УДК 622.271

© Д.В. Вінівітін, Б.Ю. Собко, В.В. Панченко, С.М. Шолох

МОДЕЛЮЮЧИЙ ПІДХІД ПРИ ОПЕРАТИВНОМУ ПЛАНУВАННІ ГІРНИЧО-ТРАНСПОРТНИХ РОБІТ В ЗАЛІЗОРУДНОМУ КАР'ЄРІ

© D.Vinivitin, B.Sobko, V.Panchenko, S.Sholoh

MODELING APPROACH ON THE OPERATIVE PLANNING OF EARTH AND TRANSPORTATION WORKS IN THE SALES CAREER

Запропонована нова методика оперативного планування гірничо-транспортних робіт в залізорудному кар'єрі. На відміну від відомих методик, вона реалізує концепцію теорії прийняття рішень. Крім стадії об'ємного планування, до її складу також входить стадія графо-аналітичного моделювання динаміки виймально-навантажувальних робіт. Ця стадія виконує просторову прив'язку визначених планових об'ємів гірничої маси.

Предложена новая методика оперативного планирования горно-транспортных работ в железорудном карьере. В отличие от известных методик, она реализует концепцию теории принятия решений. Кроме стадии объемного планирования, в ее состав также входит стадия графо-аналитического моделирования динамики вымочно-погрузочных работ. Эта стадия выполняет пространственную привязку рассчитанных плановых объемов гонной массы.

Вступ. Сучасна актуальність оперативного планування гірничо-транспортних робіт в залізорудному кар'єрі обумовлюється ринковим ростом вимог до об'ємно-якісних характеристик концентрату. Підвищення ефективності оперативного планування - один із реальних напрямів виконання цих вимог, до того ж не пов'язаний з такими великими затратами як, наприклад, модернізація технологічного устаткування.

Характерною особливістю сьогоднішнього етапу розвитку теорії і практики оперативного планування гірничо-транспортних робіт є перехід від традиційної методології, орієнтованої практично стовідсотково на людський фактор у прийнятті рішень, до якісно нової системної методології, орієнтованої на виконання частини функцій з підготовки прийняття рішень програмними засобами. Теоретичною основою такої методології виступають системний підхід і теорія прийняття рішень, а програмними засобами – інструментарій геоінформаційних систем [1].

У зв'язку з цим, ціллю даної статті є *теоретико-технологічне* обґрунтування з *системних* позицій множини моделей задач оперативного планування та методів підготовки прийняття планових рішень для методичного забезпечення оперативного планування гірничо-транспортних робіт з реалізацією у складі *геоінформаційної* системи KMINE.

Стан питання та вихідні положення роботи. *Системні* позиції в плануванні виробництва в даний час достатньо визначені: множина задач оперативного планування і їх моделей повинна формуватись в результаті декомпозиції загальної задачі планування гірничо-транспортних робіт і її моделі (якщо фор-

малізація загальної задачі може бути здійснена). Основними факторами декомпозиції в практиці виступають часовий і об'єктний (склад гірничо-транспортного процесу). За першим фактором завжди у складі оперативного планування виділяються рівні: місячний, декадний, добовий та змінний, а за другим – планування гірничих (виймально-навантажувальних), транспортних та розвантажувальних робіт. У другому випадку, якщо дозволяє рівень складності, планування гірничих і транспортних робіт може здійснюватись однією задачею планування гірничо-транспортних робіт (об'ємів виймально-навантажувальних робіт з розподілом вантажопотоків). При цьому планування власне транспортних робіт (визначення потрібної кількості автосамоскидів різних типів і т.п.) і розвантажувальних робіт (на відвалах, перевантажувальних складах і приймальних бункерах) реалізуються окремими задачами. Саме така схема декомпозиції прийнята в роботі.

Теоретичне обґрунтування моделей задач оперативного планування гірничо-транспортних робіт та методів їх вирішення передбачає використання певної теорії, на основі якої вони розробляються. До недавнього часу такою теорією була теорія математичного програмування. Як відмічено у Вступі, на зміну їй у зв'язку з переходом до системної методології, що поки знаходиться в стадії створення, приходить теорія прийняття рішень, яка не відкидає, а, навпаки, передбачає застосування, в разі доцільності, традиційних і математичних моделей і методів.

За умов такої зміни теоретичної основи, *технологічне обґрунтування* перетворюється у пріоритетний етап створення системних моделей і методів планування гірничо-транспортних робіт (аналіз та систематизація визначальних факторів, їх кількісна оцінка, коректний перехід до умов (обмежень) та критеріїв оптимальності, задання структури їх множини і т.п.).

У зв'язку зі сказаним вище, актуальними є роботи з оперативного планування гірничо-транспортних процесів або з подібного напряму, орієнтовані на геоінформаційні програмні інструменти. Такі роботи можна умовно розділити на дві групи, в залежності від способу формування об'ємів гірничої маси, що підлягає вийманню: роботи, що реалізують комбінаторний спосіб, і роботи, що реалізують моделюючий підхід. В характерній роботі першої групи [2] об'єм виймального блоку та його конфігурація визначається перебором блоків гірничо-геологічної моделі в процесі формування необхідних об'ємно-якісних показників гірничої маси. В характерній роботі другої групи [3] конфігурація виймального блоку визначалась шляхом переміщення заданої ділянки уступа. Напрям переміщення задавався вектором графічно, частина параметрів – в числовій формі, а частина визначалась аналітично. Розробки другої групи в більшій мірі відображають виймально-навантажувальний технологічний процес, але для оперативного планування його моделювання доцільно ще більш деталізувати і відображати рух кожного екскаватора.

Базова математична модель задачі оперативного планування гірничо-транспортних робіт. Відповідно сформульованій цілі і вихідним положенням на першому етапові роботи була обґрунтована базова математична модель за-

дачі оперативного планування гірничо-транспортних робіт в залізорудному кар'єрі. Відповідно основної концепції теорії прийняття рішень процедури, що слабо формалізуються, виконує людина (технолог, ЛПР – людина, що приймає рішення) [4]. В нашому випадку ЛПР на основі базової моделі створює моделі для рівнів оперативного планування (від місяця до зміни). В залежності від виробничої ситуації навіть для одного рівня моделі можуть змінюватись.

Для зручності роботи ЛПР базовій моделі було надано наступну модульну структуру.

1. Економічний критерій – мінімум транспортних витрат з перевезення руди із вибоїв до пунктів розвантаження:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{p} c_{ijk} \cdot \left(P_{ijk} + V_{ijk}\right) \Rightarrow \min, \qquad (1)$$

де i – індекс нумерації екскаваторів, i=1..n;
j – індекс нумерації пунктів розвантаження, j=1..m;
k – індекс нумерації елементарних блоків виймального уступу екскаватора i, k=1..p;
c_{ijk} – вартість транспортування 1 т гірничої маси від i-го екскаватора до j-го пункту розвантаження, грн.:
$c_{ijk} = c \cdot l_{ijk}$;
c – питома вартість транспортування 1 т руди на 1 км, грн./т км;
l_{ijk} – відстань від i-го екскаватора до j-го пункту розвантаження;
P_{ijk} та V_{ijk} – керовані величини – обсяги руди та розкривних порід відповідно, які перевозяться від i-го екскаватора до j-го пункту розвантаження із k-го елементарного блоку.

2. Технологічний критерій – мінімум середньоквадратичного відхилення показника якості корисного компонента в шихті, що надходить на збагачувальну фабрику:

$$F_2 = \sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ijk} \cdot (\alpha_{ik} - \alpha_{пл})^2}{\sum_{i=1}^{n} P_{ijk}} \rightarrow \min, \qquad (2)$$

де α_{ik} – вміст корисного компонента в руді, що відвантажує i-й екскаватор;
$\alpha_{плj}$ – потрібна якість шихти, що сформується на j-й збагачувальній фабриці.

В технологічному критерії знаменник $\sum_{i=1}^{n} P_{ijk}$ незначно відхиляється від суми об'ємів руди, що надходять на приймальні пункти. Значення цих об'ємів задаються директивно і для сформованої вище моделі є величиною постійною, тому розв'язок задачі несуттєво зміниться, якщо в якості цільової функції буде представлений лише чисельник виразу F_2:

$$F_2 = \sigma_X^2 = \sum_{i=1}^{n} P_{ijk} \cdot \left(\alpha_{ik} - \alpha_{пл}\right)^2 \rightarrow \min. \qquad (3)$$

Варто зазначити, що даний критерій може формуватись як за якимось одним якісним показником (наприклад, залізо загальне, залізо магнітне, залізо у

концентраті тощо), так і за декількома з них. Тобто вираз F_2 може бути або складений кілька разів, або містити суму складників для різних показників якості. Зрозуміло, що останній випадок можливий лише за коректного нормування врахованих показників.

3. Технічний критерій – до закінчення певних часових періодів екскаватори повинні відробити певні запаси рудної маси:

$$F_3 = \sum \left[\left(P_{ijk}^{\max} - R_{jk} \right) - \left(P_{пл} + V_{пл} \right) \right] \Rightarrow \min , \tag{4}$$

де $P_{ijk}^{\max}$ - запас руди; R_{jk} – відроблені запаси на початок планового періоду.

Початкова інформація про потрібні кінцеві координати екскаватора повинна перетворюватися в інформацію про необхідні виймальні обсяги екскаватора. Для цього використовується процедура підрахунку об'єму гірничої маси по вказаним контурам на гірничо-геологічній моделі кар'єра.

4. Максимум рудної гірничої маси на пунктах розвантаження або мінімум відхилення руди на пунктах розвантаження від планових показників:

$$F_4 = \sum_{i=1}^{n} P_{ijk} - P_{пл} \Rightarrow \min . \tag{5}$$

Для отримання коректних результатів планування необхідно врахувати наступні модулі обмежень:

1. Модуль продуктивності пунктів розвантаження (перевантажувальних майданчиків, бункерів дробильно-збагачувальних фабрик тощо):

$$A_{плj} \le \sum_{i=1}^{n} P_{ijk} \le A_{плj} + \Delta A_j , \tag{6}$$

де $A_{пл\,j}$ – об'єм гірничої маси, що надходить на j-й пункт розвантаження;
ΔA_j – можливе відхилення об'ємних показників гірничої маси, що повинна надійти на j-й пункт розвантаження.

2. Модуль вимог до якості корисних копалин.

2.1.Якість руди може знаходитись в деяких межах $\alpha_{пл} \pm \Delta\alpha$:

$$\alpha_{nj} - \Delta\alpha_j \le \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ijk} \cdot \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n} P_{ijk}} \le \alpha_{плj} + \Delta\alpha_j , \tag{7}$$

де $\Delta\alpha_j$ – припустиме відхилення від $\alpha_{плj}$.

Про вміст корисних компонентів в руді, що відвантажує екскаватор, можна робити висновки згідно даних опробування свердловин розвідувального та експлуатаційного буріння. Слід відзначити, що дані вирази потрібно складати за кожним показником якості для кожного пункту розвантаження.

2.2. Вимоги до вмісту шкідливого компонента в шихті:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ijk} \cdot D_i}{\sum_{i=1}^{n} P_{ijk}} \le D_j , \tag{8}$$

де D_i – середній вміст шкідливих домішок в обсязі видобутку i-го екскаватора;

D_j – припустиме значення вмісту шкідливих домішок в загальному обсязі руди, що надходить на пункт розвантаження.

2.3.Вимоги співвідношенням в шихті різних сортів руд по збагачуваності:

$$\sum_{i=1}^{n} P'_{ijk} : \sum_{i=1}^{n} P''_{ijk} : \sum_{i=1}^{n} P'''_{ijk} = T_j : S_j : L_j \qquad (9)$$

де $P'_{ijk}, P''_{ijk}, P'''_{ijk}$ - відповідно обсяги важко-, середньо- та легкозбагачувальних руд, що підлягають вийманню *i*-м екскаватором та поставляються на *j*-у збагачувальну фабрику;

T_j, S_j, L_j – частки важко-, середньо- та легкозбагачуваних руд в процентному відношенні, що відповідають вимогам *j*-ї збагачувальної фабрики.

Дані по типам руд від кожного екскаватора беруться з моделі родовища.

3. Модуль вимог до продуктивності кожного екскаватора:

$$Q_{i_{\min} k} \le \sum_{j=1}^{m} (P_{ijk} + V_{ijk}) \le Q_{i_{\max} k}, \qquad (10)$$

де $Q_{ik\ min}$, $Q_{ik\ max}$ – відповідно мінімальна та максимальна продуктивність екскаватора в конкретному вибої.

4. Модуль черговості відробки елементарних блоків екскаваторних уступів.

Об'єм видобутку з кожної виймальної дільниці не перевищує запасу руди на даній дільниці:

$$P_{ijk} \le P_{ijk}^{\max}. \qquad (11)$$

Технологічний порядок виймання елементарних блоків екскаватору описується наступними умовами:

$$P_{ijk} = \begin{cases} = 0, якщо P_{ij,k-1} < P_{ij,k-1}^{\max}, \\ > 0, якщо P_{ij,k-1} = P_{ij,k-1}^{\max}. \end{cases} \qquad (12)$$

Як бачимо, наведена модель – багатокритеріальна задача лінійного програмування, і для її рішення використовувався відомий симплексний метод. Перехід до однокритеріальної задачі здійснював шляхом лінійної згортки критеріїв F_1, F_2, F_3, F_4.

Графо-аналітичне моделювання динаміки гірничо-транспортних робіт. Як відомо вирішення задачі оперативного планування лінійного програмування, представленої базовою моделлю (1)-(12), або моделями, що були створені ЛПР на її основі, дає тільки числові значення об'ємів $P_{i,j,k}$ і $V_{i,j,k}$ та похідних від них параметрів. А для цілей оперативного планування ці об'єми і похідні від них параметри повинні мати певну просторову прив'язку і конфігурацію. Виникає проблема: між розрахованими плановими об'ємами і їх просторовою прив'язкою і конфігурацією однозначності немає, бо вирішення задачі лінійного програмування таку відповідність не встановлює.

Для вирішення цієї проблеми була застосоване графо-аналітичне моделювання варіантів динаміки виймально-навантажувальних робіт при відпрацюванні заходок. Була обгрунтована множина технологічних факторів, що обумовлюють можливі варіанти динаміки:

- просторова орієнтація заходок (повздовжні, діагональні, поперечні),
- спосіб їх відпрацювання (валовий і селективний; з перегоном екскаватора в початок наступної заходки або без перегону),
- параметри заходок (довжина і ширина).

Запропонована наступна методика графо-аналітичного моделювання.

1. Задавалась кількість заходок для відвантаження розвалу, їх тип і ширина (вузькі, нормальні, широкі). Довжина заходок визначалась, виходячи з розрахункової продуктивності екскаватора за конкретний період планування.

2. Величина переміщення екскаватора за плановий період визначалась із уже визначених планових об'ємів виймання гірничої маси в межах заходки та прийнятої ширини заходки (вибою).

3. Прийняті значення факторів (вихідні дані) знижують невизначеність і дозволяють вибирати відповідно їм просторове розташування планових об'ємів виймання гірничої маси в межах заходки.

4. Отримані таким чином конфігурації планових блоків виймання включають множину конкретних блоків гірничо-геологічної моделі, що дозволяє визначити об'ємно-якісні показники всіх різновидів гірничої маси, що попали у контури планового об'єму виймання.

Як видно із викладеного вище, методика графо-аналітичного моделювання є складовою загальної методики оперативного планування гірничо-транспортних робіт. В неї також входить методика визначення планових об'ємів виймання гірничої маси та розподілу вантажопотоків.

Отримані графо-аналітичним моделюванням планові об'єми виймання гірничої маси будуть мати середні якісні показники, які можуть відрізнятись від середніх якісних показників, що були прийняті в якості вихідних даних для моделі (1)-(12). В цьому випадку значення якісних показників за результатами графо-аналітичного моделювання підставляються в обмеження (6)-(12) для перевірки їх виконання. Якщо вони виконуються, то розраховуються значення критеріїв (1)-(6).

Сформований за такою загальною методикою результат вирішення задачі оперативного планування гірничо-транспортних робіт характеризується числовими даними та просторовим розташуванням і конфігурацією планових об'ємів виймання і транспортування гірничої маси (рис. 1), що і вимагає постановка задачі.

Отримані практичні результати. Ефективність такої загальної методики вирішення задачі оперативного планування гірничо-транспортних робіт в залізорудному кар'єрі досліджувалась порівнянням фактичних значень критеріїв F_1, F_2, F_3, F_4 роботи кар'єру Полтавського ГЗК за період серпень 2016 р. – липень 2017 р. із розрахунковими.

У табл. 1 представлені відношення розрахункових значень критеріїв до фактичних за вказаний період. Як видно, лише 1-го разу із 48-и значення розрахункового критерію виявилось гіршим за фактичне.

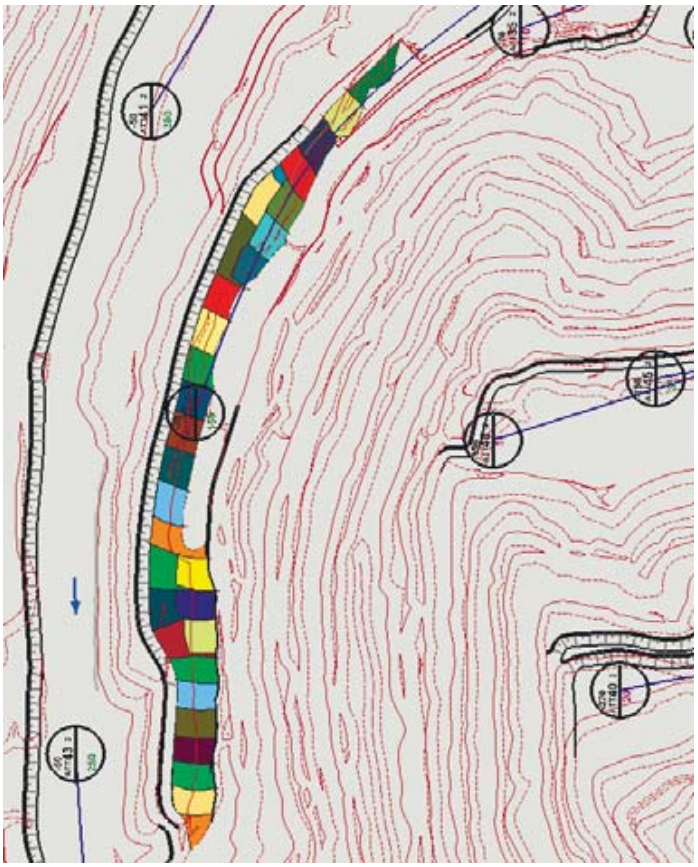

Рис. 1. Приклад візуалізації повздовжньої заходки із зображенням розташування та конфігурації планових об'ємів виймання за результатами графо-аналітичного моделювання

Таблиця 1

Відношення розрахункових значень критеріїв F_{ip} до фактичних $F_{iф}$ за період з серпня 2016 до липня 2017 рр.

Відношення критеріїв	08, 2016	09, 2016	10, 2016	11, 2016	12, 2016	01, 2017	02, 2017	03, 2017	04, 2017	05, 2017	06, 2017	07, 2017
$F_{1р} / F_{1ф}$	0,90	0,95	1,01	0,93	0,96	0,93	0,97	0,99	0,92	0,92	0,92	0,94
$F_{2р} / F_{2ф}$	0,91	0,90	0,97	0,92	0,98	0,90	0,99	0,99	0,98	0,97	0,94	0,91
$F_{3р} / F_{3ф}$	0,97	0,94	0,93	0,97	0,92	0,91	0,96	0,95	0,96	0,92	0,98	0,98
$F_{4р} / F_{4ф}$	0,98	0,92	0,93	0,96	0,99	0,99	0,91	0,97	0,93	0,94	0,93	0,93

У табл. 2 представлені відношення внутрішньомісячної дисперсії розрахункових до фактичних значень критеріїв F_1, F_2, F_3, F_4. Лише у трьох випадках (із 48) коливальність розрахункових значень виявилась вищою за фактичні.

Представлені в табл. 2 значення засвідчують, що у 45 із 48 значеннях коливальність розрахункова виявилась нижчою за фактичну, тобто визначені геометричні параметри щодобових екскаваторних забоїв дозволять підвищити стабільність критеріальних показників у середньому на 10,43% (транспортні ви-

трати на 9,97%, якісні показники на 10,82%, об'ємні показники на 8,92%, поставки руди на пункти розвантаження на 12,03%).

Таблиця 2

Відношення розрахункових значень внутрішньомісячних дисперсій критеріїв до фактичних внутрішньомісячних дисперсій критеріїв за період з серпня 2016 до липня 2017 рр.

Відношення дисперсій критеріїв	08, 2016	09, 2016	10, 2016	11, 2016	12, 2016	01, 2017	02, 2017	03, 2017	04, 2017	05, 2017	06, 2017	07, 2017
F_1	0,94	0,88	0,98	0,88	0,85	0,98	0,88	0,86	0,88	1,03	0,87	0,86
F_2	0,94	0,92	0,86	0,91	0,91	0,91	0,89	0,88	0,89	0,87	0,85	0,87
F_3	0,96	0,89	0,91	0,92	1,00	0,90	0,89	0,96	0,85	0,94	0,87	0,94
F_4	0,86	0,87	0,85	0,89	0,87	0,86	0,86	0,93	0,90	1,01	0,87	0,87

Висновок. На основі цих даних можна стверджувати, що використання запропонованої загальної методики оперативного планування гірничо-транспортних работ дозволить зменшити як абсолютні значення результуючих технологічних показників та їх коливання: відстані транспортування, якісних параметрів рудної шихти, відхилення фактичних значень об'ємів виймання гірничої маси від запланованих.

Перелік посилань

1. Загубинога В.В., Панченко В.В. Аналіз методології планування гірничих робіт на залізорудних кар'єрах та шляхи її вдосконалення // Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – Випуск 28. – С. 271-275.
2. Коробко В.М. Технологічні параметри дискретної оптимізації розвитку гірничих робіт на кар'єрах. // Науковий вісник НГАУ. – 2002. - №3. – С.33-36.
3. Gumenik I.L., Panchenko V.V., Hihlov D.V.. Development of standard functional procedure to solve the problem of designing and planning open cast mining // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ. – 2006. - № 5. – С. 36-38.
4. Евланов Л.Г. Теория и практика принятия решений. – М.: Экономика, 1984. – 176 с.

ABSTRACT

Purpose is to develop a methodology for operational planning of mining operations in the iron ore quarry. This technique should not only calculate the planned volumes of excavation of rock mass, but also perform their spatial binding.

The methodology. The decision theory, linear mathematical programming and grapho-analytical modeling are used.

Findings. Comparison of the actual values of the main quarry performance parameters with their calculated values by the proposed method for the conditions of the Poltava GOK confirmed the effectiveness of this development.

The originality is to develope methodology lies in the proposed algorithm for grapho-analytical modeling of the dynamics of excavating and loading operations. It performs the spatial binding of the calculated planned volumes of rock mass.

Practical implications is to develop methodology for operational planning of mining operations in the iron ore quarry will be used in the automated production planning system of Poltava GOK.

Keywords: iron ore quarry, mining operations, operational planning, methodology, modeling approach

УДК 622.271.3

© А.А. Адамчук

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КАПИТАЛЬНОЙ ТРАНШЕИ ПРИ ВСКРЫТИИ ГОРИЗОНТОВ КАРЬЕРА С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

© A. Adamchuk

METHOD OF CALCULATION OF MAIN TRENCH PARAMETERS DURING OPEN-CAST MINING TAKING INTO ACCOUNT THE TERRAIN

Выполнен анализ параметров проведения капитальной траншеи простой формы. Приведена новая методика расчета длины и объема траншеи в условиях ее проведения на участке с наклонной поверхностью земли. Установлена зависимость снижения горно-капитальных работ при проведении капитальной траншеи от продольного и поперечного уклона поверхности земли, параметры которой рассчитаны по новой методике.

Виконано аналіз параметрів проведення капітальної траншеї простої форми. Наведено нову методику розрахунку довжини і об'єму траншеї в умовах її проведення на ділянці з похилою поверхнею землі. Встановлено залежність зменшення гірничо-капітальних робіт при проведенні капітальної траншеї від поздовжнього і поперечного кута нахилу поверхні землі, параметри якої розраховані за новою методикою.

Вступление. Вскрытие месторождения занимает ключевую роль в подготовке полезного ископаемого к выемке вне зависимости от формы и глубины его залегания. В условиях открытых горных работ вскрытие верхних рабочих горизонтов производят капитальными траншеями, нижних, кроме того – шахтными стволами и штольнями. Установление рациональных параметров вскрывающих выработок предопределяет успешную работу как горнотранспортного комплекса, так и горного предприятия в целом. При этом одним из важнейших факторов выбора расположения и расчета параметров открытых вскрывающих выработок является рельеф местности. На параметры проведения и расположение штолен и шахтных стволов он существенного влияния не оказывает. В то