

А.М. Валуев

# ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ НАДСТРОЕК НАД ПРОГРАММНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Предложен проблемно-ориентированный подход — построение оптимизационных надстроек с ориентацией на более узкую область применения и взаимодействием с конкретными ПППГП на уровне обмена данными. Рассмотрены способы решения возникающих при их создании задач: создания средств описания задачи в пользовательских терминах совместно со средствами его интерпретации для расчетов; реализации общей проблемно-ориентированной модели месторождения и карьера и средств преобразования в нее данных из БД ПППГП; создание комбинированного интерфейса для определения некоторых пространственных параметров и отображения результатов расчетов в интерактивном режиме в табличном и упрощенном графическом виде. Описан и проанализирован опыт реализации элементов этого подхода и задачи по его развитию, в т.ч. реализация методов многокритериальной оптимизации.

Ключевые слова: принятие решений, оптимизация, карьер, проектирование горных работ, моделирование горных работ, САПР, человеко-машинный диалог.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-215-223

## Введение

Потребность в использовании оптимизационных методов для принятия проектных решений в горной промышленности бесспорна, что подтверждается многими публикациями последних лет на эту тему [2–4, 6, 9, 10]. Тем не менее, их практическое применение очень ограничено, за исключением некоторых традиционных задач. Более того, создание и совершенствование применяемых в промышленном масштабе пакетов программ автоматизированного проектирования горных предприятий (ПППГП) не только создает условия для применения

оптимизационных методов на системной основе, но и, одновременно, выдвигает высокие требования к их реализации, удовлетворить которые очень непросто.

Создается порочный круг: пользователь уже привык пользоваться интерактивным режимом работы с ПППГП и явно не требует чего-то нового, разработчики ПППГП, сопоставляя несомненные затраты с весьма неопределенной отдачей (в особенности в отношении времени возврата вложенных средств), не рискуют всерьез заняться реализацией оптимизационных методов. Тем самым их эффект не находит убедительного под-

тверждения для предметных специалистов, и ситуация консервируется.

Выходом из нее представляется создание узко направленных программных систем — оптимизационных надстроек (ОпН) над ПППГП, которые, извлекая необходимую геологическую и технологическую информацию из ПППГП, позволяли бы пользователю определять отдельные оптимизационные задачи проектирования, получать их решения и возвращать их в ПППГП. В настоящей работе предлагается ряд решений по разработке таких систем, опирающихся, в т.ч., на опыт автора по разработке и применению оптимизационных программ в рассматриваемой предметной области. Изложение данного подхода в основном ограничивается областью открытой разработки месторождений.

### **Модели горных работ**

Решение оптимизационных задач проектирования горных работ должно опираться на два взаимосвязанных элемента: модель горных работ и практически применимые методы решения основанных на ней задач. Во всех распространенных ПППГП используются в разном контексте два принципа представления горных выработок — дискретный (в виде набора блоков) и с помощью систем характерных линий (бровок уступов, осей трасс). В интерактивном режиме для этих представлений применяются существенно различающиеся инструменты манипулирования, то же справедливо для оптимизационного подхода — методы оптимизации в дискретных и непрерывных переменных кардинально различаются и их совместное использование проблематично. Возможны два способа построения ОпН — для решения круга задач в одном классе моделей, и более развернутый, ориентированный на разные типы моделей и обслуживающих их методов. В последнем случае ОпН дол-

жен включать средства преобразования из одной формы модели в другую без существенной погрешности.

Для разнородных условий залегания и при использовании разнотипных технологических схем бесспорные преимущества будут иметь ОпН второго типа, но они сложны в реализации. Более простые по построению ОпН первого типа имеют хорошие перспективы в более узкой области применения, поскольку конструктивные возможности для постановки и решения оптимизационных задач проектирования и планирования горных работ в определенном классе моделей тесно связаны с условиями горного производства. Такие ОпН и будут проблемно-ориентированными.

Для глубоких карьеров текущие границы на соседних уступах тесно взаимосвязаны по условиям ведения горных работ, а их форма обеспечивает проезд карьерного транспорта, что ограничивает их извилистость. В связи с этим описание границ системой линий, приближенно описывающих бровки уступов, является наиболее адекватной [2, 11, 13]. Важно, что решение различных задач оптимизации горных работ или совместно — горных и транспортных работ — эффективно выполняется на моделях такого типа, в т.ч. для условий крупных карьеров [7].

Напротив, дискретная оптимизация для таких условий сталкивается с серьезными вычислительными затруднениями. Так, в работе приверженцев применения частично-целочисленного линейного программирования в рассматриваемой области показывается, что только путем укрупнения блоков по их удается получить решение [12], которое с необходимостью будет весьма грубым. Авторы из Криворожского национального университета в статье [4] и последующих работах описывают опыт применения своего подхода к дискретной оптимизации раз-

вития горных работ в карьере. Предлагаемый эвристический метод позволяет учесть основные технологические взаимосвязи и ограничения, но не может обеспечить оптимальности и даже гарантированно установить совместимость требований к плану. Набор возможных критериев оптимальности ограничен (минимальное отклонение набираемых объемов руды от планового задания, минимальное отклонение набираемых объемов меди от планового задания, минимальное отклонение содержания меди в руде от планового), что далеко не исчерпывает возможных целей.

Наоборот, при проектировании работ на месторождении из разбросанных рудных тел небольшого объема не происходит концентрации работ и оборудования; тогда сведение горных работ на каждом участке к небольшому набору вариантов вполне адекватно. В этом слу-

чае после некоторых преобразований варианты развития горных работ сводятся к последовательности допустимых переходов между промежуточными состояниями. Это формализуется как оптимизация траектории на графе состояний и переходов и схематически представляется рис. 1.

При наличии  $N$  участков (горных и отвальных работ) и возможных состояниях  $i$ -го  $\{S_{i1}, \dots, S_{im}\}$  состояния всей системы могут быть обозначены как  $(S_{1j(1)}, \dots, S_{Nj(N)})$ , а переходы возможны между такими начальным и конечным состояниями, где между компонентами, относящимися к одному участку, существует допустимый переход. С учетом совместных ограничений — на объем, качество, производительность горных и транспортных машин, затраты на отдельные процессы — большинство таких переходов окажутся неосуществимыми, а следовательно, со-

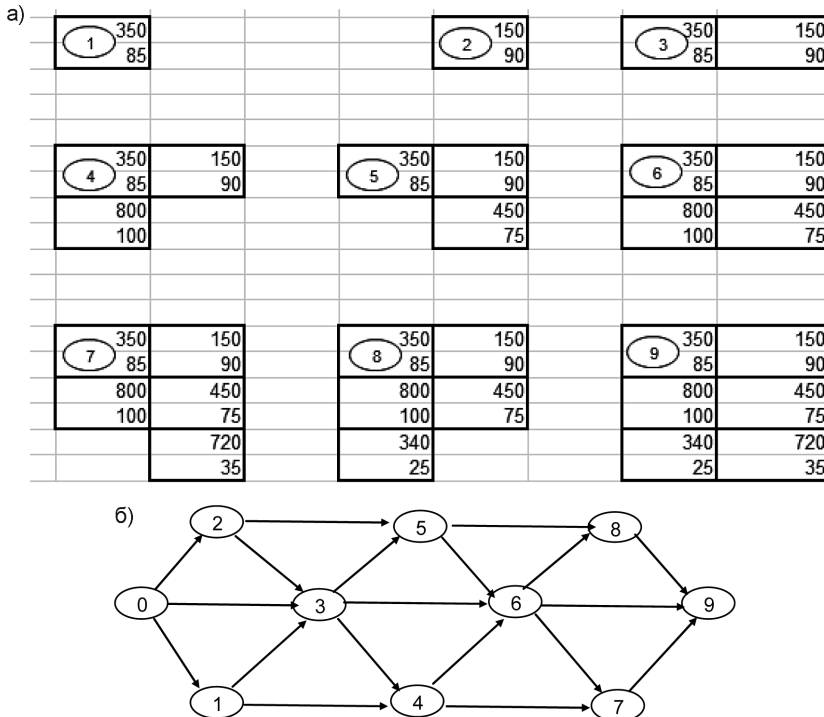


Рис. 1. Набор возможных состояний (а) и оргграф технологически допустимых переходов между ними (б) на отдельном участке

стояния, в которые осуществляются такие переходы, — недостижимыми. Размерность результирующего графа, содержащего лишь допустимые переходы между достижимыми состояниями, оказывается гораздо меньше потенциально возможной. Более того, следуя подходу работы [1], целесообразно постепенно строить в процессе оптимизация траектории лишь эффективный фрагмент графа. При использовании оценок, определяемых условиями решаемой задачи, состояния, через которые заведомо не проходит оптимальная траектория, и переходы в такие состояния будут исключены из генерируемого фрагмента, а область эффективных траекторий войдет в него.

Наиболее сложные условия и технологии горных работ не могут быть выражены при совокупности вариантов в форме модели только с дискретными или только с непрерывными переменными. Например, в работе [5] предложено использовать сложную для ее математического описания схему обработки горизонтов карьера комбинацией горизонтальных и наклонных уступов. Для таких условий можно решать по отдельности оптимизационные задачи для технологических зон, задавая их границы вручную. Такой подход соответствует общим принципам декомпозиции и двухуровневого принятия решения и требует большего участия специалиста в человеко-машинном диалоге, но последний будет выполняться на более высоком уровне принятия решения, чем в обычных ПППГР.

### **Задачи, решаемые при создании оптимизационных настроек**

Создание типовой модели горного производства (горных, транспортных, отвальных работ) является отправным пунктом для разработки ОпН. Она должна иметь форму, универсальную для своей области применения. Модель, используемая для круга проектных задач для

конкретного карьера, является ее детализацией в части размерности, набора переменных, использования ряда необязательных взаимосвязей. В частности, общая модель должна предусматривать возможность произвольного разделения карьерного поля на зоны, различающиеся типом и параметрами используемых горных и транспортных машин, направлением исходящих или входящих грузопотоков. В ОпН реализуется метод или набор методов оптимизации, опробованных на задачах реальной размерности и пригодный для их решения в рамках различных вариантов типовой модели.

В программной системе, описанной в работе [2] и практически примененной для решения широкого круга задач [7], поддерживается общая структура нелинейной секторной модели рабочей зоны глубокого карьера. Могут быть применены варианты модели в рамках общих требований:

- Применительно к конкретному моменту времени для описания поверхности карьера и отвалов используются двухиндексные наборы переменных ( $l$  — номер линии,  $i$  — номер точки на линии).
- Ограничения модели связывают переменные с одинаковыми или отличающимися на 1 значениями  $l$ ). Система ограничений в целом имеет регулярную иерархическую структуру.
- В одно ограничение входит, самое большее, шесть переменных (для ряда форм модели максимальное количество аргументов меньше).

Наряду с поддержанием структуры модели система [2] обеспечивает и средства описания отдельных типов составляющих ее взаимосвязей с помощью формул, напоминающих формулы в ячейках электронных таблиц (ЭТ), но в более наглядной форме. Как и в ЭТ, в формулах могут использоваться операции и функции из заранее заданного и запрограммированного набора. Формульное опи-

сание модели проверяется и преобразуется во внутреннее описание, пригодное для оптимизационных и других расчетов интерпретирующей подсистемой программной системы. Оно действует совместно с описанием структуры данных той же модели, содержащейся в базе моделей – метаданных для расчетов (таблица). Здесь показаны данные, характеризующие объекты разных уровней в иерархии данных (1 – карьер в целом, 2 – участок, 3 – расчетный блок), названия величин, их типы по форме величин ( $r$  – нецелые числа) и по месту в расчетах ( $c$  – входные константы,  $d$  – константы, вычисляемые на их основе,  $u$  – оптимизируемые переменные, относящиеся к этапу,  $v$  – результаты промежуточных расчетов,  $x$  и  $y$  – переменные состояния в начале и конце этапа).

Соотношения, характеризующие условия на выполнение производственных процессов (по всему карьере, зонам, грузопотокам), требования к их резуль-

татам, целевые показатели, дополняют соотношения модели и совместно образуют формальные представления задач. Дополнительные соотношения позволяют вычислять производные величины или определять параметры задачи через входные данные, непосредственно не используемых в ней. Интерпретирующая подсистема поддерживает необходимые средства описания всех перечисленных соотношений.

Ряд соотношения модели включает элементы внутреннего представления геологической модели после типового преобразования данных, импортированных из БД ПППГП. Такие соотношения позволяют вычислить объемы и качество в заданных границах, площади пересечения откосов и площадок уступов с рудными телами, а также производные перечисленных величин по переменным оптимизационной задачи.

Реализованный подход обеспечивает известную наглядность в представ-

#### Элемент структуры данных модели в БД метаданных

Zd_cd	Tab_name	F_level	Pf	Tf	Field_name
e	карьер_e	1	c	r	коэффт_производти
e	карьер_e	1	c	r	макс_руда
e	карьер_e	1	v	r	руда
e	карьер_e	1	c	r	мин_металл
e	карьер_e	1	v	r	металл
e	карьер_e	1	x	r	сумм_металл_0
e	карьер_e	1	y	r	сумм_металл_1
e	карьер_e	1	v	r	потери
e	карьер_e	1	x	r	сумм_потери_0
e	карьер_e	1	y	r	сумм_потери_1
e	карьер_e	1	c	r	нач_борт_содержание
e	карьер_e	1	c	r	б_с10
e	карьер_e	1	d	r	макс_б_с10
e	карьер_e	1	d	r	мин_б_с10
e	участо_e	2	u	r	темп_отработки
e	участо_e	2	u	r	борт_содержание

лении решаемых задач, но только для ИТ-специалистов. Для пользователя-проектировщика должны быть обеспечены другие средства.

Для постановки задач потребуется использовать словарь модели — набор ключевых понятий, который достаточно невелик и включает наименование горных выработок или их частей, временных или постоянных накопителей (отвалов, штабелей руды) производственных операций, понятие грузопотоков с возможной детализацией. С каждым из этих понятий связывается набор переменных, которыми они количественно описываются, в т.ч., возможно, с экономической стороны. В рамках такой системы описания объекта проектирования пользователь получает возможность на качественном и количественном уровне описывать решаемую задачу.

Например, если в задаче должен фигурировать грузопоток определенного назначения и типа горной массы, на долю проектировщика выпадет указать места (забои, участки) погрузки и разгрузки и трассы транспортирования, тип транспортных машин. Для некоторых величин пользователь вводит точное значение или допустимый диапазон (например, длину

экскаваторного блока или максимальное годовое подвигание).

В целом ОпН должна формировать для пользователя качественную картину получаемых элементов проекта в их взаимосвязи. Большинство таких взаимосвязей может быть истолковано в терминах «целое—часть». Например, «карьер — зона вскрышных работ и зона добычных работ», или «карьер — участки», «зона вскрышных работ — зона транспортной вскрыши и зона бестранспортной вскрыши» и т.п. В целом, графовое представление здесь наиболее адекватно и может быть сделано наглядным, как и диалог по его формированию. Некоторые из этих иерархий или их фрагменты уже отражены в БД ПППП и должны быть оттуда извлечены и интегрированы с элементами, определяемыми пользователем уже в диалоге с ОпН.

Кроме качественных решений, проектировщик может определять и отдельные пространственные параметры (большинство переменных, характеризующих пространственное распределение горных работ, должно определяться в результате решения оптимизационных задач). В целом, в ОпН нет необходимости дублировать сложные и многообразные функции

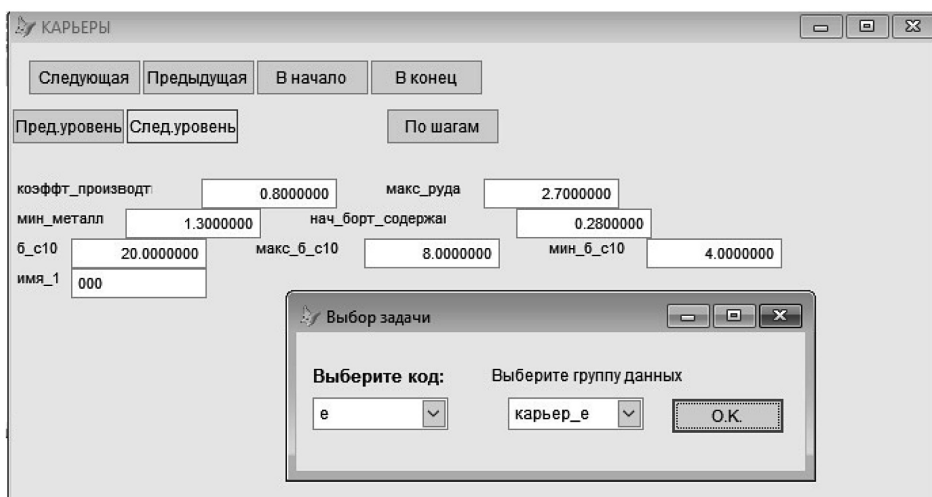


Рис. 2. Диалоговый режим отображения данных расчетов

компьютерной графики, реализованные в ПППГП, однако элементарный графический диалог на двумерных проекциях осуществить нетрудно. Помимо всего прочего, такие упрощенные графические средства помогут осознать результаты оптимизационных вычислений и служить руководством для уточнения постановки задачи без выполнения операций экспорта результатов в ПППГП.

Следует исходить из пользователя-проектировщика имеют опыт работы с базовым ПППГП, надстройка над которым им предлагается. Это облегчает выполнение технических операций по информационному обмену между ПППГР и ОпН.

Результаты расчета по выбору пользователя отображаются в табличном виде как значения указанных величин для объектов, выбранных им в интерактивном режиме навигации по данным расчета. Имеется опыт автоматической генерации соответствующих экранных форм под модель; его можно применить и к сокращенному представлению модели под потребности конкретного пользователя.

На рис. 2 показан пример реализации этого подхода. Используемая здесь структура данных отражена в таблице.

### Выводы

В настоящей работе предлагается ряд взаимосвязанных решений по созданию оптимизационных надстроек над ПППГП, значительная часть которых была успешно опробована при создании программного обеспечения для решения группы оптимизационных задач проектирования горных работ на глубоких угольных разрезах [2]. Упрощенное графическое отображение и графический диалог может быть построен по аналогии с описанным в [4].

Большая часть предложенных решений может применяться также для создания ОпН для других условий открытой разработки, в т.ч. для тех, для которых более адекватны модели дискретного типа. Дальнейшее развитие описанного подхода должно включать также реализацию специализированных методов многокритериальной оптимизации [3, 8].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валуев А. М., Величенко В. В. О задаче планирования полета самолета гражданской авиации по свободному маршруту // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2002. — № 6. — С. 149–157.
2. Валуев А. М. Метод и программа оптимизации рабочей зоны угольного разреза // Горный информационно-аналитический бюллетень — 2003. — № 8. Отдельные статьи. — 22 с.
3. Валуев А. М. Задача Парето-оптимизации траектории на сети как метамодель многокритериального выбора проектных решений для горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11. — С. 215–223.
4. Вилкул Ю. Г., Давидкович А. С., Коробко В. Н. Дискретная оптимизация развития горных работ в карьере на перспективных уровнях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 6. — С. 211–214.
5. Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Гоголев И. Н., Андросов А. Д., Акишев А. Н., Журавлев А. Г. Новые способы и методы ведения горных работ на глубоких алмазодобывающих карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 12. — С. 80–84.
6. Ракишев Б. Р., Молдабаев С. К., Шулаева Н. А. Оптимизация объемов горных работ на примере разреза «Майкубенский» // Горный журнал. — 2011. — № 8. — С. 86–88.
7. Щадов В. М. О развитии горных работ и техническом перевооружении технологического транспорта на разрезе «Нерюнгринский» // Уголь. — 2000. — № 8. — С. 36–40.
8. Azimi Y., Osanloo M., Esfahanipour A. Selection of the open pit mining cut-off grade strategy under price uncertainty using a risk based multi-criteria ranking system // Archives of Mining Sciences. 2012. Vol. 57. Issue 3. Pp. 741–768.



9. *Badiozamani M. M., Askari-Nasab H.* Integrated mine and tailings planning: a mixed integer linear programming model // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. — 2016. Vol. 30. Issue 4. Pp. 319–346.

10. *Kawahata K., Dagdelen K.* An optimization algorithm for large scale mine production scheduling problems through lagrangian relaxation // *Proceedings of the 36th International Symposium on the Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)*. 2013. Pp. 548–560.

11. *Melamud A., Young D. S.* Optimizing Interdependence of Operating Cost // *Proc. of the 24-th Internat. Symp. on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries*. — 1993. Vol. 2. — Pp. 75–82.

12. *Ren H., Topal E.* Using Clustering Methods for Open Pit Mine Production Planning // *Mining Education Australia*. 2014. Pp. 45–48.

13. *Tabakman I. B.* Methods of modeling open mine workings and decision making in automated planning and control // *Journal of Mining Science*. 1987. Vol. 23. No. 1. Pp. 41–43. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Валуев Андрей Михайлович* — доктор физико-математических наук, доцент, профессор, e-mail: [valuev.online@gmail.com](mailto:valuev.online@gmail.com), НИТУ «МИСиС».

---

ISSN 0236-1493. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018. No. 1, pp. 215–223.

**A.M. Valuev**

## PROBLEM-ORIENTED APPROACH TO ADD-IN OPTIMIZATION PROGRAMS FOR MINE PLANNING AND DESIGN SOFTWARE

Decision-making on mine expansion using modern mine planning software packages (MPSP) follows three ways. In man-made dialog, the key decisions are made by a designer. Selection of mining sequence is optimized at the preset priorities without explicit declaration of the objective and constraints of mining conditions.

The only example of the optimization problem with the completely informative formulation is the determination of the ultimate limits of an open pit mine. It follows from the analysis of complications of using optimization techniques in mine planning and design that MPSP assume universal representation of mining operations without process interactions that are not universal but should be taken into account in formulation of an optimization problem. The article offers a problem-oriented approach, namely, development of add-in optimization programs meant for a narrower field of application and capable to exchange data with the specific MPSP.

The issues connected with the add-in optimization programs can be: development of the problem description and data interpretation in user terms; implementation of the general problem-oriented model of a mineral deposit and an open pit mine and tools of MPSP data translation to the model; creation of a combination interface for the determination of spatial parameters and for on-line display of calculation results in the form of tables and simplified graphs.

The experience of implementation of the approach and its advancement goals are described, including multi-criterion optimization.

**Key words:** decision-making optimization, open pit mine, mine planning, modeling.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-215-223

## AUTHOR

*Valuev A.M.*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Professor, e-mail: [valuev.online@gmail.com](mailto:valuev.online@gmail.com), National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.



## REFERENCES

1. Valuev A. M., Velichenko V. V. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2002, no 6, pp. 149–157.
2. Valuev A. M. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no 8. Otdel'nye stat'i. 22 p.
3. Valuev A. M. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 11, pp. 215–223.
4. Viikul Yu. G., Davidkovich A. S., Korobko V. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2004, no 6, pp. 211–214.
5. Zarovnyaev B. N., Shubin G. V., Gogolev I. N., Androsov A. D., Akishev A. N., Zhuravlev A. G. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 12, pp. 80–84.
6. Rakishev B. R., Moldabaev S. K., Shulaeva N. A. *Gornyy zhurnal*. 2011, no 8, pp. 86–88.
7. Shchadov V. M. *Ugol'*. 2000, no 8, pp. 36–40.
8. Azimi Y., Osanloo M., Esfahanipour A. Selection of the open pit mining cut-off grade strategy under price uncertainty using a risk based multi-criteria ranking system. *Archives of Mining Sciences*. 2012. Vol. 57. Issue 3. Pp. 741–768.
9. Badiozamani M. M., Askari-Nasab H. Integrated mine and tailings planning: a mixed integer linear programming model. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2016. Vol. 30. Issue 4. Pp. 319–346.
10. Kawahata K., Dagdelen K. An optimization algorithm for large scale mine production scheduling problems through lagrangian relaxation. *Proceedings of the 36th International Symposium on the Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)*. 2013. Pp. 548–560.
11. Melamud A., Young D. S. Optimizing Interdependence of Operating Cost. *Proc. of the 24-th Internat. Symp. on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries*. 1993. Vol. 2. Pp. 75–82.
12. Ren H., Topal E. Using Clustering Methods for Open Pit Mine Production Planning. *Mining Education Australia*. 2014. Pp. 45–48.
13. Tabakman I. B. Methods of modeling open mine workings and decision making in automated planning and control. *Journal of Mining Science*. 1987. Vol. 23. No. 1. Pp. 41–43.

## FIGURES

Fig. Set of possible states (a) and orgraph of feasible transitions between them (b) in a specific area.

Fig. 2. Interactive display mode for calculation results.

## TABLE

Elements of model data structure in meta-data base.



## III НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ



В кулуарах форума