

УДК 33

Энхтүвшин Л., Ганчимэг Ж. Некоторые вопросы по планированию, контролю и анализу данных открытых рудников

Some questions on planning, control and data analysis of open-pit mines

Энхтүвшин Л.

Цех связи, информации и технологической автоматизации, Предприятие Эрдэнэт
Орхон аймаг, Монголия
Доктор, доцент

Ганчимэг Ж.

Институт бизнеса,
Университет науки и технологий
город Улаанбаатар, Монголия

Enkhtyvshin L.

Communication, Information and Technological Automation Workshop, Erdenet Enterprise
Orkhon aimag, Mongolia

Doctor, Associate Professor

Ganchimeg J.

Institute of Business,

University of Science and Technology

Ulaanbaatar city, Mongolia

Аннотация. Для обеспечения равномерного технологического процесса обогащения руды обогатительной фабрики нужна подача руды с устойчивыми показателями без резких колебаний. Для этого необходимо начать с планирования добычи руды и постоянно отслеживать и анализировать качество подаваемой руды. Также необходимо управлять технологическим процессом обогащения руды в соответствии с физико-механическими свойствами, минеральным составом и минералогической структурой руды. Поэтому важна своевременная, оперативная обработка данных и генерирование отчетов для мониторинга и управления добычей руды, что в свою очередь оказывает прямое влияние на качество процесса извлечения и производства концентрата. Также существует потребность в прогнозе и расчёте оптимальных режимов технологических процессов на основе результатов анализа руды. Для решения этих проблем важно использовать программное обеспечение по сбору и обработке данных параметров руды и технологических процессов флотации, а также для оперативной подготовки расчётных данных и отчетов.

Ключевые слова: программное обеспечение, математическая модель, линейное программирование, оптимизация.

Abstract. To ensure a uniform technological process of ore beneficiation of a concentration plant, a supply of ore with stable indicators without sharp fluctuations is required. To do this, it is necessary to start with planning the ore extraction and constantly monitor and analyze the quality of the ore being supplied. It is also necessary to control the technological process of ore beneficiation in accordance with the physical and mechanical properties, mineral composition and mineralogical structure of the ore. Therefore, timely, prompt data processing and reporting is important for monitoring and managing ore mining, which in turn has a direct impact on the quality of the concentrate extraction and production process. There is also a need for forecasting and calculating the optimal modes of technological processes based on the results of ore analysis. To solve these problems, it is important to use software for the collection and processing of data on ore parameters and flotation technological processes, as well as for the prompt preparation of calculated data and reports.

Keywords: software, mathematical model, linear programming, optimization.

Рецензент: Тлехурай-Берзегова Лариса Талибовна - Доктор экономических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Адыгейский государственный университет»

I. ВВЕДЕНИЕ

Один из способов достижения выше поставленных целей – использование специализированных программных обеспечений. На мировом рынке существуют различные программные обеспечения для планирования и управления горными работами, но стоимость и эксплуатационные расходы таких программ высоки.

“Предприятие Эрдэнэт” – горно-обогатительный комбинат в городе Эрдэнэт в Монголии, является одним из крупнейших горнорудных предприятий в Азии. “Предприятие Эрдэнэт” использует ряд программных обеспечений по планированию и управлению горных работ, автоматизированные системы по сбору данных различных технических и технологических процессов.

Целью данного исследования было изучение возможности создания и применения единого программного обеспечения по планированию, контролю и анализу данных рудника открытых работ, сбору исходных данных параметров руды и технологических процессов флотации, обработке и анализе результатов в условиях “Предприятия Эрдэнэт”.

Для достижения поставленной цели возникла необходимость оптимизировать некоторые процессы расчётов. Например, оптимизация расчёта шихты в соответствии с планом приёма и обработки руды, транспортировки и добычи руды. Для этого были проведены различные исследования по определению методологии, разработаны математические модели и написаны программные коды для нахождения оптимального решения.

II. ОПИСАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ

Для решения поставленных задач возникла необходимость построения математической модели, определения оптимального режима, нахождения решения.

Линейное программирование — математическая дисциплина, посвящённая теории и методам решения экстремальных задач на множествах n -мерного векторного пространства, задаваемых системами линейных уравнений и неравенств. [1]

$$f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max(\min) \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, \quad i = \overline{1, m_1}; \quad m_1 < n$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = \overline{m_1 + 1, m_2} \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i, \quad i = \overline{m_2 + 1, m}$$

$$x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n_1}; \quad n_1 \leq n \quad (2.3)$$

Здесь $0 \leq m_1 \leq m_2 \leq m$, a_{ij} , c_j , b_i - заданные действительные числа, (2.1) - целевая функция, (2.2) - ограничения, (2.3) – условие, при которых переменные не отрицательны.

Существуют различные способы нахождения решений задач линейного программирования. В настоящее время исследователи широко используют

программное обеспечение Matlab для нахождения решений задач линейного программирования.

Matlab - это высокопроизводительный программный пакет для математических расчетов и моделирования. Программа имеет сотни стандартных функций или команд для использования в различных технических расчетах, графике и анимаций. В большинстве этих команд используются новейшие методы и алгоритмы. [2]

В Matlab задачи линейного программирования могут быть решены с помощью таких команд, как `linprog`, `simple` и `bintprog`. Команда `linprog` имеет большое преимущество в том, что касается общих задач линейного программирования, поэтому ее часто используют на практике. [2]

III. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

а) Количество и качество подаваемой руды на ОФ¹ должна соответствовать заданному плану. Если считать, что за одну смену ОФ сможет принять руду в количестве Q , с содержанием меди a , то общее количество меди в руде будет

$$b = Q \cdot a \quad (3.1).$$

Для добычи Q руды требуется n экскаваторов. Тогда

$$b = \sum_{j=0}^n q_j \cdot a_j \quad (3.2).$$

Здесь:

q_j ($j = 1 \div n$) – количество добываемой руды j -ого экскаватора,

a_j ($j = 1 \div n$) – содержание меди в добываемой руде j -ого экскаватора.

С другой стороны затраты добываемой руды j -ого экскаватора будут c_j ($j = 1 \div n$). В зависимости от технических характеристик экскаватора за смену минимальное количество добытой руды будет p_1 , а максимальное p_2 . Тогда требуется составить такой план, при котором будут удовлетворены план приёма ОФ и суммарные затраты на перевозку руды будут минимальны.

Учитывая условие неотрицательности объёмов перевозок, математическую модель задачи можно записать так:

$$f(x) = \sum_{j=0}^n c_j \cdot q_j \rightarrow \min \quad (3.3)$$

$$Q \cdot a = \sum_{j=0}^n q_j \cdot a_j \quad (3.4)$$

$$p_1 \leq q_j \leq p_2 \quad (3.5).$$

¹ ОФ – Обогажительная фабрика

Считаем, что переменные Q, a, n, p_1, p_2, c_j ($j = 1 \div n$), a_j ($j = 1 \div n$) математической модели известны. Здесь: Q – приём руды ОФ за смену, a – планируемое содержание меди в руде, подаваемой ОФ, n, p_1, p_2 зависят от технических характеристик используемой техники.

Из описанной математической модели видно, как много зависит от того, как определена a_j .

б) Рассмотрим следующий пример определения a_j ($j = 1 \div n$). Предположим, что на поверхности рудного карьера сформирована прямоугольная сетка размером $m \times m$. Тогда в центре каждой прямоугольной сетки пробуем скважину, откуда на глубине h возьмём пробу руды и определим содержание меди в пробе. Таким образом определим содержание меди в трехмерном $m \times m \times h$ блоке-параллелепипеде. По мере увеличения размера этих трехмерных блоков способность одной пробы представлять весь блок ухудшается. Исходя из технических и экономических ресурсов на практике возможность изготовления большого количества опытных проб ограничено. В зависимости от имеющихся ресурсов, желательно использовать аналитические методы для более точного определения содержания меди в каждом блоке руды.

Если предположить, что распределение содержания меди между центральными точками трехмерных $m \times m \times h$ блоков линейное, то можно определить любое значение содержания меди в блоке в точке k .

Для этого воспользуемся методом нахождения уравнения прямой, проходящей через две точки на плоскости. Уравнение прямой, проходящей через точки (x_1, y_1) , (x_2, y_2) будет

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad (3.6)$$

или

$$y = \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1)}{x_2 - x_1} + y_1 \quad (3.7).$$

Это интерполяция многочлена Лагранжа при $n = 1$. Тогда содержание меди в точках параллелепипеда можно найти в зависимости содержания меди в соседних блоках.

Предположим, что вокруг блока №0 расположены 8 блоков с номерами №1, №2, №3, №4, №5, №6, №7, №8, где расстояние между центральными точками соседних блоков $m = 8$ метров, и известны содержание меди в центральных точках (Таблица 1).

Таблица 1

Анализы проб в центральных точках блоков.

Номер блока	№0	№1	№2	№3	№4
Содержание меди Cu, %	0.350	0.500	0.300	0.455	0.578
Номер блока	№5	№6	№7	№8	-

Содержание меди Cu, %	0.645	0.596	0.560	0.370	-
-----------------------	-------	-------	-------	-------	---

Также предположим, что каждую линию в блоке №0, проведенных от центра блока №0 до центра соседних блоков, разделили на 8 равных частей. Тогда в таблицах 2.1 и 2.2 показаны расчётные данные содержания меди в точках деления блока №0.

Таблица 2.1

Расчётные данные содержания меди в точках деления блока №0.

Номер блока	Содержание меди Cu в центральных точках блоков, %	Расстояние от центральной точки блока №0 до центральной точки соседнего блока, метр				
		0.8	1.6	2.4	3.2	4.0
1	0.500	0.350	0.367	0.383	0.400	0.417
2	0.300	0.350	0.344	0.339	0.333	0.328
3	0.455	0.350	0.362	0.373	0.385	0.397
4	0.578	0.350	0.375	0.401	0.426	0.451
5	0.645	0.350	0.383	0.416	0.448	0.481
6	0.596	0.350	0.377	0.405	0.432	0.459
7	0.560	0.350	0.373	0.397	0.420	0.443
8	0.370	0.350	0.352	0.354	0.357	0.359
Среднее содержание меди, %		0.400	0.504	0.608	0.711	0.815
Среднее содержание меди Cu блока №0, %		0.608				

Таблица 2.2

Расчётные данные содержания меди в точках деления блока №0.

Номер блока	Содержание меди Cu в центральных точках блоков, %	Расстояние от центральной точки блока №0 до центральной точки соседнего блока, метр				
		4.8	5.6	6.4	7.2	8.0
1	0.500	0.433	0.450	0.467	0.483	0.500
2	0.300	0.322	0.317	0.311	0.306	0.300
3	0.455	0.408	0.420	0.432	0.443	0.455
4	0.578	0.477	0.502	0.527	0.553	0.578
5	0.645	0.514	0.547	0.579	0.612	0.645
6	0.596	0.487	0.514	0.541	0.569	0.596
7	0.560	0.467	0.490	0.513	0.537	0.560
8	0.370	0.361	0.363	0.366	0.368	0.370
Среднее содержание меди, %		0.919	1.023	1.126	1.230	1.334

Тогда расчётное среднее содержание меди в блоке №0 будет равно 0.608%. В данном примере количество соседних блоков было 8. Максимальное количество соседних блоков может быть 26. Также, в данном примере прямую, соединяющую центральные точки соседних блоков с блоком №0, разделили на 9 равных отрезков. Эту прямую можно разделить на большее количество.

в) Определяем эффективность усреднения руды по формуле В.А.Шевелева [3]:

$$\eta = 1 - \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{y}}} \quad (3.8)$$

здесь σ_H - стандартное отклонение качества неусредненной руды, т.е. расчётное содержание меди в подаваемой руде,

σ_Y - стандартное отклонение качества усредненной руды, т.е. анализ содержания меди в подаваемой руде.

При $\eta = [0,6 - 0,7]$ эффективность усреднения руды считается нормальной.

г) Проанализируем колебание содержания меди в руде:

Таблица 3.1

Данные переработки руды.

Год	Стандартное отклонение содержания меди в руде, σ	Стандартное отклонение извлечения меди в концентрате, σ
	1	2
2013	0.02696	1.51179
2014	0.02687	1.92816
2015	0.02465	1.94642
2016	0.02604	1.08424
2017	0.01919	1.05714
2018	0.01906	0.96731

Таблица 3.2

Данные переработки руды.

Год	Стандартное отклонение качества концентрата, σ	Стандартное отклонение содержания меди в хвостах, σ	Стандартное отклонение выхода концентрата, σ
	3	4	5
2013	0.51549	0.02475	0.11882
2014	0.51892	0.02549	0.13587
2015	0.36015	0.02307	0.11558
2016	0.31687	0.02609	0.11297
2017	0.27412	0.00533	0.08095
2018	0.33377	0.00467	0.08692

Стандартное отклонение содержания меди в руде в 2018 году составило 0.01906, что на 26.8 процента меньше по сравнению с 2016 годом и на 0.68 процента меньше по сравнению с 2017 годом.

Результаты корреляционного анализа содержания меди в руде представлены в таблице 4.

Таблица 4

Корреляционный анализ содержания меди в руде.

Наименование показателя	Стандартное отклонение содержания меди в руде	
	Коэффициент корреляции, r	Теснота связи
Отклонение извлечения меди в концентрате	0.64862	умеренная
Отклонение качества концентрата	0.72045	умеренная
Отклонение содержания меди в хвостах	0.98522	высокая
Отклонение выхода концентрата	0.94056	высокая

Пояснение тесноты связи

При коэффициенте корреляции $r < 0.5$ – слабая,
при коэффициенте корреляции $0,5 < r < 0.75$ – умеренная,
при коэффициенте корреляции $0.75 < r < 0.9$ – заметная,
при коэффициенте корреляции $0.9 < r < 1.0$ высокая
теснота связи.

Как видно из приведенных выше таблиц, устойчивое, без резких колебаний содержание меди в руде обеспечивает стабильную регулировку технологического процесса обогатительной фабрики:

- теснота связи стандартного отклонения содержания меди в руде и отклонения извлечения меди в концентрате умеренная,
- теснота связи стандартного отклонения содержания меди в руде и отклонения качества концентрата умеренная,
- теснота связи стандартного отклонения содержания меди в руде и отклонения содержания меди в хвостах высокая,
- теснота связи стандартного отклонения содержания меди в руде и отклонения выхода концентрата высокая.

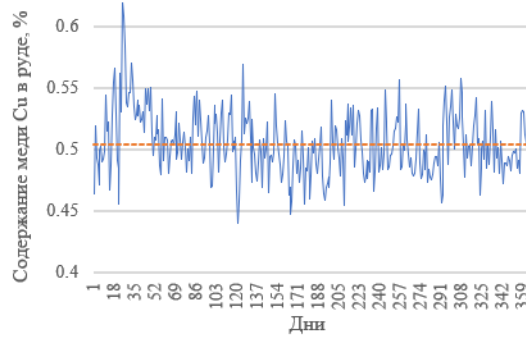


График 1: *График содержания меди Si в руде за 2016 год.*

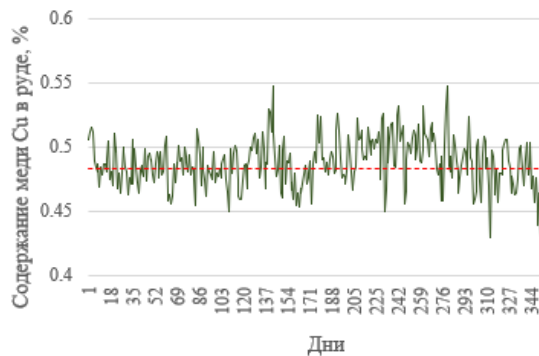


График 2: *График содержания меди Si в руде за 2017 год.*

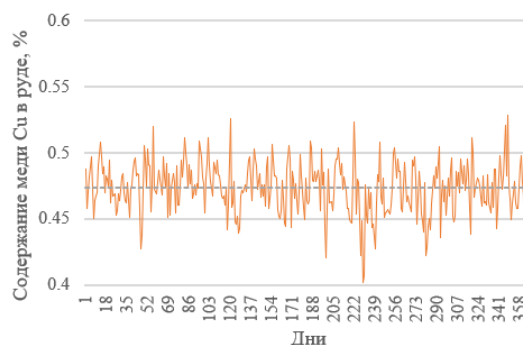


График 3: График содержания меди *Cu* в руде за 2018 год.

Стандартное отклонение содержания меди в руде в 2018 году составляет 0.01906, что на 0.68% меньше, чем в 2017 году, когда оно составляло 0.01919, это указывает на то, что колебания содержания меди в руде уменьшились.

д) Рассмотрим анализы выхода концентрата:

Таблица 5.1

Данные выхода концентрата.

Год	Расчётные данные технологического баланса			
	σ	Разница, +/-	Выход, %	Содержание меди <i>Cu</i> в руде, %
	1	2	3	4
2013	0.02696		2.0071	0.530
2014	0.02687	-0.00009	2.0009	0.526
2015	0.02465	-0.00222	1.9198	0.516
2016	0.02604	0.00139	1.9681	0.510
2017	0.01919	-0.00685	1.8719	0.495
2018	0.01906	-0.00013	1.8340	0.480

Здесь:

- 1 – стандартное отклонение содержания меди *Cu* в руде, σ ;
- 2 – разница стандартного отклонения содержания меди в руде в сравнении с предыдущим годом, + / -;
- 3 – среднее значение выхода концентрата, %;
- 4 – содержание меди в руде, %.

Таблица 5.2

Данные выхода концентрата.

Год	Данные товарного баланса				
	Выход, %	γ	Q	ε	Содержание меди <i>Cu</i> в концентрате, β
	5	6	7	8	9
2013	1.9689	-	-	86.30	23.32
2014	2.0225	-	-	86.55	23.03
2015	1.9495	-	-	88.22	23.35
2016	1.9207	598 517.00	31 180 000	87.56	23.25
2017	1.8918	595 095.88	31 438 000	89.28	23.36
2018	1.8611	585 979.68	31 520 000	89.49	23.08

Здесь:

- 5 – среднее значение выхода концентрата, %;
- 6 – выход концентрата (сухой вес), тн, γ ;
- 7 – переработка руды (сухой вес), тн, Q ;
- 8 – извлечение меди, %, ε ;
- 9 – содержание меди в руде, %, β .

Анализ показателей 2018 года по сравнению с предыдущим годом:

- стандартное отклонение содержания меди в руде уменьшилось на 0.00013 или 0.68%,
- извлечение меди увеличилось на 0.21 или 0.24%.

Выход концентрата определяется по следующей формуле:

$$\gamma_{Cu} = \frac{\varepsilon_{Cu} \cdot \alpha_{Cu}}{\beta_{Cu}} \quad (3.9)$$

Где:

γ_{Cu} – выход концентрата,

ε_{Cu} – извлечение меди,

α_{Cu} – содержание меди Cu в руде,

β_{Cu} – содержание меди Cu в концентрате.

Если предположить, что технология обогатительной фабрики в 2018 году не менялась, но изменилось содержание руды, то расчётный выход концентрата можно рассчитать по формуле (3.9):

$$\gamma_{Cu \text{ 2018 расчётное}} = \frac{\varepsilon_{Cu \text{ 2017}} \cdot \alpha_{Cu \text{ 2018}}}{\beta_{Cu \text{ 2017}}} = 1.8345.$$

Фактический выход концентрата в 2018 году был $\gamma_{Cu \text{ 2018 фактическое}} = 1.8611$, тогда разница расчётного и фактического выходов концентратов будет равна

$$\gamma_{Cu \text{ 2018 расчётное}} - \gamma_{Cu \text{ 2018 фактическое}} = -0.0266.$$

Из выше сделанных расчётов видно, что фактический выход концентрата больше расчётного на 1.43 процента.

Воспроизведём вышесделанные расчёты на данных 2013-2018 годов. Данные, использованные в расчётах, и результаты расчётов показаны в таблицах 6.1, 6.2, 6.3.

Таблица 6.1

Данные выхода концентрата.

Год	Данные товарного баланса		
	Среднее значение выхода концентрата, %	Извлечение меди Cu, % ε	Содержание меди Cu в концентрате, β
2013	1.9689	86.30	23.32
2014	2.0225	86.55	23.03
2015	1.9495	88.22	23.35
2016	1.9207	87.56	23.15
2017	1.8918	89.28	23.36
2018	1.8611	89.49	23.08

Таблица 6.2

Данные выхода концентрата.

Год	Данные товарного баланса	
	Содержание меди Cu в руде, %	Среднее значение выхода концентрата, %
2013	0.530	1.9689
2014	0.526	2.0225
2015	0.516	1.9495
2016	0.510	1.9207
2017	0.495	1.8918
2018	0.480	1.8341

Таблица 6.3

Данные выхода концентрата.

Год	Расчётные данные технологического баланса	Разница расчётного и среднего значения фактического выхода концентратов, +/-
	Среднее значение выхода концентрата, %	
2013	1.9904	1.9689
2014	1.9466	0.0215
2015	1.9392	-0.0759
2016	1.9269	-0.0103
2017	1.8642	0.0062
2018	1.8345	-0.0276

Разницы расчётного и среднего значений фактического выхода концентратов в 2014, 2015, 2017 годах имеют отрицательные значения. Из этого можно сделать вывод, что именно в этих годах проводились какие-либо значительные улучшения в технико-технологических аспектах производства.

е) Для создания и применения единого программного обеспечения по планированию, контролю и анализу данных рудника открытых работ инженерами “Предприятия Эрдэнэт” было разработано программное обеспечение MAS. Программа MAS разрабатывалась, внедрялась в производственную эксплуатацию, и модернизировалась в 2017-2018 годах. В программе использованы следующие данные:

- база данных производственного технологического процесса,
- база данных системы “Питрам”,
- 13 видов геологических карт распределения минералов и элементов,
- «Карта Малютин» (доцент МГУ Ю.А.Малютин), показывающая тип и структуру минералов на горизонтах месторождения Эрдэнэтийн Овоо, проведенная для изучения рудных минералов в 2002 году (обработка информации о минералах меди важно для оценки ценных и токсичных элементов, содержащихся в минерале),
 - база данных программы Micromine для расчёта ресурсов руды, планирования, проектирования и моделирования блоков взрывных работ,
 - база данных GEOBank,
 - методология и алгоритмы программы “Цифровая модель месторождения ЦММ”,
 - библиотечные файлы программы Matlab,
 - месячный, недельный, сменный план работы рудника и обогатительной фабрики,

2) Стандартное отклонение содержания меди Cu в руде в 2018 году составляет 0.01906, что на 0.68 процента меньше, чем в 2017 году, что указывает на уменьшение колебания содержания меди Cu в руде.

3) В 2018 году отклонение выпуска концентратов увеличилось на 0.00597 единиц (7.37%), что указывает в том числе на необходимость в дальнейшей детальном изучении влияния факторов на технологические процессы обогатительной фабрики.

Библиографический список

1. Р. Энхбат, “Оптимизация-2 (линейное программирование).” г. Улаанбаатар, 2009, стр. 1-4.
2. Б. Ууганбаяр, Д. Ариун-Эрдэнэ, “Использование Matlab”, 3 издание, г. Улаанбаатар хот, 2019, стр.6, 80.
3. В.А. Шевелев, “Определение эффективности усреднения руды на буферно-усреднительных складах”, 2014.
4. John H. Mathews, Kurtis D.Fink. “Numerical methods using MATLAB. Third edition”. 1999 он.
5. “Система MAS для планирования и анализа рудника”. Л.Энтүвшин. 2018.