

УДК 622.272.326:622.341

**Соколов Игорь Владимирович**

доктор технических наук,  
директор Института горного дела УрО РАН  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Смирнов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Антипин Юрий Георгиевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории  
подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Никитин Игорь Владимирович**

научный сотрудник лаборатории  
подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА  
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ  
ЗОН ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ  
РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ \***

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.011

**Sokolov Igor V.**

Doctor of Technical Sciences,  
Director of the Institute of Mining,  
Ural Branch of RAS  
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@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](mailto:geotech@igduran.ru)

**Antipin Yuriy G.**

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

**Nikitin Igor V.**

Research Worker,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**SCIENTIFIC ASPECTS OF CHOOSING  
THE GEOTECHNICAL STRATEGY  
FOR MINING OF TRANSITION AREAS  
WHILE COMBINED MINING  
OF ORE DEPOSITS****Аннотация:**

Изложены основы геотехнологической стратегии освоения переходных зон при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений. На основании анализа опыта освоения месторождений комбинированным способом установлено, что при переходе от открытых горных работ к подземным резко изменяются характер и технико-экономические показатели деятельности предприятия: производительность, величина капитальных вложений и эксплуатационные затраты. Переходный процесс при комбинированной разработке рассмотрен как освоение (вскрытие, очистная выемка и погашение) переходной зоны части месторождения в приграничном пространстве между карьером и подземным рудником, в пределах которой осуществляются организационно-технические и технологические мероприятия, направленные на создание оптимальных условий для подземных горных работ с учетом специфических факторов и условий, сформированных при открытых горных работах. Систематизированы типы переходных зон, разработаны варианты геотехнологии, учитывающие специфические факторы и условия, созданные на момент окончания открытых горных работ и обеспечивающие оптимальные условия для подземных горных работ на их стабильном этапе. На основе экономико-математического моделирования установлен оптимальный вариант геотехнологической стратегии по выдвинутым критериям. Внесен вклад в развитие основ геотехнологической

**Abstract:**

The paper shows the framework of the geotechnical strategy for mining transition areas by use of consequent scheme when working ore deposits. On the basis of analysis and experience generalization of the mining some ore deposits by the combined method is established that transition process is always accompanied by abrupt transformation of structure and parameters of the mining enterprise expressed in sharp change of character and technical and economic indicators of its activity. Two main characteristics of the transition process are: a sharp change in the value of the productive capacity of the enterprise and a surge in the value of capital investments. The transition process at the combined mining is defined as the mining of part of the field for the purpose to transfer the mining enterprise from one stable state to another; and the transition area is defined as part of the field, within which organizational, technical and technological measures are implemented, aimed at creating optimal conditions for the underground mining of basic reserves in a stable period, while taking in account special factors and conditions of the preceding open-pit mining. The types of transition areas are systematized, the options of underground geotechnology are developed, taking in account specific factors and conditions formed during the open-pit mining and providing optimal conditions for the development of underground mining at a new stable state. The best option of geotechnological strategy according to the criterion of capital and opening costs is determined by the method of economic and mathematical modeling. The

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00581-19-00, тема №0405-2019-0005

---

*стратегии освоения переходных зон при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений.*

*Ключевые слова: геотехнологическая стратегия, переходный процесс, переходная зона, производительность, капитальные и эксплуатационные затраты, вскрытие, система разработки.*

---

---

*contribution was made to the development of scientific foundations of the choice of geotechnological strategy for the mining of transition areas at the combined mining of ore deposits.*

*Keywords: geotechnological strategy, combined mining, transition process, transition area, productive capacity, scheme of opening, mining system, net present value.*

---

### *Введение*

Проблематика обоснования геотехнологической стратегии (ГС) перехода от открытых горных работ (ОГР) к подземным (ПГР) в значительной степени связана с обеспечением безопасности и эффективности освоения переходных зон (ПЗ) [1 – 2]. Исследование переходных процессов как нового методологического подхода к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений, выполняется в рамках научного направления, возглавляемого член-корр. РАН В.Л. Яковлевым [3 – 4]. Необходимыми требованиями при принятии организационных, технических и технологических решений являются четкое понимание цели и задач переходного процесса, знание присущих ему закономерностей, учет сложившихся на его начало и формирование необходимых на его завершение условий, актуализация положительных и нейтрализация негативных факторов, действующих в переходный период.

### *Результаты исследований*

В работе [5] дано определение переходного процесса как совокупности технологических, технических и организационных действий при переходе горного предприятия на новый порядок и способ отработки месторождения. Цель переходного процесса при комбинированной разработке месторождения состоит в переводе горнодобывающего предприятия от одного стабильного состояния, соответствующего нормальной стадии развития ОГР, к другому, соответствующему нормальной стадии развития ПГР. Таким образом, переходный процесс при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений можно рассматривать как освоение (вскрытие, очистную выемку и погашение) переходной зоны – части месторождения в приграничном пространстве между карьером и подземным рудником, в пределах которой осуществляются организационно-технические и технологические мероприятия, направленные на создание оптимальных условий для ПГР с учетом специфических факторов и условий, сформированных при ОГР [6 – 7].

Характеристиками переходного процесса при комбинированной разработке являются резкое изменение величины производительности предприятия, как правило, в сторону ее снижения и величины капитальных вложений, в несколько раз превышающих необходимую их величину для поддержания производственной мощности предприятия в стабильный период ОГР. Это связано с необходимостью подготовки производственных площадей для добычи руды качественно новой – подземной – геотехнологией. Следствием является резкое уменьшение доходности горнодобывающего предприятия в переходный период. На снижение доходности при освоении ПЗ также существенно влияют увеличенные по сравнению со стабильным периодом ПГР эксплуатационные затраты, связанные с влиянием негативных специфических факторов: повышенного горного давления в прикарьерном массиве, активных аэродинамических и гидродинамических связей между подземными выработками и карьером и других.

Переходный процесс обуславливает тип ПЗ в зависимости от стадии освоения месторождения ПГР и ОГР и затрагивает различные подсистемы горнотехнической системы (ГТС) подземного рудника (табл. 1).

Таблица 1

## Типы ПЗ при подземной разработке месторождений

Стадия освоения месторождения	Тип переходной зоны (объект освоения)	Подсистемы ГТС рудника, затрагиваемые переходным процессом
<i>переход от открытых горных работ к подземным</i>		
1. Совместное ведение открытых и подземных горных работ (параллельная схема)	Этаж (этажи), смежные с рудным барьерным целиком	Вскрытие, подготовка и отработка этажа (этажей), смежного с рудным барьерным целиком с целью создания искусственного барьерного целика. Порядок и направление развития ПГР в шаге вскрытия и отработки.
2. Переход от открытых горных работ к подземным (последовательная схема)	Этаж (подэтаж) между карьером и основными подземными запасами	Вскрытие, подготовка и отработка запасов ПЗ. Порядок и направление развития ПГР в ПЗ и ОЗ.
<i>переход к новому шагу вскрытия и отработки месторождения</i>		
3. Переход от одноярусного к многоярусному освоению месторождения	Переходная зона не образуется. На последнем этапе – рудный барьерный целик	Вскрытие нового яруса. Порядок и направление развития ПГР в ПЗ и ОЗ.
4. Переход к новому шагу освоения месторождения	Смежный этаж (подэтаж) между старым и новым шагом	Вскрытие, подготовка и отработка смежного этажа. Порядок и направление развития подземных горных работ в ПЗ и ОЗ.
5. Переход к новому этажу в одном шаге освоения (при условии изменения технологии и (или) геотехники)	Смежный этаж (подэтаж), осваиваемый новой технологией и (или) геотехникой	Подготовка и отработка смежного этажа (подэтажа) новой технологией и (или) геотехникой. Порядок и направление развития подземных горных работ в ПЗ и ОЗ.
6. Переход к новой выемочной единице (при условии изменения технологии и (или) геотехники)	Смежная выемочная единица (камера, блок, панель), осваиваемая новой технологией и (или) геотехникой	Подготовка, нарезка и отработка смежной выемочной единицы новой технологией и (или) геотехникой.

Варианты ГС формируются на основе соответствующих вариантов подземной геотехнологии, представляющих собой рациональное сочетание порядка развития горных работ во времени и пространстве, способ и схему вскрытия, технологию очистной выемки и способ погашения выработанного пространства [8]. Для этого необходимо последовательно решить и согласовать результаты следующих научно-технических задач:

- определить пространственное расположение запасов, подлежащих освоению ПГР, относительно проектного контура карьера и рудные площади по горизонтам;
- выбрать систему разработки и способ погашения выработанного пространства ПЗ, обеспечивающие оптимальные условия для освоения основных запасов (ОЗ) на новом стабильном этапе ПГР;

- определить конструкцию и параметры системы разработки ПЗ с учетом последовательной или параллельной схемы ведения ОГР и ПГР в переходный период, уровня горного давления в прикарьерном массиве, возможности использования карьерного технологического оборудования;

- обосновать способ изоляции ПГР от карьера в зависимости от системы разработки ПЗ и с учетом наличия внутреннего породного отвала в карьере, определить приемлемую величину активных аэродинамических и гидравлических связей;

- определить состав комплекса технологического оборудования;

- установить показатели полноты и качества извлечения руды из ПЗ;

- установить производственную мощность рудника в переходный период исходя из горных возможностей при отработке ПЗ с учетом продолжительности и объема добычи руды при доработке карьера;

- обосновать способ и схему вскрытия запасов ПЗ с учетом системы подземной разработки ПЗ, возможности использования карьерного пространства и оборудования, производительности транспортной системы карьера и его параметров;

- определить необходимую интенсивность и срок вскрытия и отработки ПЗ исходя из запланированного срока ввода подземного рудника в работу;

- установить параметры (высоту и запасы) ПЗ в зависимости от вышерассмотренных специфических условий и факторов;

- разработать календарный план вскрытия, подготовки и отработки ПЗ;

- согласовать организационно-технические и технологические решения по освоению ПЗ с производственной программой предприятия как по доработке карьера, так и по освоению ОЗ месторождения в стабильном периоде ПГР, откорректировать их в случае необходимости.

Исходя из установленных принципов и решаемых научно-технических задач систематизированы варианты подземной геотехнологии освоения ПЗ при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений, отличающиеся следующими признаками: состоянием карьера, порядком отработки, способом и схемой вскрытия, системой разработки ПЗ и ОЗ, способом изоляции ПГР от карьера (табл. 2).

В соответствии с систематизацией сконструировано и оценено 4 варианта подземной геотехнологии освоения ПЗ для горно-геологических и горнотехнических условий разработки уральского медноколчеданного месторождения – мощность рудного тела 40 м, угол падения 50°, глубина залегания 500 м, глубина карьера 260 м, производственная мощность рудника 500 тыс. т/год, высота этажа 60 м, содержание меди в руде 1,8 % [9].

Исходя из того что в переходный период происходит резкое снижение доходности от эксплуатации месторождения, за критерий оценки вариантов подземной геотехнологии при освоении только ПЗ предложен минимум снижения доходности ДД горнодобывающего предприятия при переходе от одного стабильного состояния к другому:

$$\Delta D = D_0 - D_{\text{п}} \rightarrow \min, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где  $D_0$  – среднегодовой доход предприятия в стабильном периоде ОГР (или ПГР), руб/год;  $D_{\text{п}}$  – среднегодовой доход предприятия в переходном периоде, определяемый путем дисконтирования выручки, капитальных и эксплуатационных затрат, руб/год:

$$D_{\text{п}} = \sum_{t=1}^T \frac{Z_c(1-p^{\text{п}})\epsilon_o A_t^{\text{п}} - (K_t^{\text{п}} + C^{\text{п}} A_t^{\text{п}})}{(1-E)^t} / T \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $A_t^{\text{п}}$  – производственная мощность предприятия по руде в  $t$ -м году переходного периода, т/год;  $K_t^{\text{п}}$  – капитальные затраты на строительство подземного рудника в  $t$ -м году переходного периода с учетом специфических факторов, руб.;  $C_{\text{п}}$  – эксплуатационные затраты на добычу 1 т руды при отработке ПЗ с учетом специфических факторов, руб/т.;  $T$  – продолжительность переходного периода, рассчитываемая от начала капитальных вложений до окончания отработки ПЗ, лет.

Таблица 2

**Варианты подземной геотехнологии освоения ПЗ**

Элемент геотехнологии	Вариант геотехнологии			
	1	2	3	4
Состояние карьера	обрушен или внутренний отвал на его дне	в устойчивом состоянии	обрушен или внутренний отвал на его дне	в устойчивом состоянии
Порядок отработки	нисходящий		восходящий	
Способ и схема вскрытия ПЗ и ОЗ	вертикальными стволами с поверхности	автоуклонами из карьера и с поверхности	вертикальными стволами с поверхности	автоуклонами из карьера и с поверхности
Система разработки ПЗ	этажное принудительное или подэтажное обрушение	этажно-камерная или горизонтальные слои с закладкой	этажное принудительное или подэтажное обрушение	этажно-камерная или горизонтальные слои с закладкой
Способ изоляции ПЗ	массивом разрыхленных пород на дне карьера	рудным или искусственным целликом в пределах ПЗ	массивом разрыхленных пород на дне карьера, без изоляции	рудным или искусственным целликом в пределах ПЗ
Система разработки ОЗ	этажное принудительное или подэтажное обрушение под массивом пород	этажно-камерная с закладкой под закладочным массивом	этажно (подэтажно)-камерная с закладкой под рудным массивом	

Оценка вариантов геотехнологии освоения ПЗ по критерию  $\Delta D$  при среднегодовом доходе предприятия в период ведения ОГР 300 млн руб., сроке отработки ПЗ 8 лет, норме дисконта 10 % показала (рис. 1):

- среднегодовой доход предприятия в переходный период  $D_{п}$  значительно ниже среднегодового дохода при ОГР  $D_0$  и находится в диапазоне  $D_{п} = 90-190$  млн руб. (что составляет от 30 до 65 %  $D_0$ );

- наиболее эффективным является вариант 4 за счет более низких эксплуатационных затрат на добычу руды (по сравнению с вариантом 2) и более низких капитальных затрат на вскрытие (по сравнению с вариантами 1 и 3).

Поскольку целью освоения ПЗ при комбинированной разработке является обеспечение условий для эффективной и безопасной отработки ОЗ, то для оценки геотехнологии освоения ПЗ и соответствующей ГС предложен интегральный эффект от освоения всех запасов, предназначенных для ПГР. При этом оптимальные параметры и показатели освоения ПЗ соответствуют максимуму данного эффекта. В качестве критерия оценки принят максимум чистого дисконтированного дохода (ЧДД) в следующем виде, руб.:

$$\text{ЧДД} = \frac{\sum_{t=0}^T C_t}{(1+E)^t} - \left( \frac{\sum_{t=0}^T K_t}{(1+E)^t} + \frac{\sum_{t=0}^T \mathcal{E}_t}{(1+E)^t} \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $T$  – суммарная продолжительность строительства рудника и освоения всех запасов месторождения ПГР, лет;  $C_t$  – извлекаемая ценность компонентов, получаемая в  $t$ -ом году, руб/год;  $K_t$  – капитальные затраты на строительство рудника в  $t$ -ом году, руб/год;  $\mathcal{E}_t$  – эксплуатационные затраты на добычу руды в  $t$ -ом году, руб/год;  $E$  – норма дисконта, доли ед.

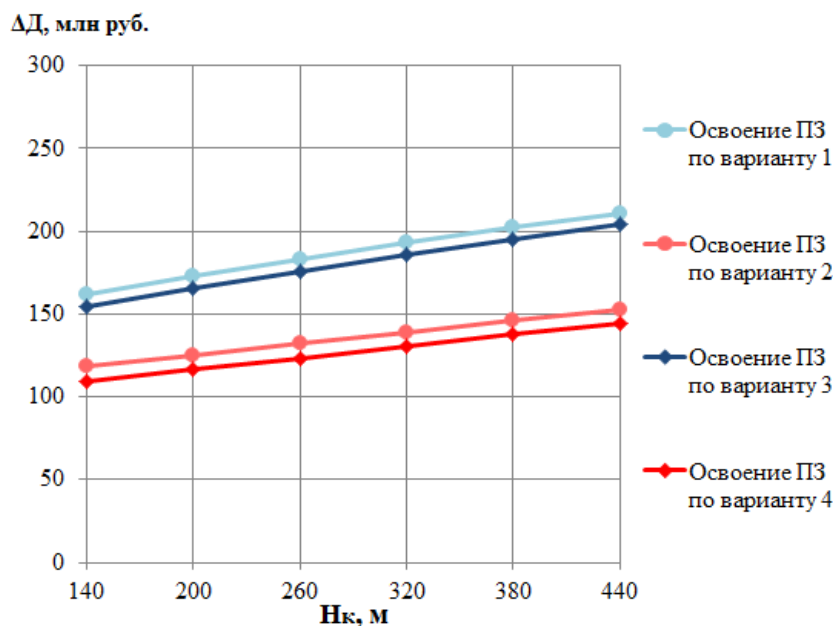


Рис. 1 – Снижение доходности  $\Delta D$  по вариантам геотехнологии

В результате ЭММ вариантов ГС освоения ПЗ и ОЗ с учетом динамики развития ПГР во времени установлено (рис. 2):

- оптимальным является вариант 2 за счет быстреего (на 3-й год строительства) ввода рудника в эксплуатацию для освоения ПЗ, отсрочки во времени капвложений на вскрытие ОЗ (10, 17 и 24 год) и более низких капитальных затрат даже при более высоких эксплуатационных затратах. Уже при отработке ПЗ образуется доход в размере 455 млн руб., что составляет 32 % от общего дохода по варианту геотехнологии;

- варианты 1 и 3 значительно уступают по эффективности из-за большого срока строительства рудника (7 и 8 лет, соответственно) и удлинения срока окупаемости (25 и более лет). Эти результаты подтверждают нецелесообразность вскрытия вертикальными стволами с поверхности при последовательной схеме комбинированной разработки меднорудных месторождений с относительно небольшими запасами (до 15 - 20 млн т).

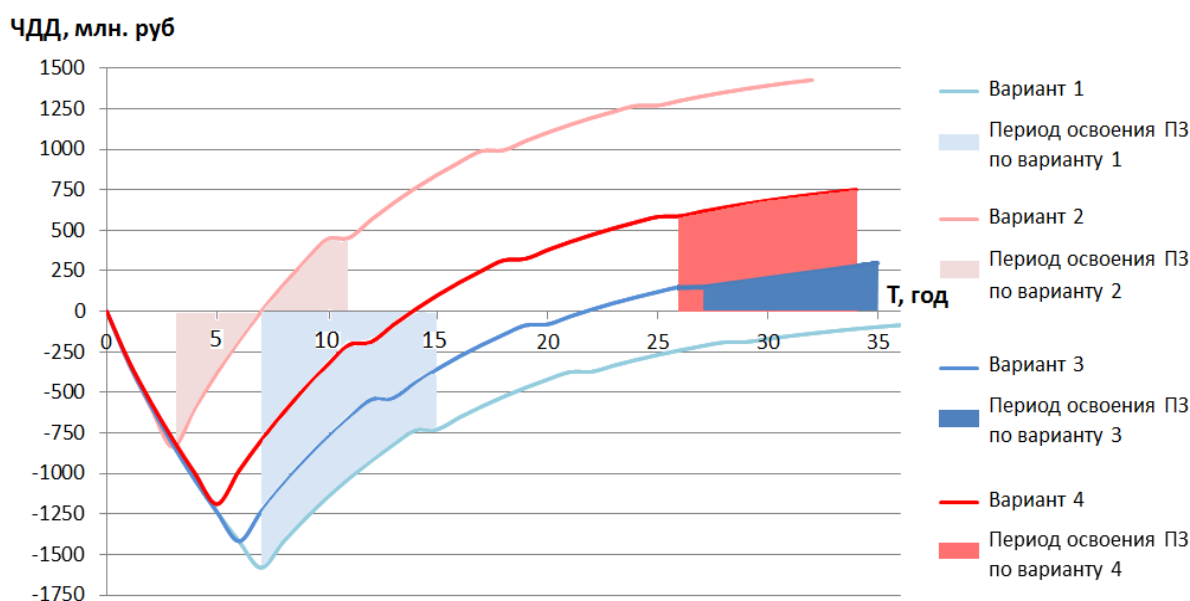


Рис. 2 – ЧДД по вариантам ГС освоения ПЗ и ОЗ

### Заключение

Таким образом, внесен вклад в развитие основ геотехнологической стратегии освоения переходных зон при последовательной схеме комбинированной разработки рудных месторождений, состоящий в систематизации, формировании и конструировании вариантов геотехнологии с учетом специфических факторов и условий, сформированных при открытых горных работах с целью обеспечения оптимальных условий при освоении запасов на нормальной стадии развития подземных горных работ, и в установлении на основе экономико-математического моделирования оптимальной геотехнологической стратегии по критерию интегрального эффекта от освоения переходной зоны и основных запасов месторождения.

### Литература

1. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых / Под науч. ред. акад. РАН К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2014. - 196 с.
2. Каплунов Д.Р. Комбинированная геотехнология / Д.Р. Каплунов, В.Н. Калмыков, М.В. Рыльникова. - М.: Руда и металлы, 2003. – 558 с.
3. Яковлев В.Л. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков, И.В. Соколов; Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. - 360 с.
4. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // Проблемы недропользования. - 2017. - № 2. - С. 5 - 14.
5. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. - 2017. - № 7. - С. 46 - 50.
6. Волков Ю.В. Подземная разработка медноколчеданных месторождений Урала / Ю.В. Волков, И.В. Соколов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. - 232 с.
7. Соколов И.В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - № 9. - С. 151 - 160.
8. Методология выбора подземной геотехнологии освоения переходных зон при комбинированной разработке рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин // Горный журнал. - 2018. - № 1. - С. 22 - 26.
9. Никитин И.В. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения / И.В. Никитин // Проблемы недропользования. - 2017. - № 1. - С. 21 - 28. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.021