ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(3-1):338-350
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.272.06:622.627.2 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-338-350

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ОСВОЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

И.В. Соколов[1], Ю.Г. Антипин[1], Н.В. Гобов[1], И.В. Никитин[1]

[1] Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

Аннотация: На основе анализа принципов проектирования и практики освоения рудных месторождений подземным способом установлены наиболее существенные особенности, тенденции развития и направления совершенствования подземной геотехнологии в области вскрытия и подготовки, систем разработки, закладочных работ и рудоподготовки. Выделены основные признаки инновации: научные исследования как основа и внедрение в производство с целью увеличения ценности. Предложены разные подходы к разработке инновационных подземных геотехнологий и сформулирована методология их обоснования, базирующейся на системном подходе, реализуемом в рамках концепции комплексного освоения недр и на принципах экономической эффективности, промышленной и экологической безопасности, полноты освоения недр. Приведен опыт ИГД УрО РАН по разработке и внедрению инновационных подземных геотехнологий при проектировании и промышленной эксплуатации ряда рудных месторождений, позволивший существенно повысить полноту и качество извлечения руды из недр, увеличить производительность труда на проходческих и очистных работах, снизить капитальные и эксплуатационные затраты на добычу руды и утилизировать отходы горно-обогатительного производства в выработанном пространстве.

Ключевые слова: рудное месторождение, подземная геотехнология, инновация, тенденции развития, способ вскрытия, система разработки, экономическая эффективность, экологическая безопасность.

Благодарность: Исследования выполнены в рамках государственного задания №075—00581—19—00 по Теме №0405—2019—0005.

Для цитирования: *Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Гобов Н.В., Никитин И.В.* Опыт разработки инновационных подземных геотехнологий освоения рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 338–350. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-338-350.

Experience in the development of innovative underground geotechnologies for mining of ore deposits

I.V. Sokolov[1], Y.G. Antipin[1], N.V. Gobov[1], I.V. Nikitin[1]

[1] The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract: Based on an analysis of the design principles and practice of underground mining of ore deposits, the most significant features, trends to develop and directions to enhance of underground geotechnology in the field of opening and preparation, mining systems, filling works and ore preparation have been established. The main signs of innovation — scientific research and implementation in production in order to obtain additional value, are highlighted. Various approaches to the development of innovative underground geotechnologies are shown and a methodology for their justification is formulated based on a systematic approach implemented in the framework of the concept of integrated development of mineral resources and on the principles of economic efficiency, industrial and environmental safety, completeness of subsoil development. The experience of the IM UB RAS on the development and implementation of innovative underground geotechnologies in the design and industrial operation of a number of ore deposits is given, which significantly increased the completeness and quality of ore extraction from the subsoil, increased labor productivity in sinking and stoping works, reduced capital and operating costs for ore mining and to utilize mining and processing waste in the mined-out space.

Key words: ore deposit, underground geotechnology, innovation, trends to develop, method of opening, mining system, economic efficiency, environmental safety.

Acknowledgments: the Research was carried out within the framework of the state task # 075-00581-19-00 on the Topic # 0405-2019-0005.

For citation: Sokolov I.V., Antipin Y.G., Gobov N.V., Nikitin I.V. Experience in the development of innovative underground geotechnologies for mining of ore deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):338-350. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-338-350.

Введение

Современные требования государства и общества при освоении георесурсов заключаются в обеспечении горнодобывающими предприятиями максимальной результативности не только в виде экономического эффекта (прибыли) от эксплуатации месторождения или его части, но и в экологической безопасности производства [1].

Достижение указанных требований возможно только на основе создания инновационных геотехнологий, всесторонне учитывающих особенности освоения месторождения и включающих научно обоснованные технологические и организационно-технические решения, позволяющие существенно повысить полноту и качество извлечения руды из недр, увеличить производительность труда на проходческих и очистных работах, снизить капитальные и эксплуатационные затраты на добычу руды и утилизировать отходы горно-обогатительного производства в выработанном пространстве.

В связи с этим, в настоящей статье дана характеристика инновации и представлен опыт ИГД УрО РАН по разработке и успешному внедрению инновационных подземных геотехнологий при проектировании и освоении рудных месторождений.

Особенности освоения месторождений подземным способом

Анализ принципов проектирования и условий эксплуатации рудных месторождений подземным способом [2–6] позволил установить его наиболее существенные особенности:

1. Подготовка проектов на разработку месторождений сопровождается использованием неполной или неточной информации, в том числе исходных данных и результатов, что потенциально может привести к возникновению в процессе реализации проекта неблагоприятных последствий. Эффективность разработки месторождения во многом зависит от степени обоснованности величины производственной мощности предприятия как важнейшего горнотехнического фактора.

2. Реализация проектов на разработку месторождения требует боль-

ших начальных капитальных вложений на ввод рудника в эксплуатацию, при этом продолжительность строительства рудника обычно составляет 5—10 лет. Значительные капитальные затраты и сроки строительства обуславливают высокий срок окупаемости инвестиций, напрямую сказывающийся на надежности получения предприятием прибыли.

3. Функционирование горнодобывающих предприятий осуществляется длительный период времени (срок отработки среднего по запасам рудного месторождения составляет более 20 лет). При таком значительном сроке существования предприятия весьма низка достоверность прогноза основных его технико-экономических показателей. Кроме этого, в процессе эксплуатации месторождения необходимо развитие и поддержание мощностей предприятия за счет дополнительных капитальных затрат. Как правило, данные затраты в целом превышают первоначальные капитальные вложения.

4. Современная экологическая ситуация, обусловленная деятельностью горнодобывающих предприятий, характеризуется непрерывным накоплением огромного количества отходов производства, размещаемых на поверхности земли, что приводит к сильному загрязнению природной среды.

Признаки инновации

Решение задачи инновационного развития российского минерально-сырьевого комплекса заключается в создании эколого-ориентированных, ресурсосберегающих, автоматизированных, эффективных и безопасных геотехнологий на основе результативного взаимодействия горной науки и производства. Инновационная геотехнология должна пройти следующий путь: «инвестиции — разработка — внедрение — получение дополнительной ценности (прибыль, лидерство, приоритет)». Видно, что основой и главным признаком инновации являются научные исследования. Однако сам по себе результат научных исследований, обладающий технической новизной, не является инновацией, пока не будет внедрен и не начнет приносить пользу. Следовательно, вторым признаком, определяющим инновацию, является внедрение в производство с целью извлечения выгоды.

Следует отметить, что существует некоторый временной срок, по истечению которого геотехнология переходит сначала в разряд «трансферта технологий», затем становится традиционной. Так, например, внедрение на подземных рудниках самоходного оборудования, даже автоматизированного, едва ли можно считаться инновацией. Между тем эффективное и безопасное ее применение невозможно без соответствующей модернизации, причем как отдельных технологических процессов, так и основных подсистем (вскрытие и очистная выемка) подземного рудника. Именно здесь, на наш взгляд, открывается широкое поле для создания инноваций.

Объекты и методология создания инновационных геотехнологий

Обоснование подземных геотехнологий всегда выполняется для конкретных запасов, которые в зависимости от стадии промышленного освоения месторождений можно разделить на два типа:

• намеченные к освоению участки недр на действующих рудниках, обычно залегающих на больших глубинах;

• новые месторождения, расположенные, как правило, в удаленных районах с неразвитой инфраструктурой или в сложных горно-геологических и климатических условиях.

В связи с разницей объектов освоения формируются и различные подходы к разработке подземных геотехнологий. В первом случае необходимо добиваться соответствия геотехнологии хорошо изученным горно-геологическим и сложившимся горнотехническим условиям. При этом выбор наилучшего решения осуществляется из числа разработанных вариантов. Во втором случае при большой неопределенности условий необходим выбор из множества возможных решений нескольких (2 — 3) для дальнейшей апробации в промышленных условиях.

В общем случае методологией создания инновационных подземных геотехнологий является системный подход, реализуемый в рамках концепции комплексного освоения недр и на принципах экономической эффективности, промышленной и экологической безопасности, полноты освоения недр методом экономико-математического моделирования и оптимизации ее параметров и показателей.

Основные тенденции развития и направления совершенствования подземной геотехнологии в мировой практике:

• применение штолен и автоуклонов при вскрытии и подготовке месторождений, разрабатываемых комбинированным способом [7];

• расширение области применения автомобильного транспорта и создание новых видов универсальных транспортных средств [5];

• замена многофункциональных вертикальных стволов моностволами, т.е. стволами, предназначенными для выполнения только одной функции (подъем руды, спуск-подъем людей, вентиляция и др.). Это позволит резко сократить сечение стволов, повысить их устойчивость, а также отказаться от буровзрывного способа проходки, заменив его бурением [5]. При этом не исключается возможность применения крутонаклонных или криволинейных стволов [8];

• переход от погоризонтной схемы подготовки запасов при отработке наклонных залежей на пространственно-объемную [5];

• конструирование комбинированных геотехнологий для отработки переходных зон с применением рудных или искусственных изолирующих массивов и использованием карьерного пространства и оборудования [9];

• применение восходящего порядка отработки месторождения с заменой твердеющей закладки на сухую или малопрочную [10];

• создание простых конструкций добычных блоков, обеспечивающих безопасность технологических процессов и эффективные показатели извлечения, особенно при системах с массовым обрушением [11];

• использование камерных систем разработки с дополнением их конструктивными элементами, присущими другим классам, например, формирование рудных предохранительных целиков с целью снижения разубоживания [12];

• переход на системы с обрушением на месторождениях, на которых по требованиям экологической и промышленной безопасности допустимо обрушение дневной поверхности;

• императив применения самоходного оборудования на процессах добычи руды при выборе комплексной механизации [13];

• оптимизация показателей извлечения полезного ископаемого за счет применения комбинированных систем разработки;

• императив использования отходов горно-обогатительного в качестве закладочного материала [14];

• переход к новому технологическому укладу (поколению) горного производства, основанному на роботизированных комплексах и соответствующих геотехнологиях [15];

• создание комплексных геотехнологий добычи и обогащения руды, позволяющих утилизировать в выработанном пространстве весь объем отходов горно-обогатительного производства и радикально улучшить экологическую безопасность освоения месторождений.

Указанные выше направления совершенствования подземной геотехнологии основаны на использовании существующего и достаточно широко применяющегося в мировой практике горного оборудования.

Опыт разработки и внедрения подземных геотехнологий

Далее приведен опыт ИГД УрО РАН по разработке и внедрению инновационных подземных геотехнологий в проекты и практику освоения рудных месторождений.

Для условий Малышевского изумрудно-бериллиевого месторождения выполнено научно-методологическое обоснование способа и схемы вскрытия запасов в новом шаге освоения. Месторождение отработанно карьером на глубину 120 м, ниже карьера запасы вскрыты тремя вертикальными стволами: в центральной части — клетевой ствол глубиной 370 м, на флангах — два вентиляционных ствола глубиной 360 и 225 м. Их отработка ведется горизонтальными слоями с закладкой под сформированным на дне карьера изолирующим искусственным целиком. Для освоения нижележащих запасов разработан вариант вскрытия, основанный на применении автотранспортного уклона с углом наклона 10°, расположенного на поверхности возле рудного склада обогатительной фабрики, и предусматривающий углубку фланговых вентиляционных стволов (рис. 1). Эффективность данного способа вскрытия вертикальными стволами по сравнению с традиционным достигнута за счет снижения затрат на горнокапитальные работы в 1,3 раза, уменьшения срока строительства вскрывающих выработок и новых горизонтов рудника на 2,5 года и поэтапного (поэтажного) вовлечения запасов в эксплуатацию. Кроме этого, использование автоуклона для подъема руды позволяет обеспечить производственную мощность рудника до 400 тыс. т руды в год, существенно облегчить доставку самоходной техники в шахту и практически снять

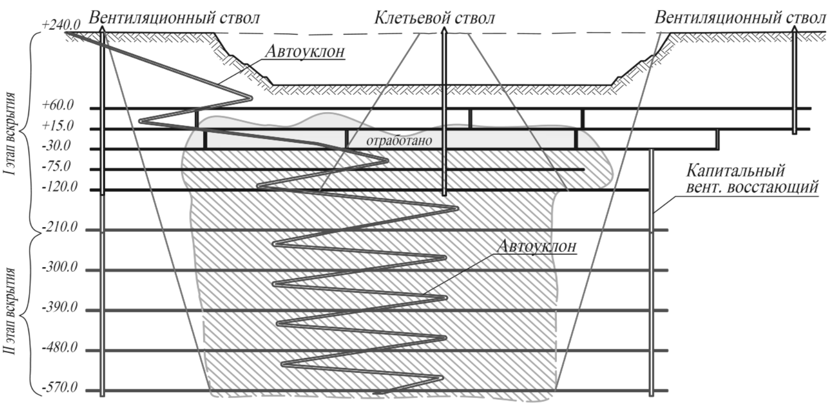

Рис. 1. Схема вскрытия Малышевского месторождения с применением автоуклона
Fig. 1. Scheme of opening of the Malyshevsky deposit using an autoincline

проблему ремонта транспортных средств в подземных условиях.

Для условий комбинированной разработки Сарбайского и Горкитско-Тарыннахского железорудных месторождений разработаны и внедрены в проект инновационные малозатратные технологии отработки мощных рудных тел:

• система этажного принудительного обрушения с одностадийной выемкой;

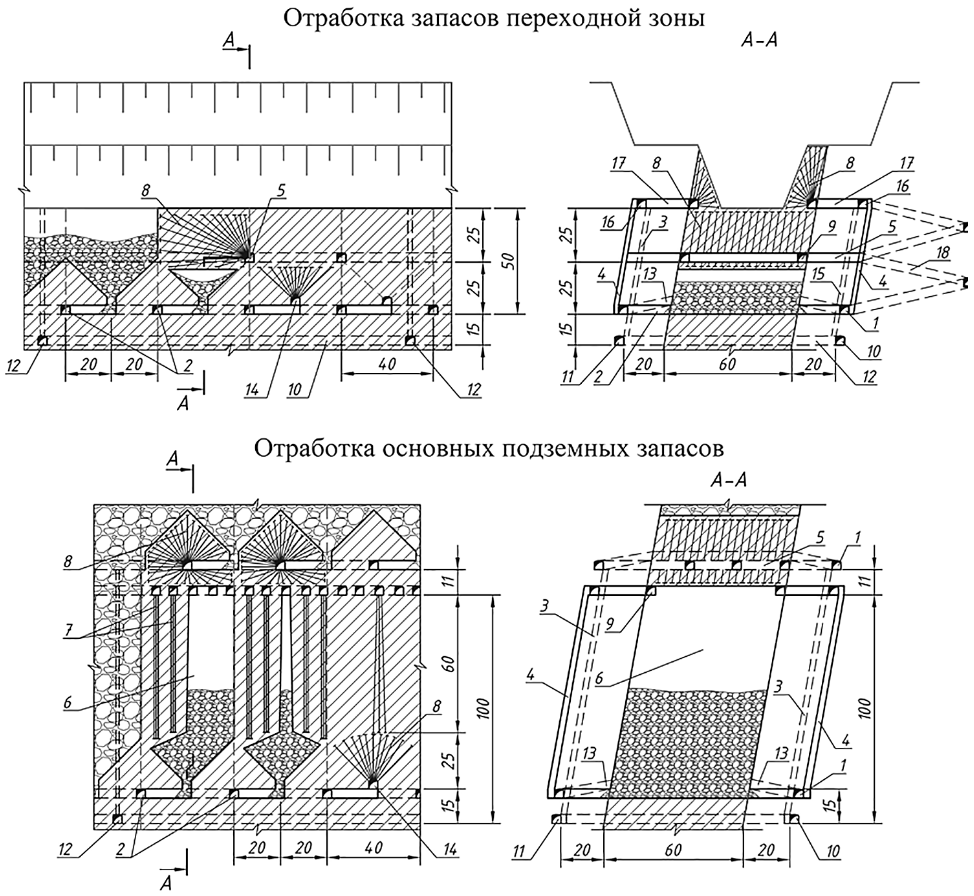

Рис. 2. Система этажного принудительного обрушения на компенсационные камеры с площадным двухсторонним выпуском руды ПДМ: 1 — панельный доставочный штрек; *2* — блоковый доставочный орт; *3* — блоковый рудоспуск; *4* — вентиляционный восстающий; *5* — буровой орт; *6* — камера компенсации; *7* — пучки скважин; *8* — веер скважин; *9* — буровой штрек; *10* — откаточный штрек лежачего бока; *11* — откаточный штрек висячего бока; *12* — откаточный орт; *13* — заезд; *14* — траншея; *15* — породоспуск; *16* — вентиляционный штрек; *17* — вентиляционная сбойка; *18* — спиральный съезд

Fig. 2. Artificial level caving on compensation chambers with areal double-sided ore output with load-haul-dumper: 1 — panel delivery drift; *2* — block delivery cross-cut; *3* — block ore chute; *4* — air raise; *5* — drilling cross-cut; *6* — compensation camera; *7* — bunches of blast holes; *8* — fan of blast holes; *9* — drilling drift; *10* — haulage drift on lying side; *11* — haulage drift on hanging side; *12* — haulage cross-cut; *13* — check in; *14* — trench; *15* — debris chute; *16* — air-end way; *17* — air connection; *18* — spiral ramp

и площадным выпуском руды самоходными погрузо-доставочными машинами (ПДМ), обеспечивающая эффективную отработку рудных тел с потерями руды 11 % и разубоживанием 16 %, а также создание, развитие и поддержание производственной мощности подземного рудника до 10 млн т руды в год;

• система этажного принудительного обрушения на компенсационные камеры с отбойкой параллельно-сближенных скважин и площадным двухсторонним выпуском руды самоходными ПДМ (рис. 2), обеспечивающая эффективную отработку рудных тел с потерями руды 10 % и разубоживанием 15 %, высокую производительность труда на выпуске и доставке руды, создание, развитие и поддержание производственной мощности подземного рудника до 12 млн т руды в год.

На золоторудном месторождении «Джульетта», представленного преимущественно маломощными рудными телами, запроектирована инновационная подэтажно-камерная система разработки с восходящей выемкой и сухой закладкой на основе отходов горно-обогатительного производства (рис. 3). Внедрение данной технологии по сравнению с традиционной системой подэтажных штреков с массовой отбойкой междукамерных целиков и потолочины и выпуском под обрушенными породами позволило снизить потери руды в недрах с 9,2 % до 2—4 % и разубоживание с 33,8 % до 20 % за счет отработки запасов рудных тел в восходящем порядке и применения сухой закладки.

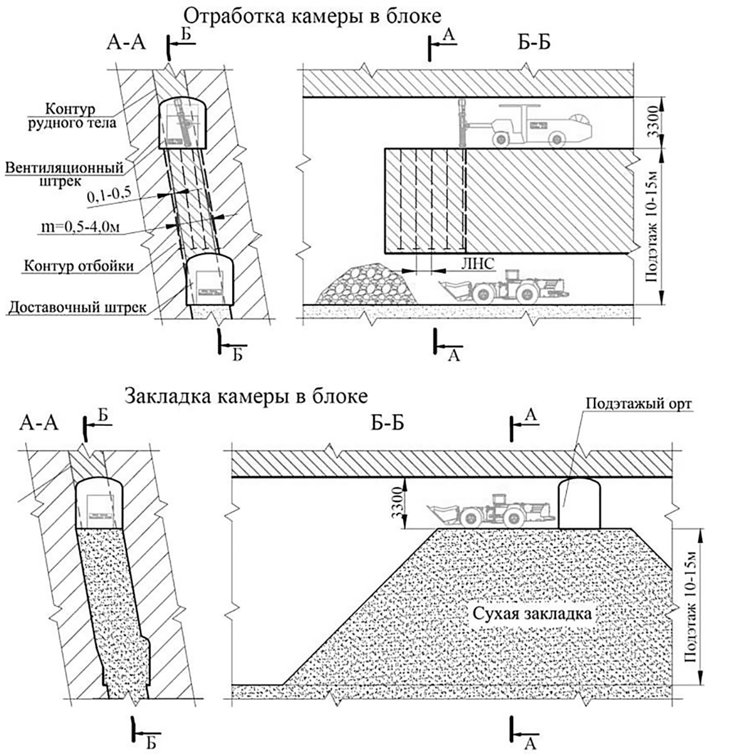

Рис. 3. Подэтажно-камерная система с восходящей выемкой и сухой закладкой
Fig. 3. Sub-level chamber system with an ascending excavation and dry backfill

Также введенная технология увеличила производственную мощность подземного рудника с 140 до 200 тыс. т руды в год за счет повышения производительности труда по системе разработки путем применения более мощного самоходного оборудования и улучшила экологическую безопасность горно-обогатительного производства за счет утилизации отходов в выработанном пространстве.

С целью освоения глубоких горизонтов Урупского меднорудного месторождения подземным способом обоснована и запроектирована инновационная комплексная подземная геотехнология, предусматривающая поэтапное вскрытие запасов в новом шаге автоуклоном и их отработку системой подэтажного обрушения с послойным торцовым выпуском руды из сдвоенных панелей и использованием самоходных ПДМ (рис. 4). Данная геотехнология обеспечивает высокую надежность и эффективность освоения запасов нижних горизонтов рудника без потери производственной мощности за счет достаточно быстрой окупаемости капитальных вложений (7,5 лет), низких капитальных и эксплуатационных затрат на вскрытие и добычу руды, увеличения производительности забойного рабочего по системе разработки более чем в 4 раза, повышения полноты качества извлечения ценной руды из добычного блока на 10 % и утилизации в подземном пространстве почти всего объема пустой породы, образующейся от проходки горных выработок и прирезки лежачего бока.

Для отработки прибортовых и подкарьерных запасов кимберлитовой трубки «Удачная» в сложных климатических и гидрогеологических условиях обоснована инновационная комплексная технология выемки переходной зоны, включающей прибортовые запасы подэтажа высотой 30 м и запасы верхнего этажа высотой 45 м, расположенного непосредственно под дном карьера. Комплексная технология отработки переходной зоны основана на сочетании вариантов систем с обрушением — подэтажное обрушение с торцовым выпуском руды для выемки прибортовых запасов и этажного обрушения с одностадийной выемкой и площадным выпуском для отработки верхнего подкарьерного этажа. Данная технология обеспечивает создание, развитие и достижение проектной производственной мощности подземного рудника до 4 млн т руды в год и имеет наиболее эффективную схему подготовки и нарезки добычных блоков с минимальным удельным объемом подготовительно-нарезных работ на 1000 т добытой руды.

При комплексной технологии подземные горные работы изолируются от карьера предохранительной подушкой, созданной из предварительно отбитой руды или раздробленных пустых пород [16]. При отработке восточного рудного тела формируется рудная предохранительная подушка, при отработке западного рудного тела — породно-рудная (рис. 5). Предохранительная подушка наряду с изоляцией подземного очистного блока обеспечивает безопасность подземных горных работ в случае внезапного обрушения вышележащих бортов карьера. В соответствии с известными расчетными методиками определены безопасные параметры предохранительной подушки по наиболее значимым факторам: действию динамического удара пород от обрушивающихся бортов карьера, действию образующейся при обрушении пород ударной воздушной волны, условию предотвращения аэродинамических связей подземных выработок с карьером и термоизоляции

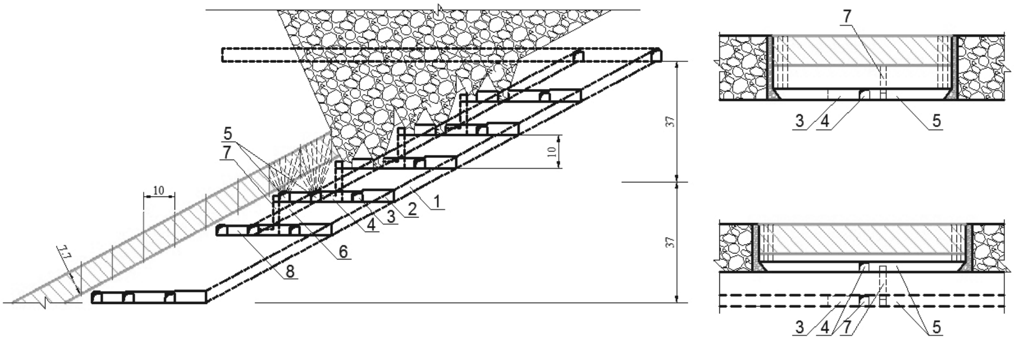

Рис. 4. Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды из сдвоенных панелей: *1* — автотранспортный съезд; *2* — заезд на подэтаж; *3* — перегрузочная камера; *4* — центральный перегрузочный орт; *5* — буро-доставочный штрек; *6* — фланговый ВХВ; *7* — подэтажный ВХВ; *8* — вентиляционная сбойка

Fig. 4. Sub-level caving with covering ore drawing from double panels: 1 — road exit; *2* — check in to the sublevel; *3* — transshipment chamber; *4* — central transshipment cross-cut; *5* — drilling and delivery drift; *6* — flank air and service raise; *7* — sub-floor air and service raise; *8* — ventilation connection

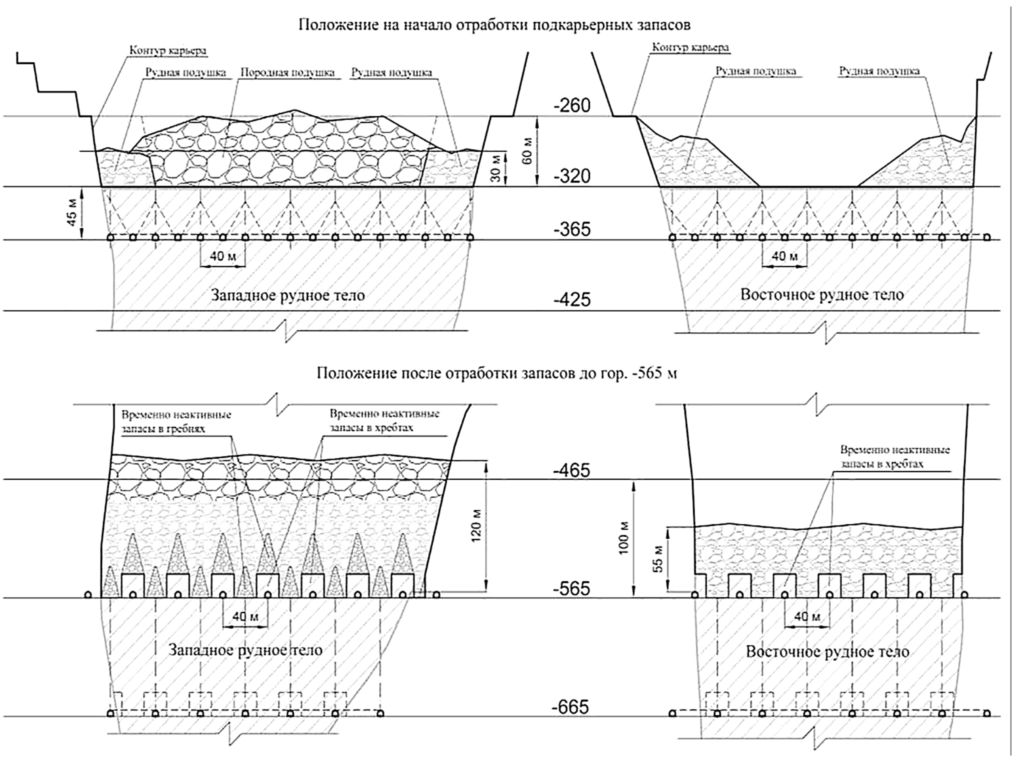

Рис. 5. Способы формирования породно-рудной и рудной предохранительной подушки при отработке рудных тел трубки «Удачная»

Fig. 5. Methods of forming rock-ore and ore protective cushion at the mining ore bodies of the «Udachnaya» pipe

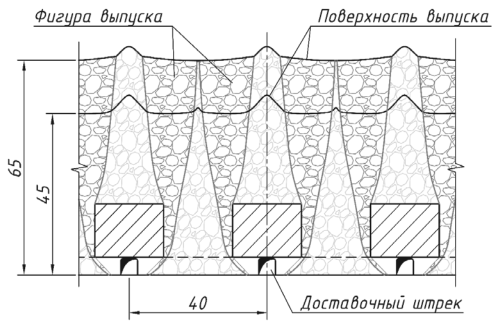

Рис. 6. Схема истечения руды в пределах предохранительной рудной подушки и профиль подушки на момент окончания выпуска

Fig. 6. Scheme of ore flow within the safety ore protective cushion and the profile of the cushion at the end of the release

подземных горных работ. Также разработаны специальные мероприятия по выпуску руды, обеспечивающие поддержание расчётной мощности подушки в процессе отработки до отм. -565 м, главными из которых являются соблюдение равномерно-поочередно-последовательного режима выпуска (рис. 6) и снижение выхода негабарита до 5—7 %.

Для условий освоения мощного глубокозалегающего Естюнинского железорудного месторождения разработана комплексная эколого-ориентированная подземная геотехнология добычи и переработки железных руд, отличающаяся комбинированным восходяще-нисходящим порядком отработки запасов месторождения в сочетании с подземным обогащением, позволяющая весь объем образующихся отходов горно-обогатительного производства утилизировать в подземном пространстве [17], что значительно повышает промышленную и экологическую безопасность природно-техногенного комплекса на базе данного месторождения.

Таким образом, рассмотренные подземные геотехнологии созданы на основе научных исследований в рамках сформулированной методологии, обладают технической новизной и внедрены в производство с существенным экономическим эффектом, следовательно, соответствуют всем признакам инноваций.

Заключение

В результате выполненных исследований предложена методология обоснования и практической реализации инновационных подземных геотехнологий, базирующаяся на системном подходе, реализуемом в рамках концепции комплексного освоения недр и на принципах экономической эффективности, промышленной и экологической безопасности, полноты освоения недр. Определены наиболее существенные особенности, тенденции развития и направления совершенствования подземной геотехнологии в области вскрытия и подготовки, систем разработки, закладочных работ и рудоподготовки.

Приведен опыт ИГД УрО РАН по разработке и внедрению инновационных подземных геотехнологий при проектировании и эксплуатации ряда рудных месторождений, позволивший существенно повысить полноту и качество извлечения руды из недр, увеличить производительность труда на проходческих и очистных работах, снизить капитальные и эксплуатационные затраты на добычу руды и утилизировать отходы горно-обогатительного производства в выработанном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев В.Л.*, *Гальянов А.В.* Методологические аспекты стратегии освоения минеральных ресурсов. — 2-е издание. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. — 153 с.

2. *Каплунов Д.Р. Болотов Б.В.* Особенности проектирования подземных рудников в системе комплексного освоения месторождений. — М: ИПКОН АН СССР, 1988. — 178 с.

3. *Каплунов Д.Р.*, *Рыльникова М.В.*, *Радченко Д.Н.* Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 4 (специальный выпуск № 15). — С. 5—11.

4. *Яковлев В.Л.*, *Волков Ю.В.*, *Славиковский О.В.* О стратегии освоения меднорудных месторождений Урала // Горный журнал. — 2003. — № 9. — С. 3—7.

5. *Волков Ю.В.*, *Соколов И.В.*, *Завьялов Б.М.* Тенденции мирового развития горнорудной промышленности // Горная промышленность. — 2006. –№ 2. — С. 63—65.

6. *Шестаков В.А.* Проектирование рудников: учебник для вузов. — М.: Недра, 1987. — 231 с.

7. *Воронюк А.С.*, *Макишин В.Н.*, *Иванов В.И.* Научные основы и методы определения рационального вскрытия рудных месторождений. — Владивосток: Издание ДВГТУ, 2011. — 118 с.

8. *Gromov E.V.*, *Belogorodtsev O.V.* Improvement of access methods for ore reserves beyond ultimate limits of open pits. Eurasian Mining, 2019. no 1. pp. 16—20.

9. *Каплунов Д.Р.*, *Рыльникова М.В.*, *Калмыков В.Н.* Научно-методическое обоснование модульного принципа проектирования горнотехнических систем // Недропользование — XXI век. — 2009. — № 5. — С. 74—78.

10. *Matani A.G.*, *Doifode S.K.* Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment. International Journal of Chemical and Physical Sciences, 2015, Vol. 4. no 1. pp. 536—540.

11. *Jin A.*, *Sun H.*, *Wu S.*, *Gao Y.* Confirmation of the upside-down drop shape theory in gravity flow and development of a new empirical equation to calculate the shape. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017. Vol. 92. pp. 91—98.

12. Alonso-*Ayuso A.*, *Carvallo F.*, *Escudero L.F.*, *Guignard M.*, *Pi J.*, *Puranmalka R.*, *Weintraub A.* Medium range optimization of copper extraction planning under uncertainty in future copper prices. European Journal of Operational Research, 2014. Vol. 233. pp. 711—726.

13. *Скорняков Ю.Г.* Подземная добыча руд комплексами самоходных машин. — М.: Недра, 1986. — 204 с.

14. *Rosa J.C.* S., *Sanchez L.E.* Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment. Journal of Environmental Management, 2016. Vol. 180. pp. 485—492.

15. *Рыльникова М.В.*, *Владимиров Д.Я.*, *Пыталев И.А. Попова Т.М.* Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 1. — С. 92—101.

16. *Соколов И.В.*, *Смирнов А.А.*, *Антипин Ю.Г.*, *Никитин И.В.*, *Тишков М.В.* Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 2. — С. 52—62.

17. *Sokolov I.V.*, *Gobov N.V.*, *Antipin Y.G.*, *Solomein Y.M.* Strategy of developing iron ore deposits by environmental underground geotechnology. Tidings of the Tula State University. Sciences of Earth, 2018, no 2, pp. 282—295. ГИАБ

REFERENCES

1. Jakovlev V.L., Gal'janov A.V. *Metodologicheskie aspekty strategii osvoenija mineral'nyh resursov* [Methodological aspects of mineral resource mining strategy], second edition, Ekaterinburg, Ural branch of the Russian Academy of Sciences. 2003, 152 p. [In Russ].

2. Kaplunov D.R. Bolotov B.V. *Osobennosti proektirovanija podzemnyh rudnikov v sisteme kompleksnogo osvoenija mestorozhdenij* [Features of the design of underground mines in the system of complex mining of deposits], Moscow, IPKON AN USSR, 1988, 178 p. [In Russ].

3. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N. Scientific and methodological bases of design of ecologically balanced cycle of comprehensive exploitation and conservation of the Earth's reserves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 4 (special edition no 15), pp. 5–11. [In Russ].

4. Jakovlev V.L., Volkov Ju. V., Slavikovskij O.V. About the strategy for the mining of copper ore deposits in the Ural. *Gornyj zhurnal*. 2003, no 9, pp. 3—7. [In Russ].

5. Volkov Ju. V., Sokolov I.V., Zav'jalov B.M. Trends in the global development of the mining industry. *Gornaja promyshlennost'*. 2006, no 2, pp. 63—65. [In Russ].

6. Shestakov V.A. *Proektirovanie rudnikov: uchebnik dlja vuzov* [Mine Design: A Textbook for High Schools], Moscow, Nedra, 1987, 231 p. [In Russ].

7. Voronjuk A.S., Makishin V.N., Ivanov V.I. *Nauchnye osnovy i metody opredelenija racional'nogo vskrytija rudnyh mestorozhdenij* [Scientific basis and methods for determining the rational opening of ore deposits], Vladivostok, Izdanie DVGTU, 2011, 118 p. [In Russ].

8. Gromov E.V., Belogorodtsev O.V. Improvement of access methods for ore reserves beyond ultimate limits of open pits. *Eurasian Mining*, 2019, no 1, pp. 16—20.

9. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Kalmykov V.N. Scientific and methodological substantiation of the modular principle of designing mining systems. *Nedropol'zovanie — XXI vek*. 2009, no 5, pp. 74—78. [In Russ].

10. Matani A.G., Doifode S.K. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2015, Vol. 4, no 1, pp. 536—540.

11. Jin A., Sun H., Wu S., Gao Y. Confirmation of the upside-down drop shape theory in gravity flow and development of a new empirical equation to calculate the shape. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, Vol. 92, pp. 91—98.

12. Alonso-Ayuso A., Carvallo F., Escudero L.F., Guignard M., Pi J., Puranmalka R., Weintraub A. Medium range optimization of copper extraction planning under uncertainty in future copper prices. *European Journal of Operational Research*, 2014, Vol. 233, pp. 711—726.

13. Skornjakov Ju. G. *Podzemnaja dobycha rud kompleksami samohodnyh mashin* [Underground mining by self-moving machinery complexes], Moscow, Nedra, 1986, 204 p. [In Russ].

14. Rosa J.C. S., Sanchez L.E. Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 2016, Vol. 180, pp. 485—492.

15. Ryl'nikova M.V., Vladimirov D. Ja., Pytalev I.A. Popova T.M. Robotic geotechnologies as a way to improve the efficiency and ecologization of subsoil mining. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2017, no 1, pp. 92—101. [In Russ].

16. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Ju. G., Nikitin I.V., Tishkov M.V. Substantiation of the thickness of the safety cushion when working out the reserves under open pit of the "Udachnaya" pipe with caving systems. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2018, no 2, pp. 52—62. [In Russ].

17. Sokolov I.V., Gobov N.V., Antipin Y.G., Solomein Y.M. Strategy of developing iron ore deposits by environmental underground geotechnology. Tidings of the Tula State University. *Sciences of Earth*, 2018, no 2, pp. 282—295.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Игорь Владимирович[1] — докт. техн. наук, действительный член Академии горных наук, врио директора, e-mail: geotech@igduran.ru,

Антипин Юрий Георгиевич[1] — канд. техн. наук, зав. лабораторией подземной геотехнологии,
Гобов Николай Васильевич[1] — канд. техн. наук, старший научный сотрудник подземной геотехнологии,
Никитин Игорь Владимирович[1] — научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии,
[1] Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), 620075 г. Екатеринбург, ГСП-219, Мамина-Сибиряка 58.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov I.V.[1], Dr. Sci. (Eng.), full member of the Academy of mining sciences, acting director,
Antipin Yu.G.[1], Cand. Sci. (Eng.), head of the laboratory of underground geotechnology,
Gobov N.V.[1], Cand. Sci. (Eng.), senior research worker of the laboratory of underground geotechnology,
Nikitin I.V.[1], research worker of the laboratory of underground geotechnolog,
[1] The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 21.11.2019; получена после рецензии 12.02.2020; принята к печати 20.03.2020.
Received by the editors 21.11.2019; received after the review 12.02.2020; accepted for printing 20.03.2020.