

УДК 622.272.06:622.341

Смирнов Алексей Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Никитин Игорь Владимирович

научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech910@yandex.ru.

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
МОДЕРНИЗАЦИИ НА ГОРНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ С ПОДЗЕМНЫМ
СПОСОБОМ ДОБЫЧИ РУДЫ****Аннотация:*

Рассмотрены характерные особенности и основные виды переходных процессов в деятельности горных предприятий с подземным способом добычи руды. Определены основные направления технологической модернизации при подземной разработке глубокозалегающих запасов рудных месторождений, основанные на сочетании различных видов переходных процессов, характеризующихся изменением шага освоения, параметров системы разработки или уровня механизации проходческих и очистных работ. Разработаны рациональные варианты модернизации технологических схем подземной добычи руды при переходе на новый этаж и предложена методика их технико-экономической оценки по критерию снижения доходности горного предприятия в переходный период. Установлено, что при технологической модернизации снижение доходности горного предприятия происходит в основном за счет дополнительных капитальных вложений, в частности на горнопроходческие работы, при этом уровень этого снижения определяется экономической эффективностью новой технологии и оптимальной стратегией развития горных работ. Результаты исследований могут быть использованы при технико-экономическом обосновании и проектировании горнотехнических систем горных предприятий с поэтапным технологическим развитием.

Ключевые слова: глубокозалегающее месторождение, подземная разработка, переходный процесс, технологическая модернизация, система разработки, технико-экономическое сравнение, доход предприятия.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.053

Smirnov Alexey A.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Research Worker,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS.
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.

Nikitin Igor V.

Research Worker,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
geotech910@yandex.ru.

**FEATURES OF TECHNOLOGICAL
MODERNIZATION AT MINING
ENTERPRISES WITH UNDERGROUND
METHOD OF ORE EXTRACTION***Abstract:*

The paper considers characteristic features and main types of transient processes in the activities of mining enterprises with underground method of ore extraction. The authors justify basic directions of technological modernization in the underground mining of deep-lying reserves of ore deposits, based on combination of different types of transient processes characterized by changes in the mining step, parameters of the mining system or the level of mechanization of sinking and cleaning operations. The rational variants of modernization of technologies of underground mining in the transition to the new floor and the methods of their technical and economic evaluation according to the criterion of reducing the profitability of the mining enterprise in transition period are developed. The paper establishes that during technological modernization, reducing the profitability of mining enterprise mainly depends on additional capital investments, in particular for mining operations, while the level of this reducing is determined by the economical effectiveness of the new technology and the optimal strategy for evolution mining operations. The research results can contribute to the feasibility study and design of mining systems of mining enterprises with phased technological development.

Key words: deep-lying deposit, underground mining, transition process, technological modernization, mining system, technical and economic comparison, enterprise income.

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

Ведение

Особенностью современного периода развития горнодобывающей промышленности России является широкое вовлечение в эксплуатацию глубокозалегающих запасов месторождений твердых полезных ископаемых, как правило, в усложняющихся горно-геологических, горнотехнических и экономических условиях, что требует совершенствования технологии добычных работ или существенного пересмотра параметров основных технологических процессов [1]. Известно, что подобные изменения на действующих горных предприятиях предполагают реализацию переходного процесса [2].

В большинстве случаев переход к освоению глубокозалегающих запасов сопровождается технологической модернизацией – комплексом мероприятий по замещению старой технологии на новую, более совершенную. При этом изменяется не только система разработки, но и другие производственные процессы: схемы вскрытия и подготовки, вентиляции, транспорта руды и пр. Более того, переходный процесс существенно влияет на всю горнотехническую систему (ГТС) предприятия, включая процессы переработки добытой руды. Вследствие этого весьма важным является принятие оптимальной стратегии развития предприятия в переходный период [3].

Таким образом, выявление особенностей технологической модернизации на горных предприятиях с подземным способом добычи руды на основе изучения происходящих при ее реализации переходных процессов представляет собой весьма актуальную научно-техническую задачу.

Цель, характеристика и виды переходных процессов при подземной разработке рудных месторождений

Анализ условий и опыта подземной разработки месторождений черных, цветных и редких металлов [4 – 7] и высокоценного сырья [8, 9] показал, что переходные процессы, как правило, сопровождаются резкими изменениями показателей деятельности горного предприятия в одной или нескольких основных областях. Это могут быть кардинальные изменения как в средствах труда – технологии и механизации, так и в предмете труда – резкое изменение масштабов производства и даже объекта отработки. Строго говоря, переходные процессы разного масштаба наличествуют в любой период работы горного предприятия. Нас интересуют только процессы, которые связаны с переходом на новый уровень производства в макроадаптационном режиме [10].

Целью переходного процесса при разработке месторождения является перевод горного предприятия от одного стабильного состояния к другому. Основное назначение – создание наиболее благоприятных условий для достижения предприятием нового стабильного состояния.

Первой характеристикой переходного процесса можно считать резкое изменение производительности предприятия преимущественно в сторону ее снижения за счет уменьшения готовых к выемке рудных площадей. Второй – резкое увеличение капитальных вложений, величина которых в несколько раз превышает величину, необходимую для поддержания производственной мощности горного предприятия в стабильный период. Это обусловлено необходимостью вскрытия и подготовки новых участков месторождения. Следствием скачка этих двух показателей является снижение доходности предприятия в переходный период [11].

При подземной разработке рудных месторождений в зависимости от объекта перехода можно выделить следующие основные виды переходных процессов:

- пространственный – переход от одной части месторождения к другой. Наиболее характерным является переход по глубине месторождения: от запасов открытой разработки к запасам подземных горных работ, к новому шагу вскрытия или на новый этаж. Возможен и переход по простиранию месторождения в пределах одного этажа: от одного рудного тела к другому или от одного участка к другому;

- технологический – переход от одной технологии добычи к другой, например, от систем разработки с обрушением к системам с закладкой;
- функциональный – переход на кардинально новый тип или уровень механизации, например, замена переносного технологического оборудования на самоходную технику или изменение вида внутришахтного транспорта.

Обычно отдельно данные виды переходных процессов не реализуются. Так, пространственный переход присутствует практически всегда, очень часто он подразумевает модернизацию технологических процессов и (или) средств их механизации. Следовательно, на горном предприятии с подземным способом добычи руды переходный процесс реализуется при одновременном применении двух или более его видов.

Методика оценки и экономико-математическое моделирование вариантов технологической модернизации горного предприятия

Технологическая модернизация, как правило, требует обновления всей ГТС горного предприятия, включая подсистемы вскрытия и очистной выемки [12]. При этом необходим учет последующих процессов переработки добытой руды как с точки зрения обеспечения предприятия сырьем, так и с целью получения конкурентного конечного продукта [13].

Поскольку переходный период характеризуется снижением доходности горного предприятия от эксплуатации части месторождения вследствие дополнительных капитальных вложений, в частности на горнопроходческие работы (ГПР), то одной из главных задач является обоснование наиболее экономически эффективного варианта модернизации технологии при переходе на новый объект отработки.

Исходя из этого разработана методика технико-экономической оценки вариантов технологической модернизации горного производства по критерию снижения доходности ΔD горного предприятия при переходе от одного стабильного состояния к другому, %:

$$\Delta D = \frac{D_c - D_n}{D_c} 100 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где D_c , D_n – среднегодовой доход горного предприятия в предшествующий стабильный и переходный периоды, соответственно, руб.;

$$D_c = C_c - \mathcal{E}_c, \quad (2)$$

где C_c , \mathcal{E}_c – извлекаемая ценность, эксплуатационные затраты на добычу и обогащение руды в стабильный период, соответственно, руб.;

$$D_n = \frac{C_n - (K_n + \mathcal{E}_n)}{T_n} = \frac{0,01k(1 - \Pi_n)Zc\varepsilon_0 B \frac{1 - \Pi_n}{1 - P_n} - (V_{\text{ГПР}} C_{\text{ГПР}} + (C_{\text{доб}} + C_{\text{об}}) B \frac{1 - \Pi_n}{1 - P_n})}{B \frac{1 - \Pi_n}{1 - P_n} A_n^{-1}}, \quad (3)$$

где C_n , K_n , \mathcal{E}_n – извлекаемая ценность, капитальные затраты на ГПР, эксплуатационные затраты на добычу и обогащение руды в переходный период, соответственно, руб.; T_n – продолжительность переходного периода, лет; k – курс доллара, руб/\$; Z – цена 1 т металла на рынке, \$/т; c – содержание металла в погашаемых балансовых запасах, %; ε_0 – извлечение металла в концентрат при обогащении руды, доли ед.; B – балансовые запасы переходного участка (этажа, добычного блока), т; Π_n , P_n – потери и разубоживание руды при отработке переходного участка, доли ед.; $V_{\text{ГПР}}$ – объем ГПР, м³; $C_{\text{ГПР}}$ – себестоимость ГПР, руб/м³; $C_{\text{доб}}$, $C_{\text{об}}$ – удельные затраты на добычу (включая отбойку, выпуск и доставку, внутришахтный транспорт, закладочные и прочие работы) и

обогащение 1 т руды, соответственно, руб/т; A_n – производственная мощность предприятия в переходный период, т/год.

В качестве примера рассмотрена технологическая модернизация рудника «Скалистый», осуществляющего разработку участка Урупского месторождения медноколчеданных руд со сложным строением и изменчивостью условий залегания рудных тел. Мощность рудных тел колеблется от 0,6 до 8 м, угол падения от 35 до 50°. Руды и вмещающие породы месторождения достаточно устойчивы, коэффициент крепости руд по шкале М.М. Протодяконова 10 – 14, пород 8 – 14.

Вышележащий этаж отработан системой с обрушением руды и вмещающих пород. Данная система разработки в целом соответствует горно-геологическим и горно-техническим условиям месторождения в новом этаже, однако ее применение не позволяет обеспечить полноту извлечения запасов и эффективность горных работ (потери руды до 25 %, разубоживание более 30 %). Учитывая изменившиеся условия, разработаны три рациональных варианта модернизации технологии подземной добычи руды на руднике «Скалистый» при переходе на новый этаж.

Вариант 1. Вскрытие этажа осуществляется автоуклоном (количество подэтажей 6), его разработка – подэтажно-камерной системой с последующим обрушением целиков и площадным выпуском руды (рис. 1). Порядок отработки этажа – сверху вниз. Данная технология предусматривает использование погрузо-доставочных машин с дистанционным управлением, что позволяет улучшить показатели извлечения руды и повысить безопасность горных работ.

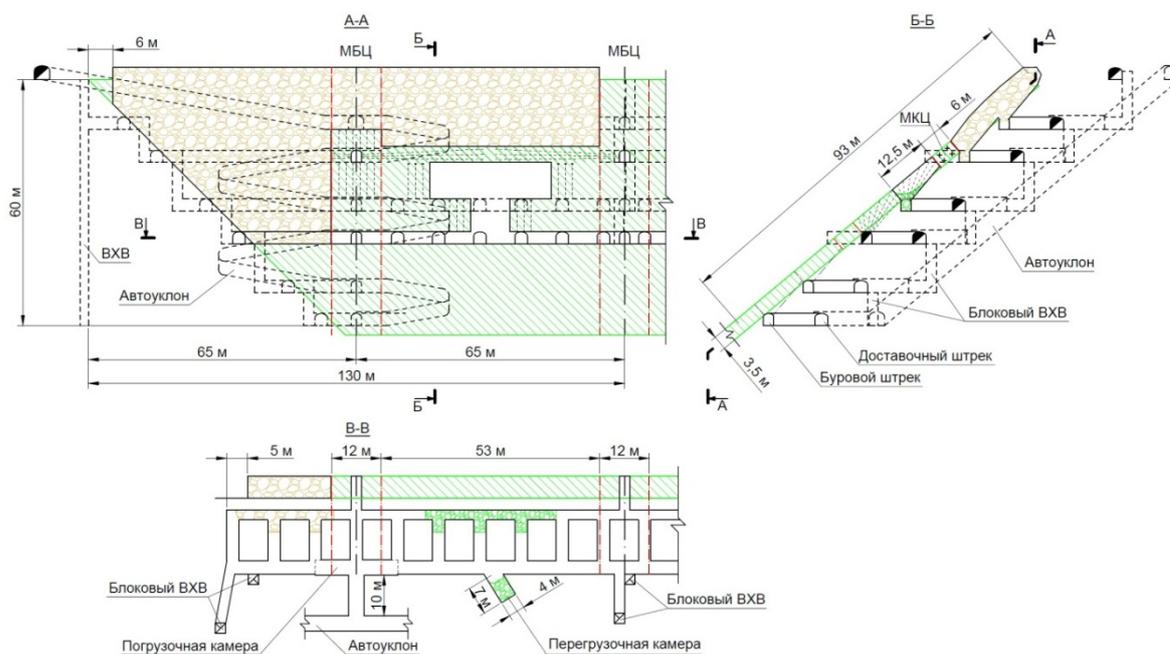


Рис. 1. Подэтажно-камерная система с последующим обрушением целиков и площадным выпуском руды (вариант 1)

Вариант 2. Вскрытие этажа осуществляется автоуклоном (количество подэтажей 8), его разработка – системой подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды (рис. 2). Порядок отработки этажа – сверху вниз.

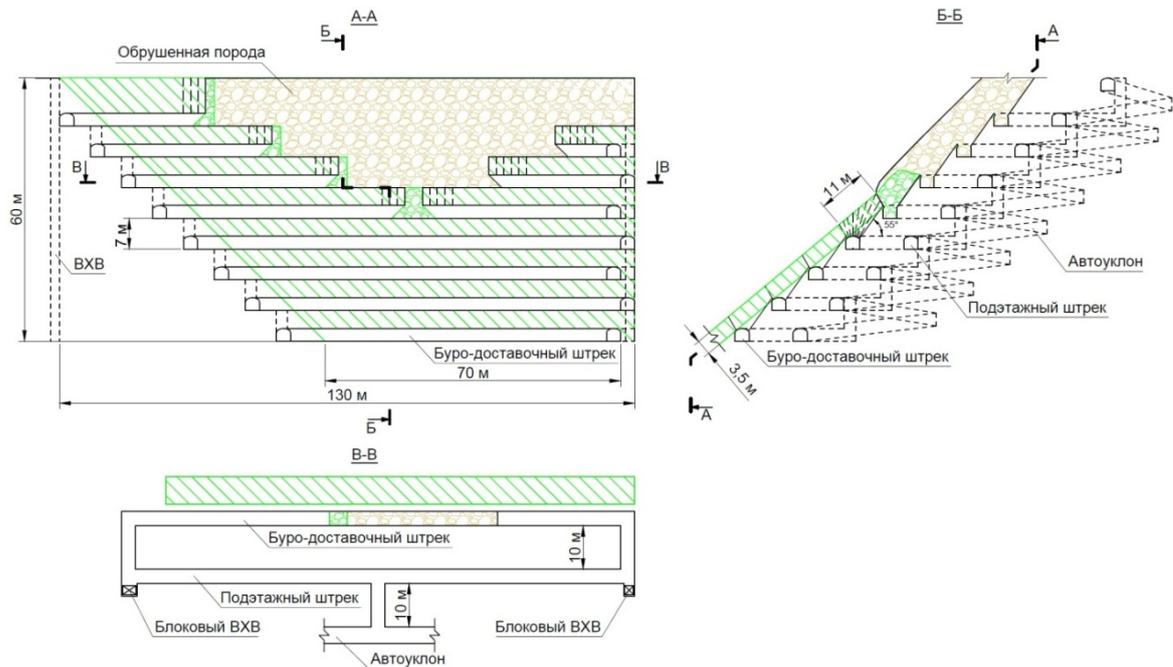


Рис. 2. Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды (вариант 2)

Вариант 3. Вскрытие этажа осуществляется автоуклоном (количество подэтажей 20), его разработка – системой горизонтальных слоев с породной закладкой (рис. 3). Порядок отработки этажа – снизу вверх.

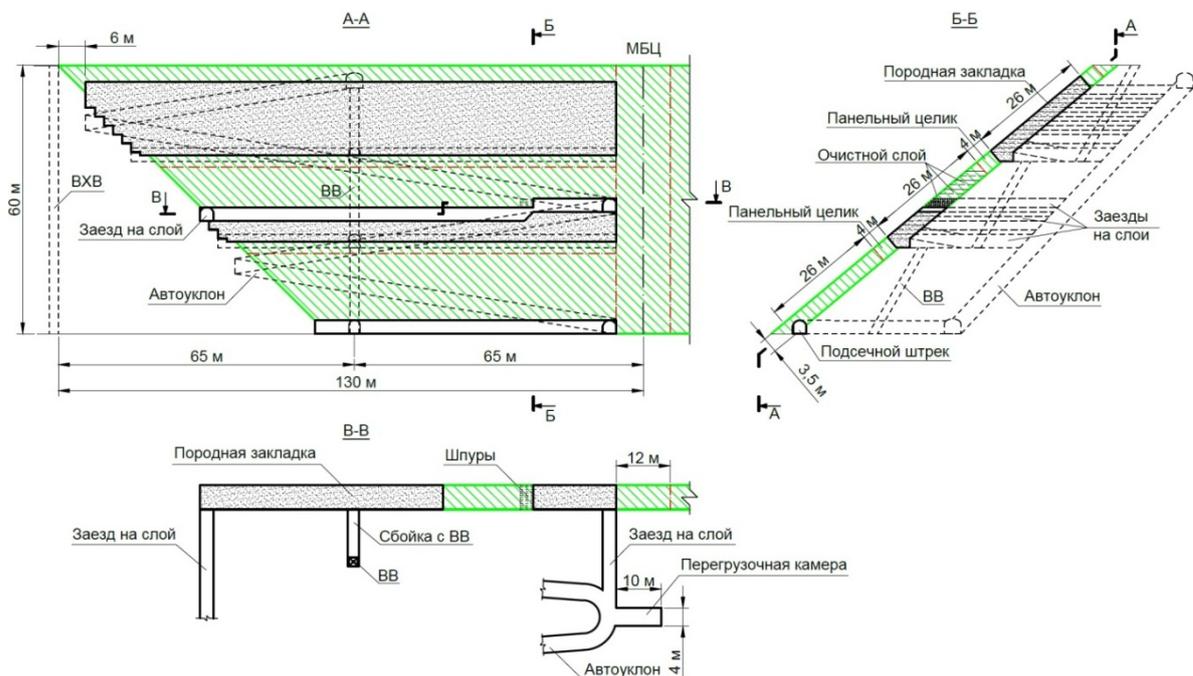


Рис. 3. Система разработки горизонтальными слоями снизу-вверх с породной закладкой (вариант 3)

На основе экономико-математического моделирования (ЭММ) по разработанной методике (1 – 3) определены основные технико-экономические показатели (ТЭП) и выполнена сравнительная оценка вариантов модернизации технологии подземной добычи руды при переходе на новый этаж (табл. 1).

Таблица 1

ТЭП по вариантам технологической модернизации

Показатель	Ед. изм.	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Среднегодовой доход рудника в стабильный период, D_c	тыс. руб.	80000		
Балансовые запасы переходного этажа, Б	т	107000		
Потери, P_n	%	14,0	33,4	15,4
Разубоживание, P_n	%	13,5	21,5	13,5
Эксплуатационные запасы переходного этажа, $B_{изв}$	т	106382	90780	104650
Содержание меди в балансовых запасах, c	%	3,0		
Производственная мощность рудника в переходный период, A_n	т/год	40000		
Объем ГПР, $V_{гпр}$	м ³	25042	22459	24495
Себестоимость ГПР, $C_{гпр}$	руб/м ³	3500		
Капитальные затраты на ГПР в переходный период, K_n	тыс. руб.	87647	78607	85733
Удельные затраты на отбойку руды, $C_{отб}$	руб/т	120	116	128
Удельные затраты на выпуск и доставку руды, $C_{вып}$	руб/т	246	261	282
Удельные затраты на внутришахтный транспорт руды, $C_{вшт}$	руб/т	43		
Удельные затраты на закладочные работы, $C_{зак}$	руб/т	0	0	253
Удельные общехозяйственные и прочие расходы, $C_{пр}$	руб/т	801		
Удельные затраты на добычу 1 т руды, $C_{доб}$	руб/т	1198	1215	1439
Удельные затраты на обогащение 1 т добытой руды, $C_{об}$	руб/т	762		
Эксплуатационные затраты на добычу и обогащение руды, \mathcal{E}_n	тыс. руб.	197871	209486	230236
Курс доллара, k	руб/\$	76		
Цена 1 т меди на рынке, Z	\$/т	5840		
Содержание меди в добытой руде, a	%	2,71	2,45	2,62
Извлечение меди в концентрат, ε_0	доли ед.	0,83	0,83	0,83
Извлекаемая ценность, C_n	тыс. руб.	482761	431710	466957
Продолжительность переходного периода (отработка этажа), T_n	лет	2,7	2,3	2,6
Среднегодовой доход рудника в переходный период, D_n	тыс. руб.	73053	66355	68072
Снижение доходности, ΔD	тыс. руб. (%)	6947 (8,7)	13645 (17,0)	11928 (14,9)

В результате ЭММ установлено, что среднегодовой доход рудника в переходный период при реализации варианта 1 выше на 10 % и 7,5 % по сравнению с вариантами 2 и 3, соответственно, за счет более высоких показателей извлечения, низких удельных затрат на отбойку, выпуск и доставку руды, отсутствия затрат на закладку, низкой себестоимости добычи руды даже при более высоких объемах ГПР и соответствующих им капитальных затратах. При этом снижение доходности рудника в переходный период по сравнению со стабильным периодом незначительное и составляет 8,7 %.

Переходный период от одной технологии к другой занимает около 3 лет. При этом вскрытие и подготовку переходного блока необходимо начинать примерно за год до начала его эксплуатации. Это время также следует отнести к переходному периоду, так как оно характеризуется резким увеличением капитальных затрат и в целом снижением доходности предприятия. Очевидно, для достижения цели – нового стабильного состояния горного предприятия, имеющего определенный набор ТЭП, должна быть разработана соответствующая виду переходного процесса стратегия – комплексный план действий по решению конкретных технических, технологических и организационных задач.

Таким образом, в период технологической модернизации доходность горного предприятия снижается, а уровень (степень) снижения определяется экономической эффективностью новой технологии и выбранной стратегией развития горных работ.

Заключение

В результате выполненных исследований определены основные виды переходных процессов при подземной разработке рудных месторождений: пространственный, технологический и функциональный. Установлено, что наиболее характерной особенностью технологической модернизации на действующих подземных рудниках является комбинация различных видов (как минимум двух) переходных процессов, характеризующихся изменением шага освоения, параметров системы разработки или уровня механизации проходческих и очистных работ.

Пример технологической модернизации рудника «Скалистый» при переходе на новый этаж показывает, что снижение доходности горного предприятия в переходный период определяется не только экономической эффективностью новой технологии, но и оптимальной стратегией развития горных работ.

Полученные результаты являются основой прогноза изменения параметров и показателей ГТС горных предприятий при их поэтапном технологическом развитии.

Список литературы

1. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., 2018. Особенности технического переоснащения подземных рудников на современном этапе развития геотехнологий. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 113 – 122.
2. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
3. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.
4. Волков Ю.В., Смирнов А.А., Соколов И.В., 2005. Направления развития технологии добычи руды при отработке глубоких горизонтов Естюнинского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 253 – 255.
5. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Барановский К.В., Рожков А.А., 2016. Изыскание подземной геотехнологии при переходе к освоению глубокозалегаю-

щих запасов наклонного медноколчеданного месторождения. *Известия Уральского государственного горного университета*, № 2 (42), С. 47 – 53.

6. Sebutsoe T.C., Musingwini C., 2017. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 117, P. 199 – 206.

7. Соколов И.В., Смирнов А.А., Никитин И.В., 2018. Обеспечение экологической безопасности при разработке Кти-Тебердинского вольфрамового месторождения. *Устойчивое развитие горных территорий*, №4 (38), С. 577 – 585.

8. Рыльникова М.В., Айнбиндер И.И., Крамсков Н.П., Письменный А.В., 2011. Решение геотехнологических задач на отдельных этапах освоения кимберлитовых месторождений Якутии. *Горный журнал*, № 1, С. 55 – 58.

9. Барановский К.В., Никитин И.В., 2014. Инновационная технология вскрытия и отработки глубоких горизонтов Кыштымского месторождения гранулированного кварца. *Проблемы недропользования*, № 2., С. 89 – 95. DOI: 10.18454/2313-1586.2014.02.089.

10. Смирнов А.А., Никитин И.В., 2019. Обоснование типов и методов адаптации горно-технологической системы горного предприятия к изменяющимся условиям подземной разработки. *Известия вузов. Горный журнал*, № 6, С. 14 – 20.

11. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2017. Принципы формирования и критерии оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 9, С. 151 – 160.

12. Айнбиндер И.И., 2016. Модернизация подземной добычи руд на больших глубинах. *Горный журнал*, № 12, С. 51 – 55.

13. Голик В.И., Дзапаров В.Х., Харебов Г.З., 2017. Концепция модернизации технологий подземной добычи руд. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле*, № 2, С. 37 – 45.

References

1. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., 2018. *Osobennosti tekhnicheskogo pereosnashcheniya podzemnykh rudnikov na sovremennom etape razvitiya geotekhnologii* [Features of technical re-equipment of underground mines at the present stage of development of geotechnologies]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 113 - 122.

2. Yakovlev V.L., 2019. *Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Study of transients as new direction of methodology evolution for integrated development of geological resources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 284 p.

3. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. *Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya* [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Pod red. chlen-korr. RAN V.L. Yakovleva. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.

4. Volkov Yu.V., Smirnov A.A., Sokolov I.V., 2005. *Napravleniya razvitiya tekhnologii dobychi rudy pri otrabotke glubokikh gorizontov Estyuninskogo mestorozhdeniya* [Directions of technologies' progression of ore extraction while mining of deep horizons of Estyuninskoye field]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 7, P. 253 – 255.

5. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., 2016. *Izyskanie podzemnoi geotekhnologii pri perekhode k osvoeniyu glubokozalegayushchikh zapasov naklonnogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya* [Exploration of underground geotechnology while transition to development of deep-lying reserves of inclined copper-ore deposit]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, № 2 (42), P. 47 – 53.

6. Sebutsoe T.C., Musingwini C., 2017. *Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine*. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 117, P. 199 – 206.

7. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Nikitin I.V., 2018. *Obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti pri razrabotke Kti-Teberdinskogo vol'framovogo mestorozhdeniya* [Ensuring environmental safety in development of Kti-Teberdinsky tungsten deposit]. *Ustoichivoe razvitie gornyx territorii*, №4 (38), P. 577 – 585.

8. Ryl'nikova M.V., Ainbinder I.I., Kramskov N.P., Pis'mennyi A.V., 2011. *Reshenie geotekhnologicheskikh zadach na otdel'nykh etapakh osvoeniya kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii* [Solving geotechnological problems at some stages of development of kimberlite deposits in Yakutia]. *Gornyi zhurnal*, № 1, P. 55 – 58.

9. Baranovskii K.V., Nikitin I.V., 2014. *Innovatsionnaya tekhnologiya vskrytiya i otrabotki glubokikh gorizontov Kyshtymskogo mestorozhdeniya granulirovannogo kvartsa* [Innovative technology of opening and working out the deep horizons of Kyshtymskoye deposit of granulated quartz]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2., P. 89 – 95. DOI: 10.18454/2313-1586.2014.02.089.

10. Smirnov A.A., Nikitin I.V., 2019. *Obosnovanie tipov i metodov adaptatsii gornotekhnologicheskoi sistemy gornogo predpriyatiya k izmenyayushchimsya usloviyam podzemnoi razrabotki* [Substantiation of adaptation types and methods of mining and technological system of a mining enterprise to changing conditions of underground developing]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 6, P. 14 – 20.

11. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., 2017. *Printsipy formirovaniya i kriterii otsenki geotekhnologicheskoi strategii osvoeniya perekhodnykh zon rudnykh mestorozhdenii podzemnym sposobom* [Formation principles and evaluation criteria for geotechnological strategy of transition zones development by underground method on ore deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulle-ten'*, № 9, P. 151 – 160.

12. Ainbinder I.I., 2016. *Modernizatsiya podzemnoi dobychi rud na bol'shikh glubinakh* [Modernization of underground mining of ores at deep depths]. *Gornyi zhurnal*, № 12, P. 51 – 55.

13. Golik V.I., Dzaparov V.X., Kharebov G.3., 2017. *Kontseptsiya modernizatsii tekhnologii podzemnoi dobychi rud* [Modernization concept for technologies of underground ore mining]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie, tekhnicheskie nauki i nauki o Zemle*, № 2, P. 37 – 45.