Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVIII, вып. 3, 1968 г.

УДК 681.142.2 : 622.271

ПЛАНИРОВАНИЕ ДОБЫЧИ РУДЫ ЗАДАННОГО СОСТАВА ПРИ УСЛОВИИ МИНИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА ПЕРЕВОЗОК

Б. З. Безмозгин, В. А. Ермоленко

Рассмотрим вопрос планирования добычи руды заданного состава на примере Кингисеппского фосфоритового рудника. Весь комплекс открытых горных разработок Кингисеппского фосфоритового месторождения отличается сложностью взаимосвязей между техническими, горно-геологическими и экономическими факторами.

Месторождение представлено горизонтальной пластообразной залежью. Фосфоритоносный слой (оболовые пески и песчаники) характеризуется фациальной изменчивостью как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Мощность фосфоритного пласта колеблется от 0,5 до 5,5 *м*, содержание P_2O_5 в пределах 2,0—12,0%. Изменчивость литологического состава и мощности продуктивного слоя объясняется неравномерным размывом, а отчасти первичными условиями седиментации и рассматривается как фактор, осложняющий изучение указанного месторождения.

Проблема усреднения качества фосфоритовой руды, поступающей на обогатительную фабрику, является весьма важной, так как даже незначительные колебания в содержании P_2O_5 существенно отражаются на показателях обогащения: при его снижении значительно возрастает расход реагентов, удельный вес которых в себестоимости конечного продукта составляет 20%, а при увеличении — повышается содержание полезного компонента в хвостах. В этих условиях достижение максимального экономического эффекта возможно лишь на базе оптимальных технических решений [Ржевский, Школьников, 1965].

В настоящее время при открытых разработках стали применяться экономико-математические методы и в первую очередь методы математического программирования, теоретические основы которых рассмотрены в работе Ф. И. Карпелевича и Л. Е. Садовского [1963].

На Кингисеппском месторождении такими методами могут успешно решаться следующие задачи: а) выбор оптимального календарного плана развития горных работ; б) определение оптимального плана перевозок (полезного ископаемого и пород вскрыши); в) размещение внутренних отвалов породы.

Для реального отражения горно-геологических и технологических условий в основе технико-экономических расчетов должно быть достоверное решение горногеометрических задач. Исходным материалом служат структурные и качественные планы залежи. Ввиду сложности элементов залегания необходим предварительный геометрический анализ отрабатываемых участков месторождения. Рациональная методика геометризации месторождения и детальная его изученность позволяют составить комплект горногеометрических графиков, используемых при планировании горных работ и добычи фосфоритовой руды заданного состава.

В настоящее время на Кингисеппском руднике добыча руды заданного состава планируется следующим образом. Для выявления пропорций поступающей руды решается уравнение

$$\sum_{i=1}^{n} p_i x_i = PA, \qquad (1)$$

где x_i — вес руды, планируемой к добыче с соответствующего блока; p_i — содержание P_2O_5 с соответствующего блока; A — планируемый объем добычи; P — плановое содержание P_2O_5 по руднику; n — число блоков (обычно $n \leqslant 4$).

Для простоты решения задаются добычей руды по блокам с суммарным весом $\sum_{i=1}^{n-1} x_i$, а добычей с последнего блока весом x_n доводят состав руды до требуемого при условии обеспечения планового содержания P и планируемого объема добычи A. Тогда

$$x_n = \frac{PA - \sum_{i=1}^{n-1} p_i x_i}{p_n}. \qquad (2)$$

Пример планирования добычи руды заданного состава на май 1966 г. приведен в табл. 1.

Таблица 1

Показатели	Блоки рудника				По руднику
	1	2	3	4	
План добычи, тыс. *т*	102,4	186,6	181,6	75,1	545,7
Содержание P_2O_5, %	7,35	5,70	6,79	4,50	6,20
Расстояние транспортирования, *км*	1,7	2,4	1,7	2,4	2,0
Объем перевозок, тыс. *т · км*	174,1	447,8	308,7	180,2	1110,8

Далее планирование рассматривается при условии минимума тонно-километража. При этом были использованы фактические данные работы Кингисеппского фосфоритового рудника по месяцам 1966 г.

Рассмотрим задачу составления месячного плана эксплуатации рудника, если известно, что его месячная производительность должна составить A *т* руды с p-процентным содержанием P_2O_5 при условии минимума объема перевозок. При этом данные о руднике представим в табл. 2.

Таблица 2

Показатели	1	2	3	4
Содержание P_2O_5, %	p_1	p_2	p_3	p_4
Расстояние транспортирования, *км*	L_1	L_2	L_3	L_4
Предельная величина плана (по производительности экскаваторов), *т*	a_1	a_2	a_3	a_4

В общем случае количество блоков обозначим n. Тогда задача легко решается методами линейного программирования. Пусть x_i ($i = 1, 2, \ldots, n$) — месячная производительность i-го блока, $т$. Тогда нужно будет найти минимум функции

$$u = L_1x_1 + L_2x_2 + \ldots + L_nx_n = \sum_{i=1}^{n} L_ix_i, \tag{3}$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = A, \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} p_ix_i = p \sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{5}$$

$$x_i \leqslant a_i \quad (i = 1, 2, 3, \ldots, n), \tag{6}$$

где (4) учитывает месячную производительность рудника; (5) — процентное содержание P_2O_5; неравенства (6) отражают возможности блоков (берется месячная производительность экскаватора типа ЭКГ-4,6 в условиях Кингисеппского рудника).

Для решения задачи симплекс-методом неравенства заменяются равенствами. При этом вводятся дополнительные неизвестные $x_{n+1}, x_{n+2}, \ldots, x_{2n}$. Тогда неравенства (6) примут вид

$$x_i + x_{i+n} = a_i \quad (i = 1, 2, 3, \ldots, n). \tag{7}$$

Ограничения (4), (5) и (6) не являются системой правильного вида. Поэтому задачу решаем методом искусственного базиса: в уравнения (4) и (5) вводим искусственные неизвестные x_{2n+1} и x_{2n+2}:

$$x_{2n+1} + \sum_{i=1}^{n} x_i = A, \tag{8}$$

$$x_{2n+2} + \sum_{i=1}^{n} (p_i - P)\, x_i = 0. \tag{9}$$

При этом минимизируемая функция берется в виде

$$u = \sum_{i=1}^{n} L_ix_i + wx_{2n+1} + wx_{2n+1}, \tag{10}$$

где w — достаточно большое положительное число. Искусственные (базисные) неизвестные из линейной формы (10) исключаем с помощью ограничений (8) и (9)

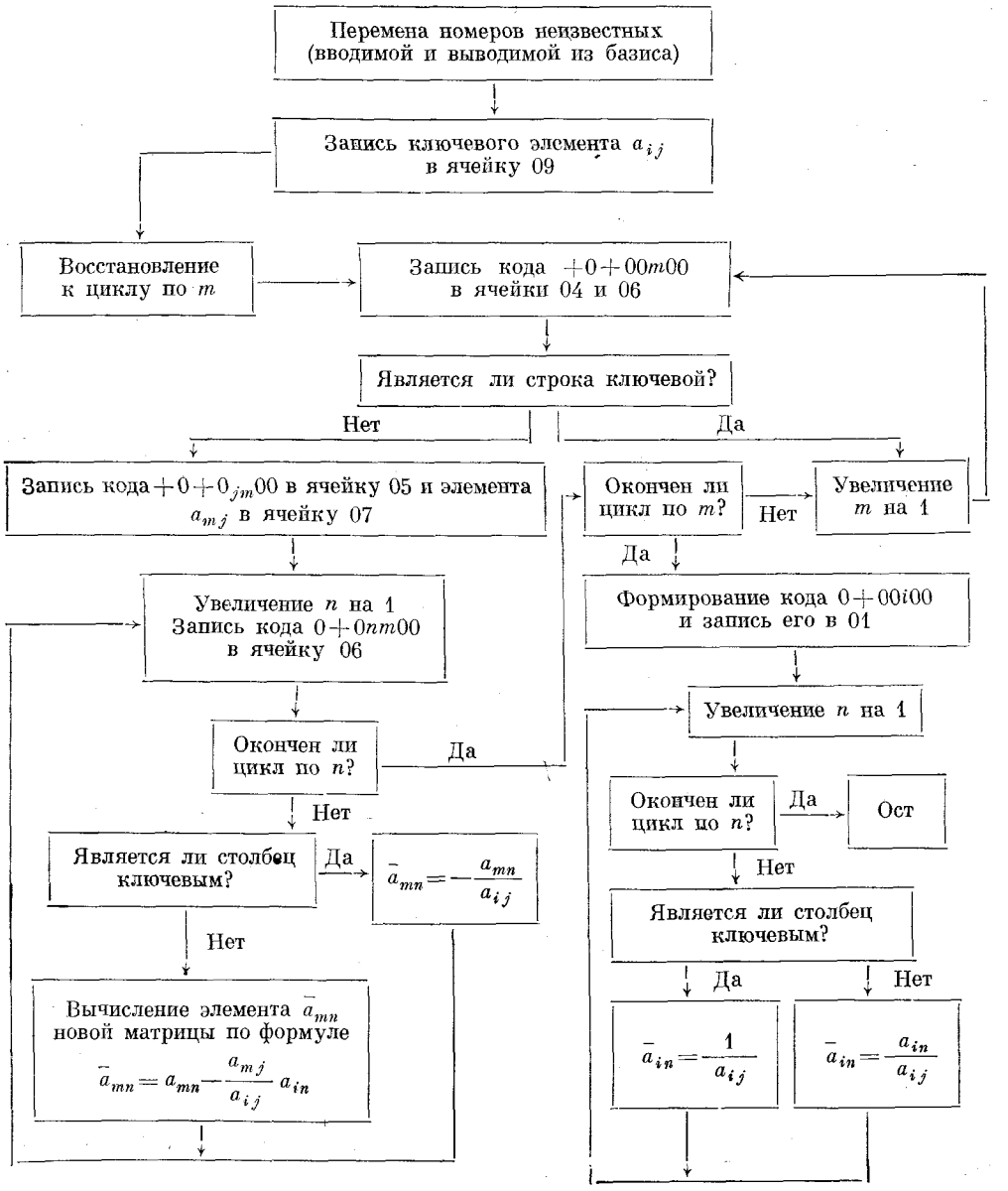
$$u = \sum_{i=1}^{n} [L_i - w(p_i - P + 1)]\, x_i + wA. \tag{11}$$

Ограничения (7), (8) и (9) правильного вида и линейная форма (11) выражена через небазисные неизвестные.

В таком виде задача решалась симплекс-методом с помощью ЭВМ «Проминь». Были запрограммированы расчет новой матрицы по выбранному ключевому элементу и выбор ключевой строки.

Ключевой столбец выбирался оператором, причем последний проверял также наличие положительных элементов в ключевом столбце. Неполная автоматизация вычислений связана с ограниченными возможностями ЭВМ «Проминь» (100 команд и 79 оперативных ячеек). Приведем блок-схему программы расчета новой матрицы.

Описание программы расчета новой матрицы. Номера неизвестных записываются в виде $+0+0k000$. Номер базисной неизвестной x_k записывается в ячейку $7P$, где P — номер уравнения (строки), в которое входит x_k. Номер небазисной неизвестной записывается в ячейку $q0$, где q — номер столбца, занимаемого этой неизвестной.



Везде в дальнейшем N — число базисных неизвестных ($N \leqslant 7$); L — число небазисных неизвестных ($L \leqslant 5$); (i — номер ключевой строки; j — номер ключевого столбца; m — текущий номер строки; n — текущий номер столбца.

Элемент матрицы a_{mn} записывается в ячейку nm.

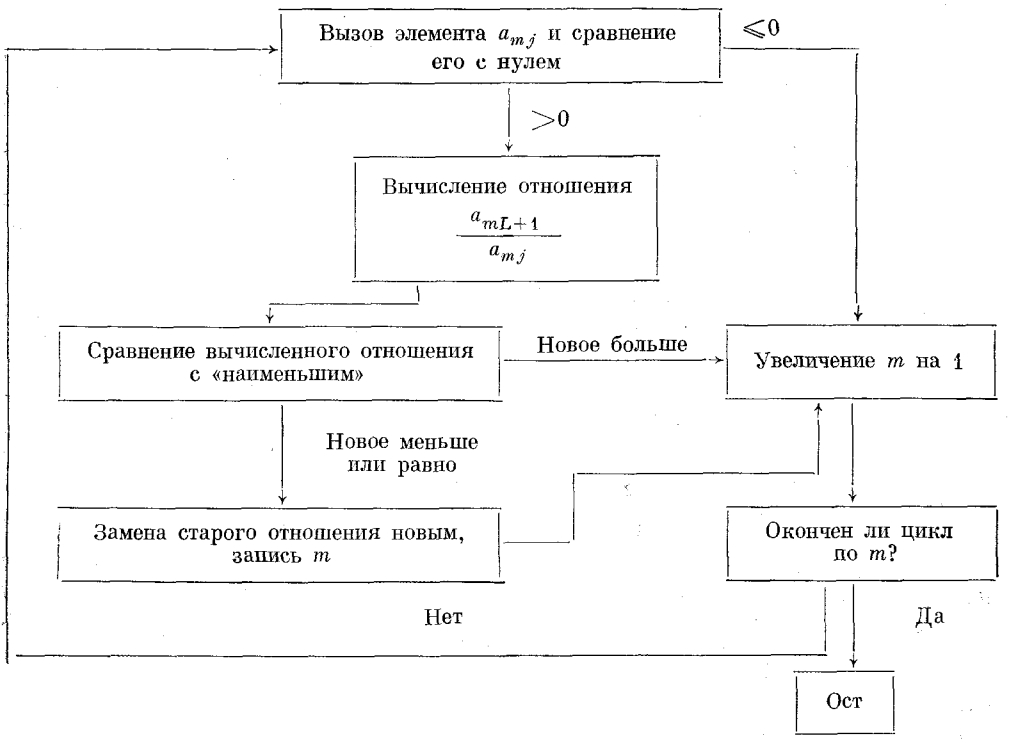
Константы, необходимые для работы программы:

60) +0+01 000
70) +0+0L+1 N+2 50
78) +0+07 000
79) +0+00 940

01) +0+00i00
02) +0+0j000
03) +0+0ji00

04, 05, 06, 07, 08, 09 — рабочие ячейки.

Блок-схема программы выбора ключевой строки



Программа (номер начальной команды, a):

a+0) чт 78
1) Сл Ф 01
2) Зп 09
3) чтI I 02
4) Зп 04
5) чтI I 09
6) ЗпI I 02
7) чт 04
8) ЗпI I 09
9) чтI I 03
10) Зп 09
11) чт 90
12) Зп 06
13) Зп 04
14) Выч Ф 01
15) УП2 a+58
16) чт 02

a+17) Сл Ф 04
18) Зп 05
19) чтI I 05
20) Зп 07
21) чт 06
22) Сл Ф 60
23) Зп 06
24) Выч Ф 70
25) УП1 a+43
26) Выч Ф 79
27) УП1 a+58
28) чт 01
29) Сл Ф 60
30) Зп 01
31) Выч Ф 70
32) УП1 a+34

a+33) Ост
34) чт 01
35) Выч Ф 03
36) УП2 a+41
37) чтI I 01
38) Дел 09
39) ЗпI I 01
40) БП a+28
41) чт 86
42) БП a+38
43) чт 06
44) Выч Ф 05
45) УП2 a+61
46) Сл Ф 03
47) Зп 08
48) чтI I 08

49) Зп 08
50) чт 07
51) Дел 09
52) Умн 08
53) Зп 08
54) чтI I 06
55) ВычI 08
56) ЗпI I 06
57) БП a+21
58) чт 04
59) Сл Ф 90
60) БП a+12
61) чтI I 06
62) Дел 09
63) Выч 2 00
64) БП a+56

Описание программы выбора ключевой строки. В память машины должны быть введены константы в дополнение к тем, которые уже есть, если работала программа расчета новой матрицы (определяется самим оператором)

02) $+0+0j000$ 07) $+0+0jN50$
05) $+0+0j100$ 09) $+9+99\,999$
06) $+0+0L+1\,100$

Программа начинается с команды $C+1$

$C+1$)	чтII 05	$C+8$)	Выч I 09	$C+15$)	СлФ 90	$C+22$)	чт 05
2)	УП2 $C+11$	9)	УП2 $C+20$	16)	Зп 05	23)	Зп 03
3)	УП1 $C+11$	10)	УП1 $C+20$	17)	Выч Ф 07	24)	Выч Ф 02
4)	Зп 04	11)	чт 06	18)	УП1 $C+1$	25)	Зп 01
5)	чтII 06	12)	СлФ 90	19)	Ост (или БПa)	26)	БП $C+11$
6)	Дел 04	13)	Зп 06	20)	чт 04		
7)	Зп 04	14)	чт 05	21)	Зп 09		

После выполнения команды $C+19$ имеем

01) $+0+00i00$
02) $+0+0j000$
03) $+0+0ji00,$

что необходимо для программы расчета новой матрицы.

Рассмотрим на примере фактических данных за май, как производились расчеты.* Ограничения (7), (8), (9) и линейная форма (11) для рассматриваемого месяца имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_9 = 545{,}7\\
&1{,}15x_1 - 0{,}50x_2 + 0{,}59x_3 - 1{,}70x_4 + x_{10} = 0\\
&x_1 + x_5 = 160{,}0\\
&x_2 + x_6 = 160{,}0\\
&x_3 + x_7 = 160{,}0\\
&x_4 + x_8 = 160{,}0
\end{aligned}$$

$$u = (1{,}7 - 2{,}15w)\,x_1 + (2{,}4 - 0{,}50w)\,x_2 + (1{,}7 - 1{,}59w)\,x_3 + (2{,}4 + 0{,}70w)\,x_4 + 545{,}7\,w\ (\min).$$

Последовательное вычисление шести матриц привело к оптимальному плану, тыс. m: $x_1 = 160{,}0$, $x_2 = 87{,}8$, $x_3 = 160{,}0$, $x_4 = 137{,}9$, которому соответствует минимальный объем перевозок $u_{\min} = 1\,085\,700$ $m \cdot км$, в то время как фактически $u_{факт} = 1\,110\,880$ $m \cdot км$.

Указанным методом произведен пересчет данных рудника по месяцам 1966 г. Разница в объеме перевозок между оптимальным планированием и фактическими данными составила за год 374 070 $m \cdot км$, что при стоимости 11,29 $коп/m \cdot км$ (местные нормы) в денежном выражении равно $374\,070 \times 11{,}29 = 42232{,}5$ руб.

Оптимальные схемы транспортирования на открытых разработках Кингисеппского рудника можно успешно устанавливать на основе теории графов по принципу, освещенному в работе З. М. Лейтеса и В. А. Сысоева [1966].

Применение указанной методики позволяет улучшить режим работы горного предприятия. Экономическая эффективность при этом основана на улучшении использования автотранспорта.

---

* В производственных условиях расчеты при отсутствии ЭЦВМ могут успешно выполняться при помощи простейших вычислительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

Карпелевич Ф. И., Садовский Л. Е. Элементы линейной алгебры и линейного программирования. Физматгиз, 1963.

Лейтес З. М., Сысоева В. А. Методика установления оптимальных технологических схем подземного транспорта с помощью теории графов. ИГН им. А. А. Скочинского, 1966.

Ржевский В. В., Школьников А. Д. Использование электронных вычислительных машин для планирования и управления технологическими процессами на карьерах. Изд. Гос. ком-та по топл. пром., 1965.