Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 2. С. 111–115.
Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 111–115.

Научная статья
УДК 004.832, 622.2
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.2.010

ДВА МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Юрий Андреевич Олейник[1]✉, Александр Анатольевич Зуенко[2]
[1, 2] Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия
[1]yoleynik@iimm.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-6817-2496
[2]zuenko@iimm.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-7165-6651

Аннотация

Приведена общая постановка задачи планирования открытых горных работ, описанной в виде трехмерной блочной модели и набора требований к плану, произведен краткий обзор двух основных методов ее решения и описаны основные положительные и отрицательные стороны этих методов.

Ключевые слова:

линейное целочисленное программирование, удовлетворение ограничений, планирование, открытые горные работы, программирование в ограничениях

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Института информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема научно-исследовательской работы «Методология создания информационно-аналитических систем поддержки управления региональным развитием, основанных на формирующем искусственном интеллекте и больших данных» (регистрационный номер 122022800551-0).

Для цитирования:

Олейник Ю. А., Зуенко А. А. Два метода решения задачи планирования открытых горных работ // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 2. С. 111–115. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.2.010

Original article

TWO METHODS FOR SOLVING OPEN PIT MINE SCHEDULING PROBLEM

Yurii A. Oleynik[1]✉, Alexander A. Zuenko[2]
[1, 2]Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia
[1]yoleynik@iimm.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-6817-2496
[2]zuenko@iimm.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-7165-6651

Abstract

The article provides a general formulation of the open pit mining scheduling problem, described in the form of a three-dimensional block model and a set of requirements for the schedule. A brief overview of the two main methods for solving it as well as the main positive and negative aspects of these methods are given.

Keywords:

integer linear programming, constraint satisfaction, scheduling, open-pit mining, constraint programming

Acknowledgments:

the study was carried out within the framework of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic “Methodology for creating information and analytical systems to support the management of regional development based on formative artificial intelligence and big data” (registration number of the research topic 122022800551-0).

For citation:

Oleynik Y. A., Zuenko A. A. Methods for solving open pit mine scheduling problem // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 111–115. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.2.010

Введение

Планирование открытых горных работ является производственной задачей, направленной на оптимизацию затрат и прибыли при добыче полезных ископаемых открытым способом, в рамках которой должны быть учтены такие параметры, как: производительность добывающего и обрабатывающего оборудования, технические требования по конфигурации разрабатываемого карьера (нормативы по углам наклона бортов, размеров площадок и т. д.) и сроки выполнения работ [1–4]. Актуальность задачи обусловлена распространенностью такого вида добычи полезных ископаемых, а также масштабностью таких работ, когда даже незначительная оптимизация процесса планирования может принести существенную выгоду.

В рассматриваемых методах задача представлена в виде трехмерной блочной модели и набора ограничений на порядок добычи блоков. Для каждого блока также рассчитывается выгода от его добычи на основании рудного состава блока, а также временного периода (для определенности будем называть его годом), когда он извлекается.

Общая постановка задачи планирования открытых горных работ

Основой постановки задачи планирования открытых горных работ является блочная модель разрабатываемого карьера. Блочная модель (B) описывает горные породы, планируемые к извлечению за заданное количество лет (T), разбитые на одинаковые блоки ($b_i \in B$). Каждый блок обладает набором свойств, таких как координаты, вес, процент содержания полезного ископаемого, а также выгода (C_i) от его добычи. Параметр выгоды добычи рассчитывается из веса блока, доли полезного ископаемого в нем и зависит от года добычи. Блоки условно делятся на рудные, где доля полезного ископаемого достаточна для получения выгоды от добычи блока с учетом затрат на работы по его извлечению ($C_i > 0$), и вскрышные, где доля полезного ископаемого низка. Выгода от добычи таких блоков является неположительным ($C_i \leq 0$) значением, однако необходимость извлечения таких блоков обусловлена ограничениями задачи.

Помимо блочной модели для решения задачи необходимо учитывать ряд ограничений, описывающих особенности работ по разработке карьера. К таким ограничениям относятся ограничения на порядок извлечения блоков: для извлечения какого-то определенного блока необходимо, чтобы некоторые другие блоки были извлечены в тот же год или ранее. В эти ограничения закладываются технологические требования по проведению горных работ, такие как допустимые по технике безопасности углы уклона карьера, размеры технологических площадок и т. д.

Также в задаче учитываются производственные мощности задействованного оборудования. Поскольку в разработке карьера участвует определенное количество техники с известной производительностью, то в каждый год из блочной модели не может быть извлечено блоков больше, чем позволяют возможности добывающей техники ($A\max_t$, $t \in \{1 \ldots T\}$), но и должна быть обеспечена какая-то минимальная производительность ($A\min_t$, $t \in \{1 \ldots T\}$), то есть $A\min_t \leq |B_t| \leq A\max_t$, где $|B_t|$ — общее количество блоков, извлеченных за год t. Кроме того, добытые полезные ископаемые в дальнейшем отправляются на обработку (обогащение) на соответствующие предприятия, которые тоже обладают своей мощностью ($O\max_t$, $O\min_t$, $t \in \{1 \ldots T\}$), что также отражается в ограничениях на количество добываемых рудных блоков в год ($O\min_t \leq |B_{ct}| \leq O\max_t$, где $|B_{ct}|$ — общее количество рудных блоков, извлеченных за год t).

Решением задачи служит назначение каждому блоку модели номера года ($t \in \{1 \ldots T\}$), в который данный блок планируется изъять из карьера. Стоимостью решения (целевой функцией) является сумма значений выгоды для каждого блока, рассчитанных с учетом назначенного номера года ($\sum C_i$).

Так выглядит общая упрощенная постановка задачи планирования открытых горных работ. Существуют различные ее модификации: с возможностью складирования добытых излишков, планирование работ на нескольких карьерах одновременно либо разработка карьера с несколькими видами полезных ископаемых, однако в рамках данной статьи такие постановки не рассматриваются.

Далее описываются две группы методов, применяемые при решении данной задачи: методы целочисленного линейного программирования и методы удовлетворения ограничений.

Методы целочисленного линейного программирования

Приведем один из вариантов формализации задачи для ее решения методами целочисленного линейного программирования, как это предложено в [5].

Для каждого блока i создается набор переменных $X_{ij} \in \{0,1\}$, где $j \in \{1\ldots T\}$. $X_{ij} = 1$ обозначает, что блок i добыт в год j.

Для гарантии добычи блока только в один год вводится дополнительное ограничение $\sum_{j=1}^{T} X_{ij} = 1$.

Выгода от добычи каждого блока i в определенный год задается явно, образуя множество конкретных значений C_{ij}, где $j \in \{1\ldots T\}$.

Целевая функция с учетом вышенаписанного представляется теперь как $\sum\sum(X_{ij} \times C_{ij})$.

Ограничения на объемы добычи принимают вид:

$$A\min_t \le \sum X_{ij} \le A\max_t,\ \text{где } j = t,\ t \in \{1\ldots T\}$$
$$(O\min_t \le \sum X_{ij} \le O\max_t,\ \text{где } j = t,\ C_{ij} > 0,\ t \in \{1\ldots T\}).$$

Ограничения же на порядок добычи в таком представлении разворачиваются во множество линейных уравнений вида: $0 \le (\sum_{k=1}^{t} X_{pk} - X_{it}) \le 1$, для $t \in \{1\ldots T\}$, где p — индекс блока, который нужно извлечь перед блоком i.

В таком представлении задачи эффективно решаются линейными решателями, но для достаточно малых размерностей. Проблема такого представления заключается в том, что для кодирования ограничений на последовательность извлечения для каждой пары блоков строится T линейных уравнений. Однако для корректного описания технологических ограничений добычи каждому блоку нужно задать множество блоков, расположенных относительно рассматриваемого в определенной конфигурации (шаблон добычи). Так, например, для простейшего шаблона из 5 блоков на 5 лет планирования ограничение на порядок добычи породит в среднем 20 линейных уравнений на каждый блок, что при размерности задачи в 5000 блоков, даст уже 100000 уравнений только для описания одной части задачи. С увеличением размерности задачи, количества лет планирования и сложности шаблона добычи только хранение порожденных линейных уравнений в памяти уже представляет некоторую трудность, не говоря уже об их расчете.

Авторами проводились расчеты задачи в таком представлении на тестовой машине с объемом оперативной памяти 32 ГБ с помощью свободно распространяемого программного обеспечения (MiniZinc, Google OR tools). Машинных ресурсов не хватало уже для расчета задачи размерностью 2000 блоков. С примером решения схожей задачи методами целочисленного линейного программирования в усовершенствованном представлении и с помощью коммерческого решателя (IBM-Cplex) можно ознакомиться в [1], где на схожей по параметрам тестовой машине для размерности уже порядка 20000 блоков не было получено ни одного решения за 48 часов расчетов.

Методы удовлетворения ограничений

Общая постановка задачи достаточно легко преобразуется в задачу удовлетворения ограничений. Напомним, что для постановки задачи удовлетворения ограничений необходимо определить три множества [6]: множество переменных — это в нашем случае множество блоков B; множество доменов переменных — доменами каждой переменной из B являются множества $\{1\ldots T\}$ и множество ограничений, которое также достаточно подробно описано в общей постановке задачи, но требует формализации средствами программирования в ограничениях.

В отличие от предыдущего метода, где процесс решения задачи заключается в решении множества линейных уравнений, в методе удовлетворения ограничений поиск решения представляет собой сокращение пространства поиска специализированными алгоритмами-распространителями. Данные алгоритмы жестко привязаны к конкретным ограничениям и на основе анализа доменов участвующих в соответствующих ограничениях переменных удаляют из этих доменов значения, которые точно не могут быть частью решения. Разные ограничения имеют разные по эффективности распространители. Кроме того, одни и те же зависимости часто можно описать разным набором ограничений. Таким образом, от выбора конкретных ограничений для описания задачи существенным образом зависит эффективность ее решения.

В общем случае процесс решения задачи методом удовлетворения ограничений можно представить в виде попеременной работы алгоритмов двух типов: распространителей и ветвителей. Распространители, как было описано ранее, жестко привязаны к ограничениям и сокращают домены участвующих в них переменных. При этом, если домен какой-либо переменной сократился в результате работы одного из распространителей, то будут повторно вызваны распространители всех других ограничений, где участвует данная переменная. Так будет продолжаться, пока не случится одна из следующих ситуаций: 1) домены всех переменных сокращены до единственного значения — найдено решение задачи; 2) домены всех переменных перестали меняться — достигнута неподвижная точка, для продолжения решения требуется ветвление, то есть разбиение пространства поиска на части и исследование каждой из частей отдельно; 3) домен какой-либо переменной оказался пуст (из него удалены все значения) — найдено противоречие, то есть решения в данной части пространства поиска нет, нужно перейти к другой его части, то есть откатиться к последней точке ветвления.

Ветвление осуществляется специализированным алгоритмом и предназначено для продвижения процесса решения путем разбиения пространства поиска на части. Простейший пример ветвления — принудительное присвоение переменной значения из ее домена. Если это в итоге приводит к противоречию, после возврата к этой точке ветвления выбранное значение удаляется из домена переменной для продолжения поиска решения.

Ограничения можно условно разделить на два класса: простые и глобальные. В простых ограничениях заранее известно количество ограничиваемых переменных, например, ограничение $a < b$ ограничивает домены двух переменных. Глобальные же ограничения описывают зависимости на множестве переменных: например, ограничение $alldiff(B)$ на множестве переменных B обязывает все переменные этого множества принимать отличные друг от друга значения, причем количество переменных в B может быть любым. Чаще всего глобальные ограничения можно заменить множеством простых, но на этапе распространения это приведет к постоянному опросу и запуску множества распространителей при самых незначительных изменениях доменов переменных, что занимает дополнительное машинное время. Кроме того, распространители глобальных ограничений намного эффективнее сокращают домены своих переменных, поскольку им доступно больше информации для анализа. Таким образом, от того, каким именно способом будут представлены ограничения, во многом зависит эффективность процесса решения задачи удовлетворения ограничений.

Как и в методах линейного программирования, ограничения на объемы добычи кодируются достаточно просто: например, их достаточно легко привести к типовому глобальному ограничению *bin-packing*. Основную же трудность представляют ограничения на порядок извлечения блоков. Авторами был проведен ряд исследований на эту тему [7, 8], результатом которых оказалась разработка собственного глобального ограничения для описания всех зависимостей карьера этого типа в одном ограничении. На тестовой машине с 32 ГБ оперативной памяти удалось провести расчет решения для задачи размерностью 82000 блоков, что заняло около получаса, а за 5 часов было построено решение для задачи в 525000 блоков.

Заключение

Проведен краткий аналитический обзор методов решения задачи планирования открытых горных работ. Сделан вывод о преимуществах методов программирования в ограничениях по сравнению с методами линейного программирования при решении задач, имеющих практический интерес. В методах Mixed Integer Linear Programming используется явное представление зависимостей в форме линейных уравнений и неравенств, что предъявляет повышенные требования к объемам оперативной памяти компьютера и не позволяет решать практически значимые задачи планирования открытых горных работ с требуемым уровнем дискретизации модели, то есть с количеством блоков в несколько сотен тысяч. Кроме того, не все ограничения, возникающие в практических задачах, могут быть тривиальным образом преобразованы в линейные уравнения и неравенства. Методы удовлетворения ограничений подразумевают имплицитное представление зависимостей с помощью механизма глобальных ограничений, что позволяет существенно сократить расход оперативной памяти, необходимой для представления рассматриваемой задачи планирования.

Список источников

1. Fathollahzadeh K. et al. A mathematical model for open pit mine production scheduling with Grade Engineering and stockpiling // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31 (4). P. 717–728.
2. Alipour A. et al. An integrated approach to open-pit mines production scheduling // Resources Policy. 2022. Vol. 75. 102459.
3. Tolouei K. et al. An optimisation approach for uncertainty-based long-term production scheduling in open-pit mines using meta-heuristic algorithms // International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2021. Vol. 35. P. 1–26.
4. Alipour A. et al. Production scheduling of open-pit mines using genetic algorithm: a case study // International Journal of Management Science and Engineering Management. 2019. Vol. 15. P. 1–8.
5. Espinoza D. et al. Minelib 2011: A library of open pit production scheduling problems // Annals of Operations Research. 2013. Vol. 206 (1). P. 91–114.
6. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd edition. Prentice Hall, 2010. 1132 p.
7. Zuenko A. et al. A method for solving the open-pit mine production scheduling problem using the constraint programming paradigm // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2060. P. 12–21.
8. Зуенко А. А., Олейник Ю. А., Македонов Р. А. Интеллектуальный поиск точных решений задачи планирования открытых горных работ // Системы анализа и обработки данных. 2021. Вып. 3 (83). С. 99–114.

References

1. Fathollahzadeh K., Mardaneh E., Cigla M., Asad M. A mathematical model for open pit mine production scheduling with Grade Engineering and stockpiling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 717–728.
2. Alipour A., Khodaiari A., Jafari A., Tavakkoli-Moghaddam R. An integrated approach to open-pit mines production scheduling. *Resources Policy*, 2022, vol. 75, 102459.
3. Tolouei K., Moosavi E., Tabrizi A., Afzal P., Bazzazi A. An optimisation approach for uncertainty-based long-term production scheduling in open-pit mines using meta-heuristic algorithms. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 2021, vol. 35, pp. 1–26.
4. Alipour A., Khodaiari A., Jafari A., Tavakkoli-Moghaddam R. Production scheduling of open-pit mines using genetic algorithm: a case study. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2019, vol. 15, pp. 1–8.
5. Espinoza D., Goycoolea M., Moreno E., Newman A. Minelib 2011: A library of open pit production scheduling problems. *Annals of Operations Research*, 2013, vol. 206, no. 1, pp. 91–114.
6. Russel S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3rd edition. Prentice Hall, 2010, 1132 p.
7. Zuenko A., Oleynik Y., Makedonov R. A method for solving the open-pit mine production scheduling problem using the constraint programming paradigm. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2060, pp. 12–21.
8. Zuenko A. A., Oleynik Y. A., Makedonov R. A. Intellektual'nyj poisk tochnyh reshenij zadachi planirovaniya otkrytyh gornyh rabot [AI search of the exact solutions of open-pit mine scheduling problem]. *Sistemy analiza i obrabotki dannyh* [Analysis and data processing systems], 2021, vol. 3, no. 83, pp. 99–114.

Информация об авторах

Ю. А. Олейник — младший научный сотрудник;
А. А. Зуенко — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

Y. A. Oleynik —Junior Researcher;
A. A. Zuenko — Candidate of Science (Tech.), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 19.10.2022; одобрена после рецензирования 07.11.2022; принята к публикации 16.11.2022.
The article was submitted 19.10.2022; approved after reviewing 07.11.2022; acceptedfor publication 16.11.2022.