

УДК 622.272

Соколов Игорь Владимирович

доктор технических наук,
директор,
главный научный сотрудник лаборатории
подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: sokolov@igduran.ru

Смирнов Алексей Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

**ЛАБОРАТОРИЯ ПГТ ИГД УрО РАН –
КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ
И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ
ЕЕ РАЗВИТИЯ ****Аннотация:*

Фундаментальные исследования лаборатории подземной геотехнологии посвящены проблемам и тенденциям развития подземной геотехнологии в рамках обоснования общей стратегии освоения месторождений твердых полезных ископаемых, рассмотрению горнодобывающего предприятия как горнотехнической системы. Сформулированы основные положения геотехнологической стратегии при комбинированной открыто-подземной разработке глубокозалегающих месторождений. Систематизированы способы отработки переходной зоны от открытых работ к подземным на основе показателя изолированности подземных выработок, рассмотрены варианты стратегии с использованием нисходящего и восходящего способов отработки месторождения и с подземным обогащением руды. Определено понятие переходного процесса в данной стратегии. Детально рассмотрены технологические аспекты разработки месторождения: вскрытие запасов, технология подземной добычи руды, массовая отбойка руды, подземный обогатительный комплекс. Приведены результаты прикладных исследований лаборатории (НИР, проекты, регламенты).

Ключевые слова: подземная геотехнология, стратегия освоения месторождения, горнотехническая система, комбинированная разработка, вскрытие, технология добычи, взрывная отбойка, обогащение.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.014

Sokolov Igor V.

Doctor of Engineering Sciences,
Director,
Chief Researcher of the Laboratory
of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: sokolov@igduran.ru

Smirnov Alexey A.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

**LABORATORY OF UNDERGROUND
GEOTECHNOLOGY, INSTITUTE OF
MINING OF UB OF RAS, AND
COMPREHENSIVE RESEARCH OF
UNDERGROUND GEOTECHNOLOGY AND
CURRENT TRENDS IN ITS DEVELOPMENT***Abstract:*

The fundamental research of the laboratory of underground geotechnology is devoted to the problems and trends in the development of underground geotechnology in the framework of substantiating the general strategy of mineral deposits mining, considering a mining enterprise as a mining technical system. The paper formulates main points of the geotechnological strategy for the combined open and underground mining of deep deposits. It systematizes methods for mining the transition zone from open-pit to underground mining based on the indicator of isolation of underground workings, and it considers strategy options using descending and ascending methods of deposit mining, as well as with underground ore processing. We define here the concept of the transition process in mining strategy and consider in detail technological aspects of deposit mining: opening of reserves, technology of underground mining, mass ore breaking, and underground processing plant. The article gives the results of applied research of the laboratory (research work, projects and regulations).

Key words: underground geotechnology, mining strategy, mining technical system, combined mining, opening, mining technology, explosive ore breaking, ore processing.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки №075-00412-22 ПП, тема 1. FUWE-2022-0005.

Лаборатория подземной геотехнологии (ПГТ) является наследницей созданной еще в 1960 г. в составе Горно-геологического института УФАН лаборатории подземной разработки рудных месторождений под руководством сначала К.В. Кочнева, а затем Л.Е. Зубрилова. После образования Института горного дела и перехода в МЧМ СССР из лаборатории были выделены лаборатория комбинированной разработки, сектор крепления, сектор механизации, лаборатория систем с закладкой. Тематикой исследования были все аспекты подземной разработки месторождений черных металлов Урала и Казахстана. Лабораторией руководили Б.М. Шульмин, В.А. Шестаков, А.А. Смирнов, О.В. Славиковский.

Переломным моментом в середине 90-х годов явился переход Института в РАН и приход в лабораторию подземной геотехнологии д.т.н. Ю.В. Волкова с группой научных сотрудников из Института «Унипромедь». Юрию Владимировичу удалось в относительно короткий срок установить связи с горнодобывающими предприятиями, а главное, создать творческий научный коллектив, способный решать сложные задачи развития современной подземной технологии добычи руд. В этот период были выполнены научно-исследовательские и проектные работы по подземной технологии освоения Гайского, Узельгинского, Молодежного меднорудных, Северопесчанского железорудного, Саткинского магнетитового месторождений, что позволило повысить научный авторитет лаборатории и укрепить ее финансовое положение. Надо отметить, что в это время были защищены кандидатские диссертации И.В. Соколовым, В.Д. Камаевым, Ю.Г. Антипиным.

Под научным руководством Ю.В. Волкова в лаборатории стали проводиться фундаментальные научные исследования в области комбинированной разработки месторождений. Результаты этих исследований были успешно реализованы в нескольких крупных прикладных исследовательских и проектных работах, прежде всего по развитию шахты Магнетитовая, доработке запасов на Молодежном руднике, шахте Естюнинская, в цикле регламентов по отработке кимберлитовых трубок на руднике «Удачный». За работу «Разработка и широкая промышленная реализация комбинированных технологий комплексного освоения медноколчеданных месторождений Урала» Волков Ю.В. удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2002 г.

С 2010 г., когда заведующим лабораторией стал И.В. Соколов (защитил докторскую диссертацию в 2012 г.), тематика фундаментальных работ была углублена и расширена. Под его научным руководством (отв. исп. к.т.н. А.А. Смирнов, к.т.н. Ю.Г. Антипин) наряду с продолжением решения проблем комбинированной отработки месторождений большое внимание было уделено вопросам подземной геотехнологии в общей геотехнологической стратегии освоения месторождений, рассмотрению горнодобывающего предприятия как горнотехнической системы (ГТС).

Были сформулированы основные положения геотехнологической стратегии (рис. 1) освоения месторождения при комбинированной открыто-подземной разработке глубокозалегающих запасов, заключающиеся в решении следующих задач:

- разработка концепции освоения запасов (наращивание или поддержание производственной мощности рудника);
- установление схемы комбинированной разработки (последовательная, параллельная) месторождения в зависимости от принятой концепции;
- определение производственной мощности подземного рудника по горным возможностям и ее сравнение с мощностью карьера;
- определение направления развития горных работ в пространстве (нисходящий, восходящий, их сочетание) и порядка отработки подземных запасов (этажный, многоэтажный, ярусный), обоснование количества этажей в одновременной отработке;
- обоснование способов и схем вскрытия запасов и транспорта горной массы, технологии очистной выемки и способа погашения выработанного пространства;

- установление рационального места размещения обогатительного комплекса на земной поверхности или под землей, определение места утилизации отходов горно-обогатительного производства (поверхность, карьер, подземное выработанное пространство);

- технико-экономическая оценка вариантов стратегии.

Для классификации вариантов стратегии впервые было выдвинуто принципиальное положение о степени *изолированности* подземных выработок от карьерного пространства. Это позволило систематизировать способы отработки переходной зоны от открытых работ к подземным и количественно учесть влияние специфических факторов, действующих в период этого перехода (повышенное горное давление в прикарьерной части месторождения, активные аэродинамические и гидравлические связи между подземными выработками и карьером).



Рис. 1. Блок-схема формирования геотехнологической стратегии отработки подземных запасов при комбинированной разработке месторождений

Кроме этого, одним из перспективных вариантов стратегии является восходящий способ отработки месторождения. Восходящая выемка подземных запасов устраняет недостатки как *параллельной*, так и *последовательной* схем и дает возможность использовать преимущества открытого и подземного способов разработки путем их разобщения в пространстве и (или) во времени. При этом изоляция подземных горных выработок от карьерного пространства сохраняется весь период разработки месторождения, а граница переходной зоны (предельная глубина карьера) определяется по фактическому положению открытых и подземных горных работ на конец разработки месторождения.

Другим важным положением исследований принято представление горнодобывающего производства как единой горнотехнической системы, что позволяет оценить все технические решения с позиций наибольшей эффективности работы предприятия за весь период его деятельности. Такой подход предполагает совместное рассмотрение процессов добычи и переработки руды с целью наиболее полного извлечения запасов из недр и полезного компонента из руды. В современных условиях все более важное значение приобретает обеспечение экологической безопасности производства.

Таким образом, при выполнении исследований лаборатории ПГТ основными принципами выбора геотехнологической стратегии и отдельных технологических решений для конкретных случаев являются системность исследований, комплексность цели и задач, оптимальность результатов, принцип «более чистого производства» (*Cleaner Production*), комбинирование (рациональное сочетание) технологических процессов различных способов добычи и переработки, инновационность геотехнологий, промышленная и экологическая безопасность производства. Выполнение такого комплекса работ предполагает широкое использование экономико-математического моделирования на основе составления соответствующих компьютерных программ.

Наряду с выполнением фундаментальных исследований лаборатория выполнила значительный объем прикладных работ (НИОКР, проектов, регламентов). При этом характерным является использование в этих работах результатов фундаментальных исследований. В свою очередь, при проведении фундаментальных исследований теоретические расчеты выполнялись на примере отработки конкретных месторождений.

Детально исследования лаборатории можно представить по отдельным разделам (отв. исп. к.т.н. А.А. Смирнов, к.т.н. Ю.Г. Антипин).

Вскрытие подземных запасов (исп. И.В. Никитин и др.). Повсеместное применение на рудниках самоходного технологического оборудования дает возможность перейти от традиционной погоризонтной схемы отработки рудных тел к пространственно-объемной с использованием наклонных вскрывающих и подготовительных выработок, а в ряде случаев и наклонных очистных камер. С использованием данного принципа исследованы и систематизированы варианты вскрытия подземных запасов с использованием карьерного пространства по признакам: *тип* (вертикальный или наклонный стволы, транспортный автомобильный уклон) и *место* (земная поверхность или карьер) *заложения главных вскрывающих выработок* и *тип и место заложения вспомогательных вскрывающих выработок*. Неотъемлемой частью конструирования варианта вскрытия является выбор способа подъема и внутришахтного транспорта руды, а также схемы вентиляции рудника.

Для обоснования оптимальных вариантов вскрытия в лаборатории разработаны экономико-математические модели, состоящие из методики расчета технико-экономических показателей, блок-схемы и компьютерной программы, позволяющей выбрать эффективный вариант по критериям суммарных капитальных и эксплуатационных затрат. На основании расчетов для конкретных условий определялся тип основных вскрывающих выработок (вертикальные стволы, транспортные уклоны, их комбинация и др.), схемы их расположения в пространстве, тип внутришахтного транспорта и схемы пере-

мещения руды и породы. Также установлено влияние *горно-геологических* (угла падения, мощности, глубины распространения рудного тела) или *специфических* (схема комбинированной разработки, глубины карьера) факторов на выбор вариантов вскрытия и их систематизацию.

Результаты исследований широко реализованы в прикладных работах по выбору схем вскрытия при отработке глубоких горизонтов Молодежного, Естюнинского, Саткинского, Сарбайского, Тарыннахского, Воронежского месторождений, подкарьерных запасов трубки «Удачная».

Технология подземной добычи руды (исп. к.т.н. К.В. Барановский и др.). Объектом исследований лаборатории в значительной степени являются два класса систем разработки: системы с массовым обрушением руды и системы с закладкой выработанного пространства. Особенностью их применения при комбинированной разработке является как использование карьерного пространства и оборудования, так и необходимость изолированности подземных очистных выработок различными способами (рудными и искусственными целиками, массивами пород в разрыхленном состоянии, специальными инженерными сооружениями в карьере). Для этого созданы соответствующие экономико-математические модели, учитывающие специфические условия разработки конкретных месторождений.

Низкозатратные и высокопроизводительные системы с массовым обрушением перспективны для отработки мощных месторождений относительно бедных руд. При применении мощного самоходного оборудования одной из задач является обеспечение устойчивости выработок выпуска на весь период добычи больших объемов руды. Решение этой задачи было реализовано при выполнении регламентов для проекта отработки трубки «Удачная». Предложенные схемы оформления днищ добычных блоков обеспечивали их достаточную устойчивость при выпуске до 100 тыс. т руды на одну выпускную выработку, высокую производительность погрузо-доставочных машин и необходимую интенсивность подготовки добычных блоков. Полученные наработки были использованы при проектировании подземных работ на Сарбайском и Тарыннахском рудниках, а позднее для отработки глубокозалегающих запасов Донского хромитового месторождения.

С другой стороны, актуальной проблемой для систем с обрушением является обеспечение достаточно высокого извлечения запасов в условиях разреженной сетки точек выпуска отбитой руды под обрушенными налегающими породами. Разработанные в лаборатории методики и программы позволяют рассчитывать показатели извлечения руды (потери и разубоживание) в зависимости от горно-геологических условий, схем отбойки руды, параметров расположения выработок выпуска и порядка выпуска.

Совместное рассмотрение показателей подземной добычи и обогащения руды позволили составить экономико-математические модели и программы по расчету объемов всех продуктов деятельности подземного рудника (товарной продукции и всех видов отходов горно-обогажительного производства), и на этой основе обосновывать экономически оптимальную степень извлечения полезных компонентов из балансовых запасов руд. Соответствующие прикладные работы были выполнены для Гайского подземного рудника и шахты Естюнинская.

Применение систем с обрушением для отработки переходной зоны выдвигает задачу изоляции подземных выработок от влияния негативных факторов, действующих в прикарьерном пространстве. Такая задача была решена для рудника «Удачный» путем образования над переходной зоной предохранительной подушки из раздробленной пустой породы или отбитой руды. Проведенные теоретические исследования позволили рассчитать толщину подушки, исходя из необходимости защиты горизонта выпуска добычных блоков от действия удара обрушающихся пород бортов карьера, предотвращения активных аэродинамических связей между карьером и выработками рудника, термо-

изоляции подземных выработок. При этом учитывалось, что на режим вентиляции рудника существенное влияние оказывает выработанное пространство карьера, в том числе его глубина, и температура наружного воздуха. Были разработаны рекомендации по способу образования предохранительной подушки, реализованные в процессе ведения горных работ на руднике. Полученные результаты были также использованы при выполнении регламентов по обоснованию подземной геотехнологии для Сарбайского рудника.

При исследовании систем с закладкой особое внимание было уделено вопросам снижения экологической нагрузки на окружающую среду за счет размещения основного объема отходов горного и обогащательного производства в подземном выработанном пространстве. Наиболее детально этот вопрос был проработан при выполнении НИР для освоения Воронежского железорудного месторождения, где были рассчитаны все объемы хвостов обогащения и пустых пород и определен порядок ведения подземных горных работ, обеспечивающий полное размещение всех отходов в отработанных камерах рудника.

Для специфических условий отработки мощных пологопадающих месторождений (Медвежий ручей, Малый Куйбас) лабораторией разработаны варианты комбинированной системы разработки, совмещающие элементы систем с обрушением налегающих пород, и камерных систем с сухой закладкой. Такие системы позволяют экономически эффективно вести добычу бедных руд при достаточно высоких показателях их извлечения. Особенностью этих вариантов является широкое использование погрузо-доставочных машин с дистанционным управлением, что существенно повышает безопасность работ.

Кроме того, в прикладных работах лаборатории достаточно большое внимание уделено разработке подземной технологии отработки месторождений ценных руд: золоторудных Ветренского и «Джульетта», Урупского меднорудного, Сарановского хромитового, Квайсинского свинцово-цинкового, Краснокаменского уранового, Кти-Тебердинского шеелитового.

Подземное обогащение руды (исп. к.т.н. А.А. Смирнов, Н.В. Гобов, Ю.М. Соломеин и др.). Требования экологической безопасности горного производства логично привели к необходимости рассмотрения целесообразности переноса обогащательного передела руды в подземное пространство. Известно, что обогащательные фабрики и сопутствующая им инфраструктура (коммуникации, склады руды и продуктов обогащения, шламохранилища, отвалы хвостов) оказывают существенное негативное влияние на окружающую среду не только за счет задалживания значительных площадей земли, но и за счет существенного пылеобразования и отрицательного воздействия на водные ресурсы. Подземное обогащение руды в сочетании с размещением хвостов обогащения в выработанном пространстве позволяет существенно сократить или даже полностью ликвидировать действие этих вредных факторов.

Отличие выполненных в лаборатории исследований от других подобных работ заключается в глубине проработки всех аспектов использования подземных обогащательных комплексов (ПОК) при отработке железорудных месторождений. Прежде всего была выбрана современная схема полного обогащения руды и цепь выпускаемых серийно механизмов и аппаратов для всего цикла обогащения. Это позволило рассчитать необходимую номенклатуру и объем подземных камер для размещения обогащательного комплекса, а также их компоновку в подземном пространстве. Также учтены коммуникации для доставки обогащательного оборудования, транспорта добытой руды и отходов обогащения. Анализ процесса использования хвостов обогащения, в том числе шламов, для закладки очистных камер показал целесообразность введения в состав ПОКа отделения обезвоживания хвостов.

Для рудника мощностью 5 – 6 млн т руды в год рассчитаны объемы промпродукта и товарной продукции, всех видов хвостов обогащения, что позволило определить на основе технико-экономического сравнения рациональные схемы их перемещения с

использованием различных видов транспорта. Установлено, что объем подземных выработок для размещения ПОКа примерно равен объему горнокапитальных выработок подземного рудника, а стоимость строительства ПОКа сопоставима или даже ниже стоимости строительства поверхностного обогатительного комплекса такой же мощности.

Работы лаборатории показали, что применение ПОКа целесообразно при разработке глубоких горизонтов Естюнинского месторождения, освоения Тарыннахского и Воронежского месторождений, что дает возможность резко сократить занимаемые площади земной поверхности, практически ликвидировать экологическое воздействие процесса обогащения, сократить экологические платежи.

Кроме того, на примере шахты Естюнинская проработаны варианты стратегии, базирующиеся на комбинированном нисходяще-восходящем способе отработки с использованием ПОКа, и выполнена их оценка по комплексному эколого-экономическому критерию. Установлена область оптимального применения ПОКа в зависимости от горно-геологических условий и мощности рудника.

Сделан вывод, что для организации замкнутого цикла горно-обогатительного производства с размещением всех отходов, образуемых в рамках данной ГТС, под землей, рационально сочетание восходящей камерной выемки с сухой закладкой при освоении нижних этажей яруса и традиционной нисходящей выемки системами с обрушением при освоении верхних этажей. Производственная мощность этажей в ярусе определяется по условию организации замкнутого цикла, т.е. объем выработанного пространства камер должен быть равен суммарному объему породы от проходческих работ и хвостов обогащения, используемых для закладки камер.

Исследования по обеспечению эффективности отработки Кыштымского месторождения кварца (исп. к.т.н. К.В. Барановский, к.т.н. А.А. Рожков и др.). Кыштымский подземный рудник является единственным в России стабильным источником сырья (высокоочищенных кварцевых концентратов) для инновационных отраслей отечественной промышленности. Долголетнее творческое сотрудничество лаборатории ПГТ с коллективом предприятия, отраженное в ряде исследовательских и проектных работ, позволило обеспечить надежное и эффективное функционирование рудника. Лабораторией обоснована и запроектирована камерная система разработки, успешно применяющаяся сейчас для выемки запасов кварца.

В 2014 – 2016 гг. лабораторией по ФЦП Минобрнауки России была выполнена работа «Создание комплексной инновационной геотехнологии подземной добычи и переработки высокоценного кварца». Комплексные исследования, включающие анализ, патентный поиск, теоретические изыскания, математическое моделирование и опытно-промышленные испытания в натуральных условиях Кыштымского рудника, позволили получить следующие результаты:

1. Разработан вариант комбинированной системы разработки с сочетанием систем с открытым очистным пространством и с обрушением руды, с податливыми трапециевидными целиками и выпуском руды из подконсольного пространства. Данная система позволила сократить потери кварца в недрах вдвое, обеспечить надежное выполнение всех технологических операций и эффективность добычи руды с учетом действия напряженно-деформированного состояния горного массива, а также сократить выход некондиционной фракции добытого кварца с 22 до 12 %.

Особенности технологии получения высокоочищенных кварцевых концентратов не позволяют обогащать кварц фракции -20 мм. Эта фракция является некондиционной, отделяется на стадии грохочения добытого кварца и фактически может быть отнесена к потерям. Переизмельчение кварца происходит при его массовой отбойке и достигает 22 % от объема всего добытого сырья.

Теоретические исследования и проведенное физическое моделирование показали, что совместный взрыв зарядов веера скважин следует рассматривать как взрыв плоской

системы зарядов, действие которого кардинально отличается от действия взрыва одиночного удлиненного заряда. Это положение было экспериментально подтверждено при проведении опытных взрывов в очистных камерах рудника. На основании данных исследований была составлена методика расчета параметров буровзрывных работ для веера скважин, явившаяся основой для составления программы опытно-промышленных испытаний массовой отбойки кварца. Для снижения выхода переизмельченной некондиционной фракции была теоретически обоснована и разработана конструкция скважинного заряда с воздушными промежутками. В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований были разработаны рекомендации по рациональным параметрам массовой отбойки кварца: при скважинах диаметром 65 мм и удельном расходе ВВ 0,9 кг/м³ выход некондиционной фракции составляет около 12 %, а выход негабаритных кусков размером более 700 мм – до 8 %.

2. Определены возможности технологических процессов получения высокоочищенных кварцевых концентратов путем удаления структурных примесей из обогащаемого кварца на стадии рудоподготовки и предварительного обогащения. Снижения выхода отходов кварца при его обогащении на треть (с 16 до 10 %) можно достичь применением методов обогащения, основанных на комплексировании процессов грохочения, оптической и рентгенорадиометрической сепарации и рудосортировочного комплекса на базе испытанного в процессе выполнения данного проекта экспериментального рентгенорадиометрического сепаратора.

3. Созданы научно-технологические основы комплексной геотехнологии добычи и переработки высокоценного кварца на основе комбинированной системы разработки, специальной технологии взрывной отбойки, предварительной рентгенорадиометрической сепарации, обеспечивающей кардинальное снижение потерь кварца в недрах и при обогащении добытого сырья.

Вопросы безопасности подземных горных работ в разной степени учитываются во всех выполняемых работах лаборатории ПГТ. Кроме того, в разное время были разработаны регламенты безопасности производственных процессов добычи руды для Гайского, Узельгинского рудников, шахты «Магнетитовая», рудника «Медвежий ручей».

В последние годы **фундаментальные исследования** лаборатории посвящены изучению переходных процессов при обосновании геотехнологической стратегии освоения глубокозалегающих рудных месторождений. Обоснован методологический подход к оценке переходных процессов при комбинированной разработке месторождений, базирующийся на комплексном учете горно-геологических, горнотехнических и эколого-экономических факторов и условий, сформированных на этапе завершения открытых горных работ, управлении факторами, действующими в переходной зоне, с целью создания оптимальных условий для освоения запасов в новом стабильном периоде подземных горных работ. Уточнено понятие стратегии освоения месторождения как долгосрочный план взаимоувязанных мероприятий, включающий оптимизацию интенсивности вскрытия, очистной выемки и погашения запасов переходной зоны, и создание оптимальных условий для освоения основных подземных запасов с целью достижения стабильного состояния горнодобывающего предприятия при минимально возможном снижении его доходности в переходный период.

Определено понятие *переходного процесса* при разработке рудных месторождений как процесс освоения (вскрытие, очистная выемка и погашение) запасов *переходных зон*, в пределах которых осуществляется *переход* от одного стабильного состояния горнодобывающего предприятия к другому, характеризуемый двумя признаками – скачком величин производительности предприятия и капитальных вложений.

Определены специфические условия, сформированные на предыдущем этапе освоения месторождения, влияющие на выбор технологии отработки переходной зоны подземным способом. При переходе от карьера к подземным работам это схема комби-

нированной разработки (последовательная или параллельная); наличие карьера, его техническое состояние; пространственное расположение прибортовых и подкарьерных запасов относительно карьера; способ погашения выработанного пространства карьера; климатические условия; наличие водоносных горизонтов в покрывающих породах; повышенное горное давление; наличие и техническое состояние технологического оборудования карьера. При переходе к новому шагу освоения месторождения это способ (этажный или ярусный) и порядок (нисходящий или восходящий) отработки в новом шаге; схема и способ вскрытия, состояние вскрывающих выработок в предыдущем шаге; наличие междуэтажных (междуярусных) целиков, охранных целиков общешахтного назначения, их техническое состояние; система разработки в предыдущем шаге; тип и состояние погашенного выработанного пространства (изолированная пустота, закладочный массив, массив обрушенных пород) в предыдущем шаге; схема и способ транспортирования горной массы в предыдущем шаге; наличие новых апробированных способов и методов вскрытия и добычи руды, современной геотехники.

Систематизированы в зависимости от стадии освоения месторождения подземным способом *постоянные* и *специфические* горно-геологические и технологические факторы, влияющие на формирование вариантов стратегии. Это производственная мощность подземного рудника; глубина карьера и глубина распространения запасов относительно него; продолжительность и объемы добычи руды при доработке карьера; параметры породного отвала в карьере; наличие активных аэродинамических и гидравлических связей между подземным рудником и карьером; уровень горного давления в конструктивных элементах (целиках, потолочинах, днищах) системы разработки; величина водопритоков; степень и способ изоляции подземных выработок от карьера; параметры и производительность транспортной системы карьера.

Проведена классификация типов переходных зон при подземной разработке рудных месторождений по следующим признакам: стадия освоения месторождения подземным способом и объект освоения в переходный период – и определены основные принципы конструирования вариантов стратегии. Обоснован критерий оценки вариантов стратегии – минимум снижения доходности горнодобывающего предприятия в период перехода от одного стабильного состояния к другому, который достигается путем оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат с учетом специфических факторов и условий, сформированных на предыдущем этапе освоения месторождения.

Определены типы (микро- и макро-) и методы (резервирование, диверсификация, увеличение выпуска продукции, технологическая модернизация, организационная реструктуризация) адаптации ГТС горного предприятия к изменяющимся горно-геологическим, горнотехническим, экономическим и экологическим условиям подземной разработки месторождений, отличающиеся задачами и масштабом мероприятий с целью обеспечения его экономической устойчивости.

Предложены перспективные технологические схемы освоения переходных зон, основанные на рациональном сочетании технологических процессов открытых и подземных горных работ. Для этих технологических схем разработаны комбинированные геотехнологии, основанные на камерной выемке и использовании энергоэффективных комплексов самоходных машин, карьерного оборудования и транспортных коммуникаций, позволяющие по сравнению с традиционной подземной геотехнологией повысить показатели полноты и качества извлечения руды из недр, увеличить производительность труда по системе разработки, утилизировать пустые породы как в карьерном, так и в подземном выработанном пространстве.

Разработан метод структурно-функционального анализа горнотехнической системы, позволяющий прогнозировать ее состояние при изменении действующих в переходный период постоянных и специфических факторов. Построены расчетные графические модели и сформирована система параметров и показателей, отражающих способ

функционирования, существенные характеристики и связи (функции) основных элементов и подсистем в переходный период.

Перспективы развития подземной геотехнологии на ближайшее 10-летие в основном связаны с переходом к новому технологическому укладу горного производства, включающему модернизацию геотехнологии и геотехники на основе интеграции цифровых систем управления: применение автоуклонов или штолен в сочетании со вспомогательными министволами при вскрытии запасов за предельными контурами карьеров; замена многофункциональных вертикальных стволов моностволами; расширение области применения автомобильного транспорта и использование новых видов универсальных транспортных средств на основе аккумуляторных батарей; применение комбинированных геотехнологий, основанных на использовании изолирующих массивов, карьерного оборудования и транспортных коммуникаций; строительство подземных обогатительных комплексов с полным или частичным обогащением и утилизацией отходов в выработанном пространстве. Внедрение автоматизированных комплексов горных машин и оборудования позволит увеличить их производительность до 30 %, снизить затраты на техобслуживание до 60 % и сократить количество рабочего персонала в 2 – 3 раза.

По результатам исследований лаборатории ПГТ за последние 10 лет издана монография «Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений» (авторы Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В.), опубликовано более 120 статей, получено 10 патентов РФ на изобретения.

Следует отметить существенный вклад в результаты работы лаборатории молодых научных сотрудников к.т.н. К.В. Барановского, к.т.н. А.А. Рожкова, И.В. Никитина, Ю.М. Соломеина, выросших в процессе выполнения исследований в высококвалифицированных специалистах горного дела. Нужно сказать, что при выполнении работ лаборатория ПГТ тесно сотрудничает с другими лабораториями Института, прежде всего с отделом геомеханики, а также поддерживает творческие контакты с сотрудниками ИПКОН РАН, УГГУ, МГТУ, горнодобывающих предприятий.

Цикл научных работ Соколова И.В. «Исследование процессов и разработка подземных геотехнологий освоения переходных зон при комбинированной разработке месторождений» в 2016 г. отмечен Почетным дипломом УрО РАН им. академика Л.Д. Шевякова. Постановлением Президиума РАН в 2022 г. за научную работу «Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья» В.Л. Яковлеву, С.В. Корнилкову, И.В. Соколову присуждена премия им. Н.В. Мельникова.