



Е. Н. Мальцев
НИИПИ ТОМС¹
главный специалист отдела геологии
evg65@mail.ru

Геолого-технологическое

моделирование физико-механических свойств руд и показателей обогащения твердых полезных ископаемых

¹Россия, 197372, Санкт-Петербург, ул. Оптиков 4, к. 2, бизнес-центр «Лахта».

По результатам геолого-технологического картирования на основе рабочих аналитических зависимостей между технологическими показателями извлечения и физико-механическими свойствами руд, с одной стороны, и вещественными критериями химического и минералогического составов руд, с другой стороны, была разработана пилотная геолого-технологическая блочная модель месторождения золота. Перспективность геолого-технологического моделирования в планировании горных работ основана на высокой экспрессности и надежности оценок технологических характеристик руд в сочетании с более низкой стоимостью и трудоемкостью выполнения работ

Ключевые слова: контроль качества руды; геолого-технологическая блочная модель; технологические свойства; физико-механические свойства руд; планирование производственных показателей

Главной целью геолого-технологического моделирования является использование экспериментальных данных технологических исследований тестовых проб (дорогостоящих и трудозатратных) в комплексе с расчетными результатами аналитических построений, что позволяет рассчитать технологические показатели через зависимости технологических показателей от вещественных параметров, полученных более дешевыми методами исследований. Перспективность аналитического

подхода основана на высокой экспрессности и надежности оценок технологических характеристик руд в сочетании с более низкой стоимостью и трудоемкостью выполнения работ.

В основе всех методов построения блочных моделей лежит привязка показателей изменчивости к фактическим данным опробования с использованием известных алгоритмов интерполяции для заполнения «межскважинного» пространства прогнозными значениями. Существует несколько подходов к построению гео-

лого-технологического блочной модели (ГТБМ) месторождений, основанных как на прямом, так и косвенном способе задания технологических параметров в блочную модель. Прямой способ базируется на интерполяции параметров в блочную модель, используя для интерполяции только экспериментальные данные лабораторных исследований руд в ходе проведения геолого-технологического картирования (ГТК). Косвенный способ основан на прогнозировании показателей переработки руды по их зависимостям от геолого-минералогических факторов (способ наиболее инновационный и перспективный для использования при ГТК). В статье приведен практический опыт инновационных геолого-технологических исследований и построения геолого-технологического блочной модели на одном из золоторудных месторождений Иркутской области.

Геолого-технологическое картирование и построение ГТБМ

При разработке пилотной геолого-технологической блочной модели (ГТБМ) с целью детального изучения технологических и физико-механических свойств руд и достоверного определения их пространственной изменчивости были выполнены следующие работы.

1. Разработаны критерии предварительной типизации руд по природным и технологическим свойствам для установления зависимостей показателей обогащения и физико-механических свойств от параметров природных свойств руд по результатам отчетной документации ранее проведенных работ. По результатам анализа исходных данных были выделены два критерия предварительной типизации руд по природным свойствам руд: литологический (по степени карбонатизации пород) и минералогический (по степени интенсивности сульфидной минерализации).

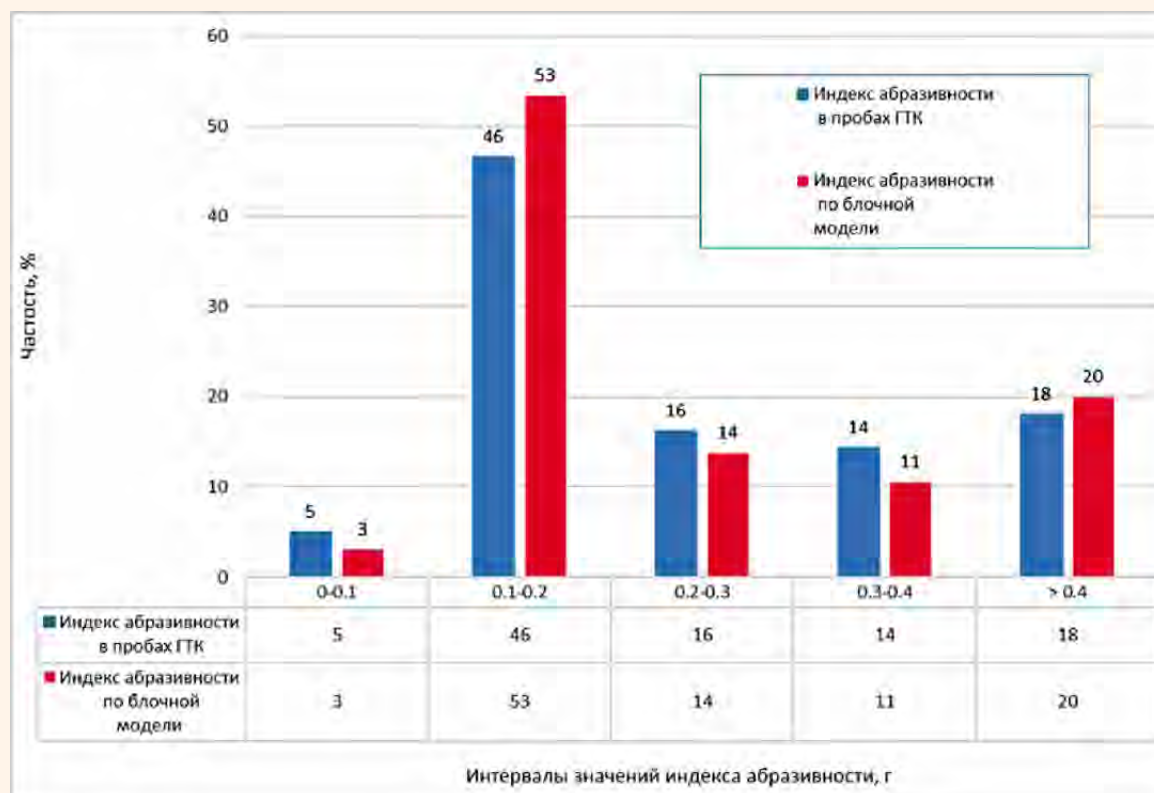
2. С учетом выделенных критериев выполнена оцифровка первичной геологической документации и идентификация проб базы данных опробования в соответствии с типизацией руд по природным свойствам (6 типов руд).

3. Разработаны программа и требования для формирования проб с указанием проектных данных заложения скважин ГТК, объемов бурения и опробования, сведений по основным характеристикам литологического и минерального состава руд, а также расчетных показателей содержания золота и массы частных проб, намеченных для технологического опробования.

4. Осуществлялось методическое сопровождение программы ведения буровых работ по

Рис. 1.

Гистограмма распределения частот относительного количества ячеек ГТБМ (красный цвет) и количества интервалов фактических проб ГТК (синий). Статистика распределения – по значению индекса абразивности



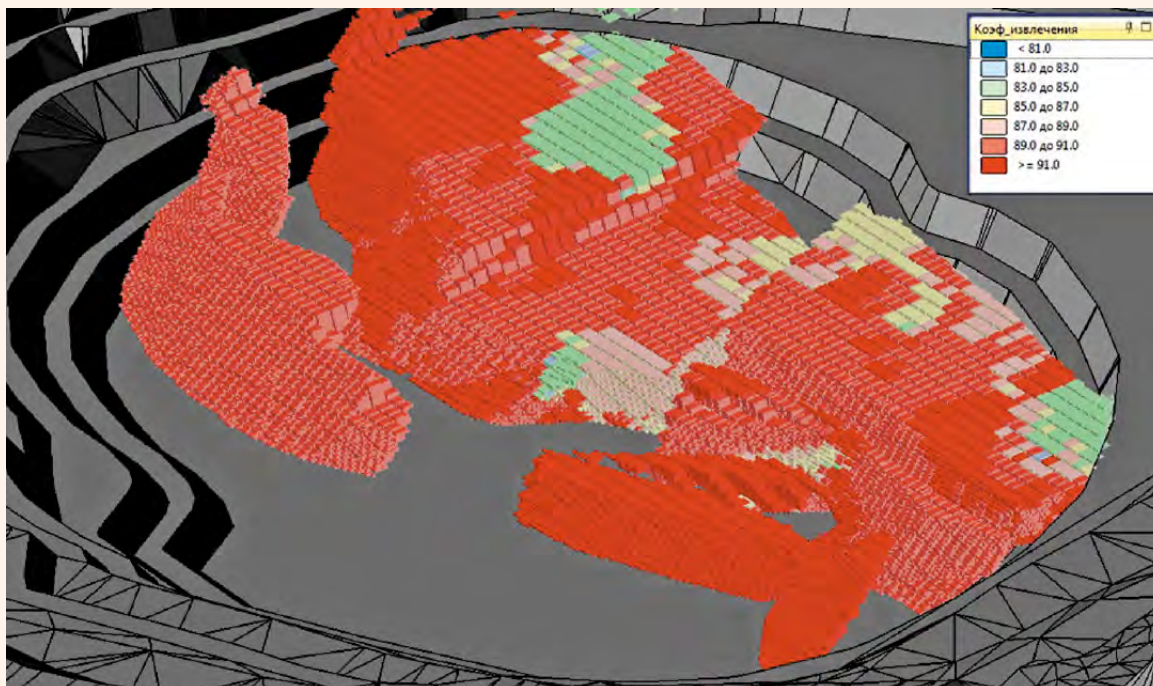


Рис. 2.

Геолого-технологическая блочная модель в цветовой градации значений извлечения золота

геолого-технологическому картированию, были сформированы выборки частных проб с учетом требований к отбору. По результатам работ было отобрано 20 технологических проб (массой около 200 кг каждая) по 23 скважинам ГТК общим весом 3978 кг.

5. Проанализированы результаты изучения физико-механических свойств проб руды, вещественного состава и технологических исследований проб.

6. Разработаны следующие методики геолого-технологического моделирования:

– **прямой способ**, в котором при моделировании используется интерполяция (с кригингом, с применением метода обратных расстояний, радиально базисных функций) результатов прямых технологических экспериментов на материале малообъемных или лабораторных технологических проб, что позволяет заполнить «межскважинное» пространство прогнозными значениями. Одной из основных проблем технологического моделирования является постоянная ограниченность количества данных для интерполяции технологических показателей руды. В сравнении с базами данных по химическому и вещественному составу руд, которые могут насчитывать сотни или тысячи проб, количество достоверных результатов технологических исследований на два-три порядка меньше. Поэтому данный традиционный подход используется для краткосрочного планирования добычи отдельных рудных тел, эксплуатационных блоков, а также на начальном этапе проведения

ГТК, когда экспериментальные данные исследований проб, весьма трудозатратных, требующих современного и дорогостоящего оборудования, используются для заверки и сопоставления компьютерных моделей. Поскольку на начальном этапе проведения ГТК, благодаря выполненной программе бурения скважин, было отобрано представительное количество технологических проб (20 проб), данные блочной модели, рассчитанной **прямым способом**, используются в качестве основных показателей (как наиболее достоверные) для краткосрочного планирования добычи на период отработки 2019–2022 гг.;

– **косвенный способ**, – интерполяция данных на основе рабочих аналитических зависимостей между показателями извлечения, а также физико-механических свойств с одной стороны и факторами вещественного состава по материалам химического или минералогического анализа, с другой. Необходимо понимать, что блочная модель извлечения и физико-механических свойств руд, рассчитанных по уравнению регрессии, по мнению автора, является наиболее перспективной и привлекательной для разработки комплексной программы геолого-технологического картирования на средне- и долгосрочную перспективу. В целом, главной особенностью комплексного подхода является использование экспериментальных данных технологических исследований тестовых проб, которые являются более дорогими и трудозатратными, в комплексе с аналитическим подходом, позволяющим рассчитать технологические показатели через

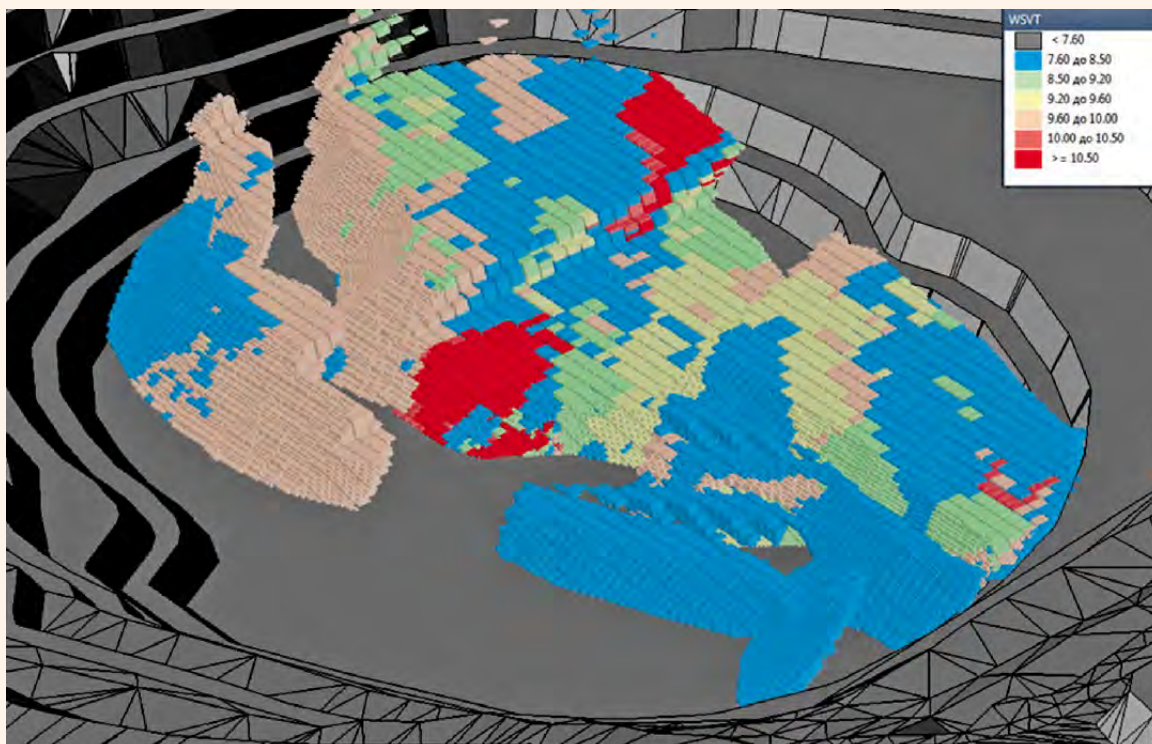


Рис. 3.
Геолого-технологическая блочная модель в цветовой градации значений индекса полусамоизмельчения, WSVT (кВт·ч/м)

их зависимость от вещественных параметров, полученных более дешевыми методами исследований. Перспективность аналитического подхода основана на высокой экспрессности и надежности оценок технологических характеристик руд в сочетании с более низкой трудоемкостью выполнения работ [1, 5]. В итоге – на основе различных методов и подходов выполнено построение геолого-технологической блочной модели (ГТБМ), в которой для каждого блока геологической модели рассчитаны показатели извлечения золота и показатели физико-механических свойств руд. Проанализированы результаты (пример анализа частостей относительного количества ячеек модели и количества интервалов фактических проб ГТК по значению индекса абразивности приведен на **рис. 1**) построения геолого-технологической блочной модели различными методами и даны рекомендации по использованию;

7. Разработана комплексная программа геолого-технологического картирования на среднесрочную перспективу не менее 5 лет с различным соотношением между методами и подходами в зависимости от конкретных условий.

В дальнейшем по вновь полученным данным геолого-технологического картирования, включающим результаты исследований вещественного состава, в сочетании с технологическими испытаниями руд, рекомендуется вы-

полнять актуализацию и пополнение постояннодействующей ГТБМ, на основе которой будут планироваться и корректироваться производственные показатели ГОКа, а также определяться расходы материально-технических ресурсов. Общий вид блочной модели в цветовой градации значений извлечения золота и физико-механических свойств руд по выемочному блоку представлены на **рис. 2–4**.

Использование данных ГТБМ в планировании горных работ

Календарное планирование дает возможность пользователю интерактивно создавать последовательность извлекаемых блоков и автоматически смешивать их в такой пропорции, чтобы достигать поставленной цели. Основным и главным результатом процесса компьютерного планирования является экономическая эффективность отработки единичного блока или участка месторождения. Поскольку коэффициент извлечения или индекс абразивности – величина переменная, которая также непрерывно распределена в трехмерном пространстве, как и содержание, и точно таким же образом влияет на величину прибыли единичного блока, то и степень влияния на последующие расчеты при планировании горных работ также зависит от амплитуды колебаний этих значений.

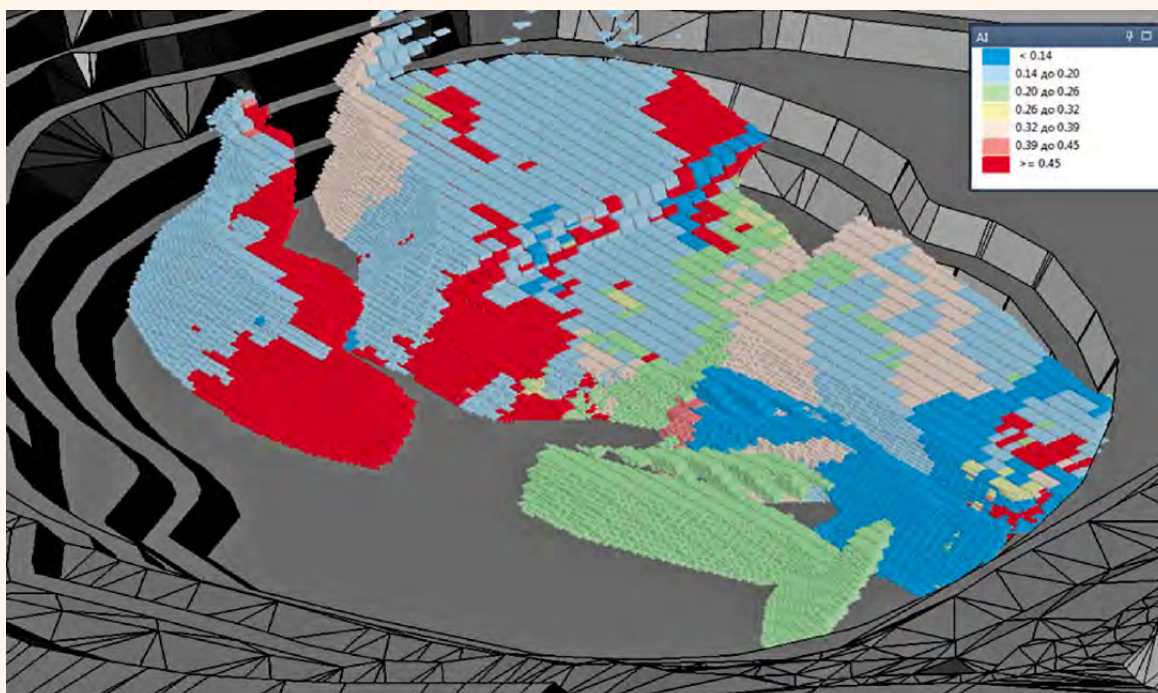


Рис. 4.

Геолого-технологическая блочная модель в цветовой градации значений индекса абразивности, AI (z)

Специалисты ООО НИИПИ «ТОМС» выделяют следующие основные перспективные направления повышения эффективности процессов управления качеством руды при использовании компьютерной блочной модели месторождения в условиях работы горнодобывающего предприятия.

1. Оперативная корректировка и актуализация блочной модели месторождения по данным эксплуатационного опробования. Оперативная оценка запасов добычного блока на основе пространственного распределения содержаний полезного компонента по данным проведения экспресс-анализа содержаний.

2. Разработка разумной стратегии использования блочной модели месторождения в сочетании с применением бортового содержания полезного компонента в блоке блочной модели в качестве параметра кондиций позволяет выполнять подсчет объемов и качественных показателей рудных сортов и выемочных единиц, снижая риски и повышая прибыльность проекта, не нарушая принципов рационального использования недр. Важной составляющей стратегического планирования является определение бортового содержания на каждом этапе планирования. Блоки представляют собой объемы горной массы, в которых оценены содержания по данным блочной модели. При этом также определена технология горных работ и переработки руды, позволяющая оценить наиболее вероятный диапазон затрат на горные работы и переработку руды. Стратегия планирования

состоит в том, чтобы использовать более высокие затраты или низкие цены продукции в начальной стадии и затем, для каждой последовательной стадии, понижать затраты или увеличивать цены продукции. В результате – начальная стадия будет иметь высокий борт, а каждая последующая стадия будет иметь более низкий борт благодаря использованию рудных складов с учетом плавающего бортового содержания для текущих экономических условий и текущего этапа планирования [2, 3]. При этом порог разделения между рудой и породой определяется по безубыточному бортовому содержанию (ББС), обеспечивающему окупаемость затрат на добычу. Формулы для аналитического расчета безубыточного бортового содержания при различных условиях добычи полезного ископаемого и его переработки являются предметом исследований и дискуссий, поэтому рассмотрим (на **рис. 5**) наиболее простую и показательную формулу, в которой учитываются основные показатели: Z – затраты на добычу и переработку; C – цена металла; I – извлечение при переработке.

Важно заметить, что несмотря на существующий в России приоритет оконтуривания и оценки запасов руды по утвержденному экспертизой ГКЗ бортовому содержанию, передовые горнодобывающие предприятия приходят к необходимости оконтуривания рентабельных участков недр через применение механизма плавающего бортового содержания по блочным моделям.

3. Создание и корректировка в графической среде трехмерных цифровых моделей факти-

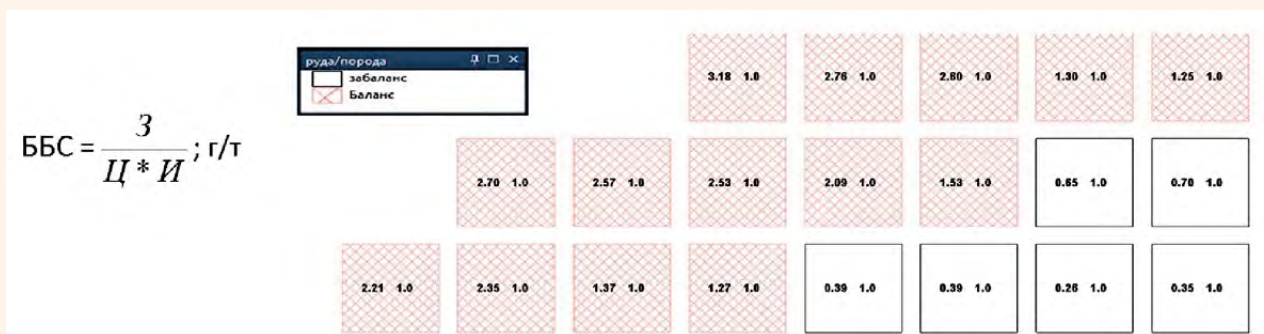


Рис. 5.

Формула для аналитического расчета безубыточного бортового содержания и пример разделения между балансовой (розовая штриховка) и забалансовой рудой на фрагменте блочной модели с указанием: слева – оцененных содержаний золота по данным блочной модели; справа – рассчитанного безубыточного бортового содержания (1,0 г/т)

ческого положения горных выработок и карьеров с целью их визуализации, редактирования, вычисления объемов горной массы и подсчета количества добытого полезного ископаемого [6].

4. Проектирование карьеров на основе выбранных этапов отработки; планирование формирования складов и отвалов; создание моделей выемочных единиц; планирование отработки выемочных единиц, набор объемов годового плана ведения горных работ. Переход к квартальному, месячному, недельному, суточному и сменному планированию и т.п.

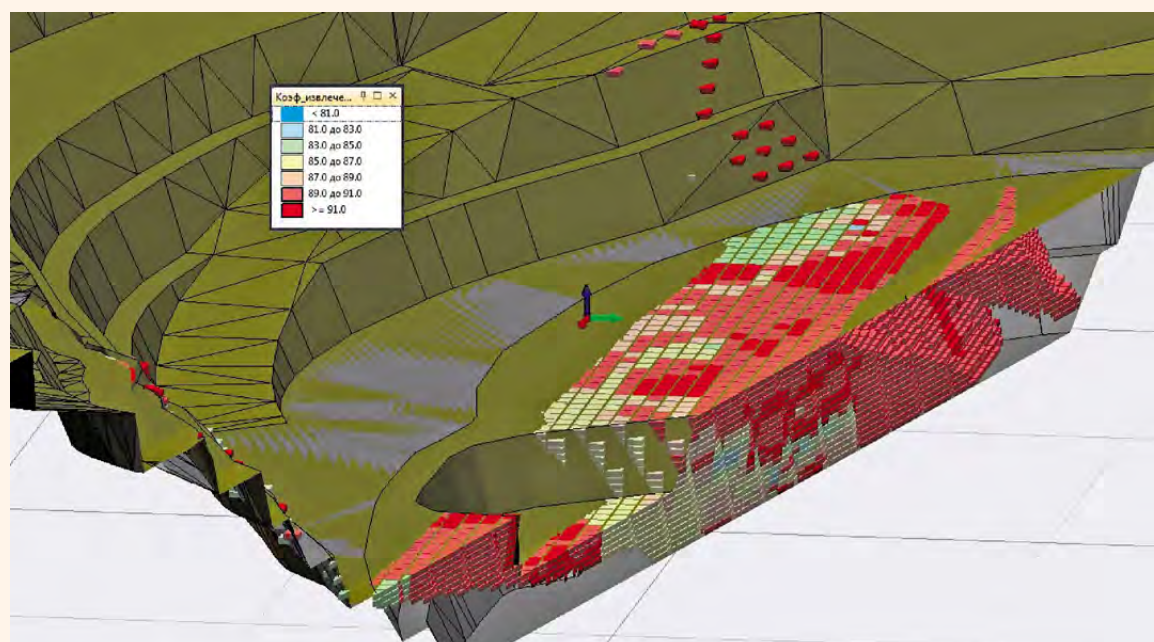
5. Сопоставление данных разведки и эксплуатации месторождения с целью изучения достоверности и подтверждения запасов на основе учета данных эксплуатационной разведки.

6. Планирование технологических показателей. Использование в составе компьютерной блочной модели месторождения геолого-тех-

нологической блочной модели (ГТБМ) является наиболее перспективным и привлекательным направлением для разработки комплексной программы геолого-технологического картирования на перспективу. В целом, главной особенностью комплексного подхода является использование экспериментальных данных технологических исследований проб, которые являются более редкими (единицы или первые десятки проб), дорогостоящими и трудозатратными, в комплексе с аналитическим подходом, который позволяет рассчитать технологические показатели, а также физико-механические характеристики рудоподготовки через зависимости технологических показателей от вещественных параметров, полученных более дешевыми методами исследований, например методами химического анализа рядовых проб (количеством в сотни, а возможно и тысячи проб).

Рис. 6.

ГТБМ1 с показателями извлечения на материале лабораторных технологических проб



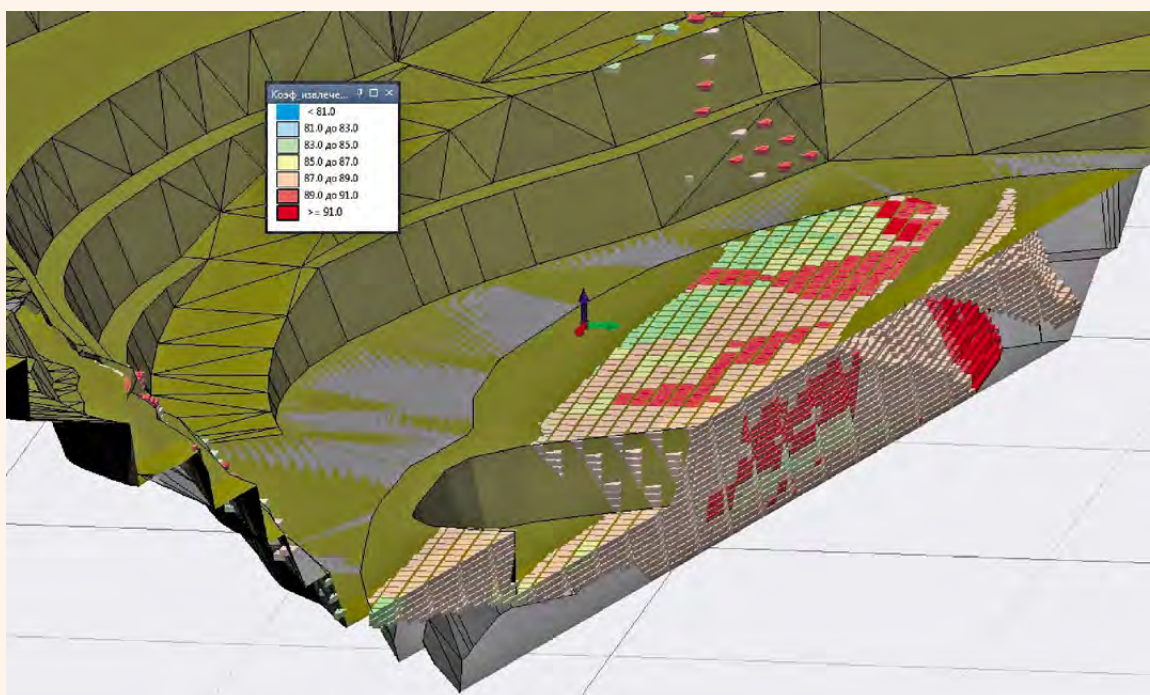


Рис. 7.

ГТБМ2 на основе рабочих аналитических зависимостей между показателями извлечения и факторами вещественного состава

Простейший пример использования данных ГТБМ при планировании горных работ реализован с использованием программного продукта горно-геологического назначения *MICROMINE* и пакета *MS Office*.

За основу календарного плана была взята топооснова с положением карьера на 01.01.2019, обозначенная на **рис. 5** и **6** зеленым цветом, и ГТБМ участка, планируемого к отработке.

Развитие горных работ предполагается на запад и восток на горизонты 780, 790 и 800 м с понижением горных работ на 10-метровый уступ (гор. +780 м – каркас серого цвета).

В расчете календарного плана были использованы сравнительные данные двух моделей: экспериментальной модели, проинтерполированной на материале лабораторных технологических проб (ГТБМ1 – **рис. 6**), и аналитической модели, рассчитанной на основе рабочих регрессионных зависимостей между коэффициентом извлечения и данными химического состава руд (ГТБМ2 – **рис. 7**).

Выгрузка из ГТБМ сводных данных по извлечению золота, а также основных характеристик физико-механических свойств руды по выемочному блоку (для намеченного периода отработки, по горизонтам), показанная в **табл. 1**,

Таблица 1.

Сравнение качественных показателей, полученных экспериментальным путем на материале лабораторных технологических проб (ГТБМ1), с показателями, рассчитанными на основе рабочих аналитических зависимостей (ГТБМ2) для участка отработки

Горизонт	Тоннаж, т	Плотность, т/м ³	AU (г/т)	Извлечение Au (%) ГТБМ_1	Извлечение Au (%) ГТБМ_2	Абразивность AI (г) ГТБМ_1	Абразивность AI (г) ГТБМ_2
800–810	16 335	2,79	4,40	89,89	88,43	0,2074	0,2077
790–800	794 010	2,81	3,46	89,56	88,55	0,2551	0,2494
780–790	1 093 767	2,8	3,35	89,63	88,44	0,2662	0,2527
Итого	1 904 112	2,8	3,41	89,6	88,5	0,2611	0,2509

также свидетельствует о высокой сходимости и надежности результатов прогнозной оценки, выполненной на основе рабочих аналитических зависимостей.

Данные, полученные из программы горно-геологического назначения, экспортируются, например, в электронные таблицы *Excel* и передаются в планово-экономическую службу предприятия для планирования технико-экономических показателей производства на определенный период времени. Данные ГТБМ необходимо использовать как при планировании производственных показателей в рассматриваемый пе-

риод времени, так и в обозримом будущем при разработке ГТБМ для всего месторождения в целом.

Геолого-технологическая блочная модель месторождения, являясь продуктом компьютерных технологий, предусматривает достоверное определение пространственной изменчивости технологических свойств руд наряду с содержанием полезных компонентов, поэтому позволяет принимать оптимальный план добычи для конкретных горно-геологических условий предприятия и обоснованные решения на перспективу. ⁽¹¹⁾

Литература

1. Изоитко И.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука. 1997. 532 с.
2. Капутин Ю.Е. Повышение эффективности управления минеральными ресурсами горной компании (геологические аспекты). СПб.: Недра. 2013. 246 с.
3. Капутин Ю.Е. Системы контроля содержания (Grade Control) на горных предприятиях. СПб.: Недра. 2012. 330 с.
4. Коц Г.А. Технологическое опробование и картирование месторождений. М.: Недра. 1980. 288 с.
5. Остапенко П.Е. Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья. Справочник. М.: Недра. М. 1990. 272 с.
6. Мальцев Е.Н., Прокопенков А.С. Основные принципы создания комплексной системы управления качеством руды на всех стадиях технологического процесса освоения месторождения // Золото и технологии. 2016. № 3(33). С. 96–99.

UDC 553.048

E.N. Maltcev, Chief Specialist of the Geology Department, NIPI TOMS¹, evg65@mail.ru

¹4 Optikov str., bldg. 2, business center "Lakhta", St. Petersburg, 197372, Russia.

Geological and Technological Modelling of Physical and Mechanical Ore Properties and Solid Commercial Minerals Beneficiation Measures

Abstract. The pilot geological and technological block model of a gold deposit was created on the results of geological and technical mapping on the basis of relevant analytical dependences between mining process parameters and physical and mechanical ore properties on the one hand, and real criteria of chemical and mineralogical composition of ore on the other hand. The potential of geological and technological modelling in planning of mining operations is based on fastness and reliability of estimation of ore material technological characteristics in conjunction with lower costs and labour intensity of the work.

Keywords: ore quality control; geological and technological block model; technological properties; physical and mechanical ore properties; planning of performance indicators.

References

1. Izoitko I.M. *Tekhnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud* []. St. Petersburg, Nauka Publ., 1997, 532 p.
2. Kaputin Iu.E. *Povyshenie effektivnosti upravleniya mineral'nymi resursami gornoj kompanii (geologicheskie aspekty)* [Improving the efficiency of management of mineral resources of a mining company (geological aspects)]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2013, 246 p.
3. Kaputin Iu.E. *Sistemy kontrolya soderzhaniya (Grade Control) na gornykh predpriyatiakh* [Grade Control systems in mining enterprises]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2012, 330 p.
4. Kots G.A. *Tekhnologicheskoe oprobovanie i kartirovanie mestorozhdenii* [Technological testing and mapping of deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 288 ps.
5. Ostapenko P.E. *Tekhnologicheskaya otsenka mineral'nogo syr'ya. Oprobovanie mestorozhdenii. Kharakteristika syr'ya. Spravochnik* [Technological assessment of mineral raw materials. Testing of deposits. Characteristics of raw materials. Directory]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 272 p.
6. Mal'tsev E.N., Prokopenkov A.S. *Osnovnye printsipy sozdaniya kompleksnoi sistemy upravleniya kachestvom rudy na vsekh stadiakh tekhnologicheskogo protsessa osvoeniya mestorozhdeniya* [Basic principles of creating an integrated system of ore quality management at all stages of the technological process of deposit development]. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and technology], 2016, no. 3(33), pp. 96–99.