптимальных параметров геотехнологической стратегии освоения глубокозалегающих месторождений и области применения комбинированных технологий подземной разработки месторождений бедных многокомпонентных руд.
- Дальнейшее развитие методологии комплексного освоения запасов глубокозалегающих сложноструктурных месторождений связано с необходимостью исследования взаимосвязи основных технологических процессов и методов их учета при разработке и реализации инновационных решений по адаптации горнотехнической системы предприятия к изменяющимся условиям его функционирования в динамике развития горных работ.

Методологические результаты исследований предложено учитывать в качестве научного сопровождения при разработке и реализации «Стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ на период до 2030–2050 гг.».

**Список литературы**

1. Батугин С.А., Яковлев В.Л. *Закономерности развития горного дела*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1992. 116 с.
2. Яковлев В.Л. Состояние, проблемы и перспективы развития горнодобывающей промышленности России и стран СНГ. В кн.: Яковлев В.Л. (ред.) *Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): докл. междунар. конф., г. Екатеринбург, 6–10 июля 1998 г.* Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 1998. Т. 4. С. 3–36.
3. Яковлев В.Л., Бурыйкин С.И., Стахеев Н.Л. *Основы стратегии освоения минеральных ресурсов Урала*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 1999. 279 с.
4. Яковлев В.Л., Куклин И.С. *Основные тенденции и особенности развития железорудной промышленности России в условиях рыночной экономики*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 1999. 43 с.
5. Яковлев В.Л., Гальянов А.В. *Методологические аспекты стратегии освоения минеральных ресурсов*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2001. 152 с.
6. Гальянов А.В., Яковлев В.Л. *Сырьевая база промышленного комплекса черной металлургии*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2006. 297 с.
7. Яковлев В.Л., Корнилов С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Екатеринбург: УрО РАН; 2018. 360 с. Режим доступа: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-inno-bazis.pdf>
8. Яковлев В.Л. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН; 2019. 284 с. Режим доступа: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-pereh-process.pdf>
9. Topal E., Ramazan S. Strategic mine planning model using network flow model and real case application. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2012;26(1):29–37. <https://doi.org/10.1080/17480930.2011.600827>
10. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. *Journal of Global Optimization*. 2015;63(3):555–582. <https://doi.org/10.1007/s10898-014-0185-z>
11. Samui P., Kumari S., Vladimir M., Kurup P. *Modeling in Geotechnical Engineering*. Academic Press; 2020. 516 p.
12. Samavati M., Essam D., Nehring M., Sarker R. A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem. *Omega*. 2018;81:169–182. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.10.008>
13. Nelis G., Morales N., Widzyk-Capehart E. Comparison of different approaches to strategic open-pit mine planning under geological uncertainty. In: Widzyk-Capehart E., Hekmat A., Singhal R. (eds). *Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection–MPES 2018*. Springer; 2019, pp. 95–105. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_8)
14. Вагнер Х., Феттванс Г.Б. Некоторые вопросы горной науки и технологии разработки месторождений полезных ископаемых в западных странах в начале нового столетия. *Журнал Глюкауф*2004;(1):5–63.
15. Козловский Е.А. Национальная безопасность в свете минерально-сырьевых проблем. *Маркшейдерия и недропользование*. 2011;(4):3–10; 2011;(5):3–11.
16. Яковлев В.Л. Мировые и российские тенденции в производстве и потреблении минерального сырья. *Известия вузов. Горный журнал*. 2006;(2):25–29. Yakovlev V.L.
17. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. *Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений*. Екатеринбург: Изд-во Урал ин-та; 2021. 360 с.
18. Яковлев В.Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России. *Известия вузов. Горный журнал*. 2020;(7):5–20. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-5-20>
19. Яковлев В.Л. Методологические основы стратегии инновационного развития горнотехнических систем при освоении глубоководных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):6–18. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_6](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_6)
20. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Семенкин А.В., Чендырев М.А. Перспективные технологии транспортирования для глубоких карьеров. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021;(5):518–528. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-5-518-528> Режим доступа: <https://chermetinfo.elpub.ru/jour/article/view/1473>
21. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):584–602. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601>
22. Кравчук И.Л., Неволина Е.М. Практические аспекты формирования классификации и атласа опасных производственных ситуаций. *Проблемы недропользования*. 2021;(2):27–39. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.027>
23. Яковлев А.В., Переход Т.М., Шимкив Е.С., Тыныныка Л.В. Комплексный мониторинг деформирования северо-западного борта Главного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-2):181–191. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_52\\_0\\_181](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_181)
24. Яковлев А.В., Шимкив Е.С. *Проблемы постановки уступов в предельное положение*. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021;(5-1):105–116. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_105](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_105)
25. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Научные аспекты выбора геотехнологической стратегии освоения переходных зон при комбинированной разработке рудных месторождений. *Проблемы недропользования*. 2020;(1):11–17. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.01.011>
26. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия вузов. Горный журнал*. 2021;(1):63–73. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>
27. Яковлев А.М. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):258–268. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_258](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258)

**References**

1. Batugin S.A., Yakovlev V.L. *Regularities in development of mining engineering*. Yakutsk: Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS; 1992. 116 p. (In Russ.)
2. Yakovlev V.L. Current state, challenges and prospects for the development of the mining industry in Russia and the CIS countries. In: Yakovlev V.L. (ed.) *Issues of geotechnology and subsurface science (The Melnikov Readings): Proceedings of the International Conference, Ekaterinburg, July 6–10, 1998*. Ekaterinburg: Institute of Mining of Ural Branch of RAS; 1998. Vol. 4, pp. 3–36. (In Russ.)
3. Yakovlev V.L., Burykin S.I., Stakheev N.L. *Fundamentals of strategy for the development of mineral resources of the Urals*. Ekaterinburg: Institute of Mining of Ural Branch of RAS; 1999. 279 p. (In Russ.)



4. Yakovlev V.L., Kuklin I.S. *Main tendencies and specific features in the development of the Russian iron ore industry in conditions of the market economy*. Ekaterinburg: Institute of Mining of Ural Branch of RAS; 1999. 43 p. (In Russ.)
5. Yakovlev V.L., Galiyanov A.V. *Methodological aspects of mineral resources development strategy*. Ekaterinburg: Institute of Mining of Ural Branch of RAS; 2001. 152 p. (In Russ.)
6. Galiyanov A.V., Yakovlev V.L. *Raw materials base of the ferrous metallurgy industry*. Ekaterinburg: Institute of Mining of Ural Branch of RAS; 2006. 297 p. (In Russ.)
7. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V. *Innovation basis for the strategy of integrated development of mineral resources*. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS; 2018. 360 p. (In Russ.) Available at: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-inno-bazis.pdf>
8. Yakovlev V.L. *Studies of transient processes: a new direction in development of an methodology for integrated development of georesources*. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS; 2019. 284 p. (In Russ.) Available at: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-pereh-process.pdf>
9. Topal E., Ramazan S. Strategic mine planning model using network flow model and real case application. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2012;26(1):29–37. <https://doi.org/10.1080/17480930.2011.600827>
10. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. *Journal of Global Optimization*. 2015;63(3):555–582. <https://doi.org/10.1007/s10898-014-0185-z>
11. Samui P., Kumari S., Vladimir M., Kurup P. *Modeling in Geotechnical Engineering*. Academic Press; 2020. 516 p.
12. Samavati M., Essam D., Nehring M., Sarker R. A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem. *Omega*. 2018;81:169–182. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.10.008>
13. Nelis G., Morales N., Widzyk-Capehart E. Comparison of different approaches to strategic open-pit mine planning under geological uncertainty. In: Widzyk-Capehart E., Hekmat A., Singhal R. (eds). *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection–MPES 2018*. Springer; 2019, pp. 95–105. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_8)
14. Wagner H., Fettweis G.B.L. Some issues of mining science and technology of mineral deposits development in Western countries early in the new century. *Zhurnal Gluckauf*. 2004;(1):5–63. (In Russ.)
15. Kozlovsky E.A. National security in the light of the problems of the mineral resources base. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2011;(4):3–10; 2011;(5):3–11. (In Russ.)
16. Yakovlev V.L. International and Russian trends in production and consumption of mineral raw materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2006;(2):25–29. (In Russ.)
17. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Methodology for selecting underground mining system in the combined mining of ore deposits. Ekaterinburg: Ural University; 2021. 360 p. (In Russ.)
18. Yakovlev V.L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020;(7):5–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-5-20>
19. Yakovlev V.L. Methodological framework of the strategy for innovative development of mining systems for deep-seated mineral deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5-1):6–18. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_6](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_6)
20. Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Semenkin A.V., Chendyrev M.A. Perspective transporting technologies for deep open pits. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;(5):518–528. (In Russ.) Available at: <https://chermetinfo.elpub.ru/jour/article/view/1473>
21. Zhuravlev A.G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):583–601. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601>
22. Kravchuk I.L., Nevolina E.M. Practical aspects of the formation of hazardous production situations' classification and atlas. *Problemy nedropolzovaniya*. 2021;(2):27–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.027>
23. Yakovlev O.V., Perekhod T.M., Shimkiv E.S., Tynnyka L.V. Integrated deformation monitoring of the northwestern wall of glavny open pit of EVRAZ KGOK. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5-2):181–191. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_52\\_0\\_181](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_181)
24. Yakovlev I.V., Shimkiv E.S. Problems of ultimate pit limit design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5-1):105–116. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_105](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_105)
25. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Scientific aspects of choosing the geotechnical strategy for mining of transition areas while combined mining of ore deposits. *Problemy nedropolzovaniya*. 2020;(1):11–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.01.011>
26. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021;(1):63–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>
27. Yakovlev A. M. Planning of mining operations in the quality management mode based on geoinformation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5-1):258–268. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_258](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258)

#### Информация об авторе

**Яковлев Виктор Леонтьевич** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация e-mail: yakovlev@igduran.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.09.2021  
Поступила после рецензирования: 27.10.2021  
Принята к публикации: 01.11.2021

#### Information about the author

**Viktor L. Yakovlev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: yakovlev@igduran.ru

#### Article info

Received: 30.09.2021  
Revised: 27.10.2021  
Accepted: 01.11.2021