

“МЕТОД НА ОГРАНИЧИТЕЛНИТЕ ПОВЪРХНИНИ” – ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ ПРИ ИЗЧИСЛЯВАНЕТО НА ЗАПАСИ ОТ ИНДУСТРИАЛНИ МИНЕРАЛИ И СКАЛИ

Димитър Съчков, Иван Димитров

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; DimitarSachkov@gmail.com

РЕЗЮМЕ. В България се използват прости методи за изчисляване на запаси от полезни изкопаеми. Например, такива са – методът на геоложките блокове и методът на вертикалните разрези. Тези методи са приложими единствено за находища със слаба изменчивост. Тук е представен метод, неизползван досега в геоложката практика, наречен “Метод на ограничителните повърхнини”. Изразява се в изчисление на обемите на множество “елементарни” тела, ограничени от моделирани в GIS или CAD/TIN повърхнини, за създаването на които се използва значително по-голямо количество данни. Ръчното създаване на повърхнини и проверка при изчислението на обеми, заключени между сложни тримерни повърхнини е твърде трудоемко, затова метода не се е прилагал досега. Тук са показани стъпките на работа при компютърното генериране на ограничителни повърхнини и изчисляването на обемите между тях. Развита е последователност от стъпки за работа и проверка на резултатите, като се предлага схема за опростяване на данните, за преглед на достоверността на компютърните изчисления.

“THE METHOD OF CONFINING SURFACES” – OPTIONS FOR COMPUTER MODELING FOR THE PURPOSE OF RESERVE CALCULATION OF INDUSTRIAL MINERALS AND ROCKS

Dimitar Sachkov, Ivan Dimitrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; DimitarSachkov@gmail.com

ABSTRACT. Simple methods for reserve calculation of industrial minerals and rocks are used in Bulgaria. Such for example are the method of geological blocks and the method of geological sections. These methods however are applicable only for deposits with low geological variability. Unused in geological practice method, named “Method of the confining surfaces” is demonstrated in this paper. It is based on calculation of the volumes of a number of ‘elementary’ rock bodies, confined between GIS and CAD/TIN surfaces. These are created from considerable amount of primary data. The manual creation of surfaces and validation of such calculations of volumes confined between complex 3D surfaces is tedious, that is why this approach it is not applicable. The steps for computer generation of the confining surfaces and volume calculations are shown in this work. A succession of proposed steps for simplification of the data is exposed that allows practical confirmation of the results.

Въведение

При изчисляването на запаси от полезни изкопаеми и по-конкретно при индустриалните минерали и скали, от дълго време не са правени опити за модернизиране на изчислителните процедури. Използват се доказани стари методи за изчисление, които от съвременна гледна точка са твърде тромави за работа, поради което не се и прилагат с достатъчна прецизност и точност. В практическите ръководства се предлагат: Средно-аритметичен метод; Метод на многоъгълниците; Метод на триъгълниците; Метод на изолините; Метод на изохипсите; Линеен метод и др. (Христов, 1974). Поради сравнително лесният за проверка процес на работа, в практиката преобладават два метода, а именно Метод на геоложките блокове и Метод на вертикалните разрези.

Основни класически методи

Метод на геоложките блокове

Методът на геоложките блокове е най-често прилаганият метод при изчисляването на запаси на твърди полезни

изкопаеми. Същността на работа при него се изразява в изчисление на площта и средната дебелина на отделения блок. Очевидно е, че той е приложим при съвсем прости геоложки условия и за суровина, отличаваща се със значителна еднородност. Основният принцип за определяне на геоложки блокове е по-степената на проученост на геоложкото пространство, изразена в броя и типа на проучвателните изработки и наличието на естествени геоложки или технологични граници.

Площта на геоложкия блок се ограничава между най-външните проучвателни изработки или геоложки точки, използвани за изчислението, а дебелината е средно аритметично от всички дебелини. Изчисленията се извършват по формулата (Прокофьев, 1953):

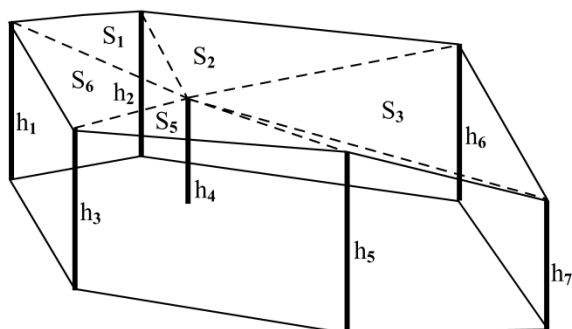
$$V = Sh; \quad (1)$$

при

$$S = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{n}, \quad (2)$$

$$h = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_m}{m} \quad (3)$$

където $S_1, S_2, \dots, S_n$ са площите на елементарните геометрични фигури, ограничени от проучвателните изработки, а $h_1, h_2, \dots, h_m$ са дълбочините на отделните изработки (Фиг. 1).



Фиг. 1. Схема на разпределение на данните при използване на метода на геоложките блокове

Както ясно се вижда, в приетата методика на работа не се взема предвид релефа на терена и наличието на геоложки граници. Не се отчита и формата на геоложкото тяло, съдържащо полезното изкопаемо. Изчисляването по метода на геоложките блокове е точно единствено за тела с форма, близка до стандартна геометрична фигура, но не и на такива със сложни граници, каквито по принцип са всички природни обекти. Даже и при сравнително прост релеф на земната повърхност, изчисленията чрез този метод водят до значителна грешка тогава, когато геоложките тела потъват под някакъв ъгъл спрямо хоризонтала.

Метод на геоложките разрези

Методът на геоложките разрези се състои в построяване на разрези по проучвателните изработки, разположени в прави линии. В сравнение с метода на геоложките блокове той е подходящ за изчисляване на запаси в по-сложни находища, тъй като разрезите представят по-добре сложните граници във вертикално направление. Обемите се изчисляват по формулата

$$V = L \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (4)$$

където S_1 и S_2 са площите на два съседни разреза, а L е разстоянието между тях. В този вид формулата е приложима само в случаите, когато площта на двата разреза е сравнително равна, в противен случай формулата добива вида

$$V = kL \frac{S_1 + S_2}{2}, \quad (5)$$

където

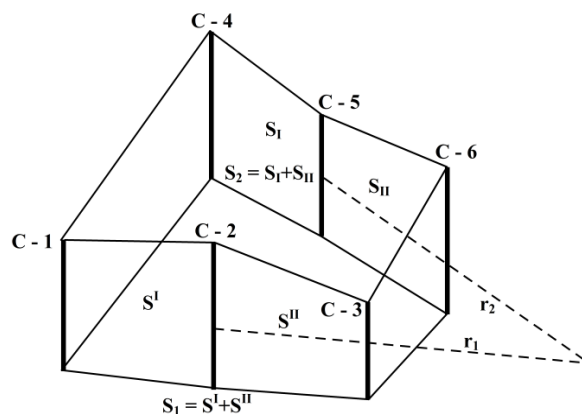
$$k = \frac{\frac{1}{3}(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2})x^2}{\frac{S_1 + S_2}{2}} = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1}}} \right) \quad (6)$$

(Фейган, 1956).

Често пъти проучвателните изработки не се подреждат в успоредни линии, ето защо това налага в изчисляването на запасите да се включи допълнителна формула

$$V = \frac{\beta}{6} [r_1 (zS_1 - S_2) + r_2 (S_1 + S_2)] \quad (7)$$

(Золотарев, 1936), където r_1 и r_2 са разстоянията, измерени в плана от пресечната точка на двата разреза до центъра на тежестта на съответната площ в разрезите.



Фиг. 2. Схема за изчисляване на запаси по метода на вертикалните разрези

Изчисляването на обеми с висока точност по метода на вертикалните разрези изисква построяването на значителен брой разрези по данни от голям брой изработки. Изчисленията на обемите между всеки два разреза, поради своето разположение в пространството, в случаи различни от идеалния (успоредни сондажи с приблизително равни дължини), налага използването формулите за различни площи (5) и ориентацията на разрезите (7). Тогава изчисленията стават твърде тромави и повечето геолози прибегват до занижаване на количеството на използваната информация, следователно и до генерализиране формата на изчислявания геоложки блок.

Метод на ограничителните повърхнини

През последните няколко десетилетия и особено през последните години информационните технологии придобиват все по-голяма популярност в геоложката практика. Това обаче е валидно най-вече при проучванията и експлоатацията на находищата на скъпоценни метали. Що се касае до проучванията за индустриални минерали и скали, то методиката на работа не е осъвременена и често пъти както проучванията, така и изчисленията на запасите са непълни и неточни. Ето защо авторите смятат, че е полезно да се дискутира един съвременен, бърз и точен метод за изчисляване на запасите, който се отличава и с универсалност в различни геоложки обстановки.

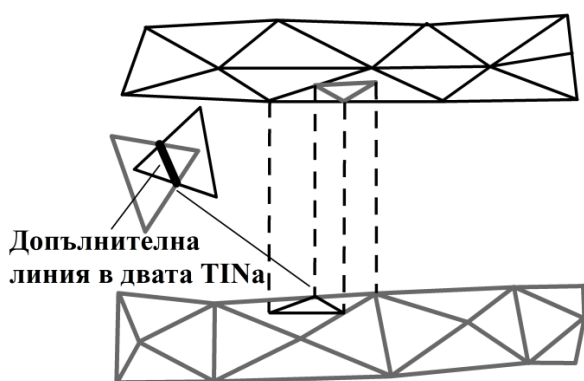
Идея на метода

Предложеният тук метод, макар и не напълно удачно, може да бъде наречен *Метод на ограничителните повърхнини (МОП)*. В исторически план, математическият апарат, на който е базиран метода, не е нов. Новото е, че прилагането на тези изчисления към момента е възможно с използване на голямо количество входяща геоложка информация, като се използва компютър с инсталиран CAD или GIS продукт. МОП има известно сходство с

известният вече метод на триъгълниците, използван от част от маркшайдерите, тъй като чрез него се постига изчисляването на елементарни обемите на триъгълни призми. Често пъти обаче, особено когато целта е да се отчете долната граница на стратиграфски определен пласт или при проучване на интрузивно тяло, където химичните и физични показатели на практика не се изменят в целия обем на проучваната площ, се проектират и изпълняват малко на брой сондажи. Това от своя страна води до генерализиране на топографските контури и на повърхностите, ограничаващи блоковете. Именно тук е и разликата между класическия метод на триъгълниците и Метода на ограничените повърхнини.

При МОП, създадените триъгълници могат да бъдат различни за отделните търсени граници: топографска повърхнина, граница между откривката и суровината, долна граница на изчисляемите запаси (фиг. 3) и др. Това е възможно, понеже при компютърното генериране и сравняване на повърхнини от триъгълници е възможно добавянето на произволен брой нови точки в равнината на всеки отделен триъгълник, естествено без това да променя неговата форма. Това позволява използването на значително по-голямо количество различна информация при изчисляването на обеми от полезни изкопаеми.

За горна ограничителна повърхнина, освен данни от сондажите, могат да се използват данни от топографска геодезическа снимка. За генерирането на долната граница на полезното изкопаемо се проектират достатъчно дълги сондажи, а за повърхнината, представяща границата между откривка и полезно изкопаемо, могат да се прокарат допълнителни по-къси (до няколко метра) сондажи (фиг. 8). Като друго предимство на метода може да се посочи възможността за определяне с висока точност на много и сложни обемни тела, създавайки единствено границите между тях. Освен това, чрез него могат да се изчисляват и визуализират промените в обемите и взаимоотношенията им. Примери за начините на приложение на метода са посочени по-долу.



Фиг. 3. Схема на генериране на триъгълни призми между TIN повърхнините

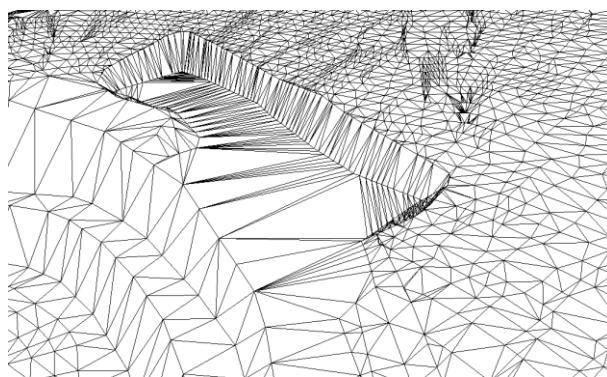
Същност и структура на метода на ограничените повърхнини

За изчисляване на запасите по МОП е необходимо познаване на софтуерен CAD или GIS продукт, като разглежданите от авторите са Autodesk CIVIL 3D и ArcGIS. Като информация могат да се ползват практически

всякакъв тип източници, стига да разполагат с верни X, Y, Z параметри. Най-често се използват тримерно определени точки, събрани от проучвателни сондажи, геоложки точки от естествени и изкуствени разкрития, и точки от геодезическо заснемане на терена. Освен точки, при изчисленията могат да се използват структурни и топографски контури. Структурните контури могат да маркират повърхност, отделяща типове суровина или повърхност, отделяща суровина от откривка. Топографските контури се използват при детайлизиране на характера на терена, който често се възприема като горна ограничителна повърхнина на откривката.

От събраната информация се създават тримерни гранични повърхнини, служещи за ограничаване на геоложките блокове. Повърхнините могат да бъдат от различен тип, но най-подходящи са TIN повърхнините.

TIN или Triangular Irregular Network е цифрова структура от данни, използвана в CAD и GIS приложенията. Представява векторно представяне на физическа (или имажинерна) повърхност, дефинирана от неравномерно поставени в пространството точки, зададени с триизмерни координати XYZ. Тези точки са свързани помежду си за получаване на мрежа от различни по размери и вид триъгълници (фиг. 4), от където идва и името. Принципът на този метод е познат и се използва от години от топографите за интерполация на изохипси. Точността на повърхнина от такъв тип зависи от дължините на страните на триъгълниците. За сравнително равнинни части на терена са необходими малко на брой точки, респективно дълги страни на триъгълниците, докато за големи разлики в теренните височини, мрежата от точки трябва да бъде по-гъста. Предимствата на TIN-повърхнините като векторен модел пред растерните повърхнини са в това, че за изграждането им са необходими значително по-малко на брой точки. Това е така заради логаритъмът на изчисление, който задава различна тежест на всяка точка, за по-реалистично представяне на тримерната повърхнина. За първи път Triangular Irregular Network за целите на GIS е използван от Franklin (1973).

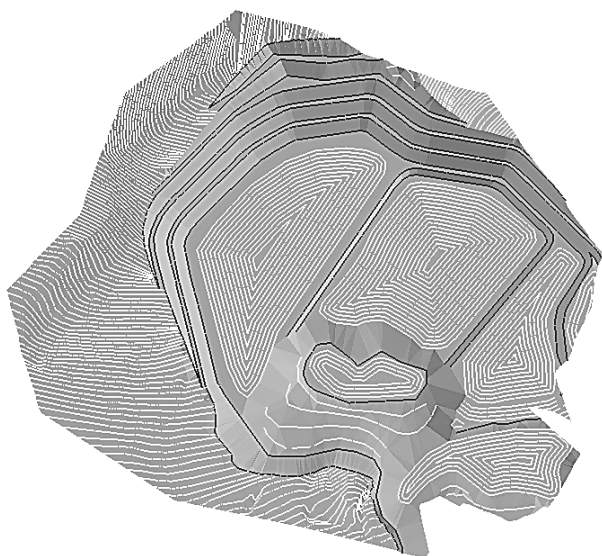


Фиг. 4. Примерна TIN повърхнина

За създаването на TIN повърхнина от векторни данни могат да бъдат използвани точкови и линейни обекти. Масовите точки (masspoints) са точки със зададени координати XYZ. Те, както и възлите на линиите и полилиниите, са ключови за изграждането на мрежата от триъгълници, тъй като определят формата на повърх-

ността. В зависимост от броя и гъстотата на точките, може да се определи и степента на достоверност на получената повърхнина. За извличане на масови точки могат да се използват освен точкови файлове (слоеве), линейни и площни обекти, като при тяхното използване за точка се приема всеки отделен възел, изграждащ обекта. Използваните точки могат да бъдат тримерни, разполагащи освен с реални равнинни координати и с такива за превишението или двумерни, със записана в атрибутната информация числова стойност на височината. Употребата на "меки линии" (softlines) в изграждането на повърхнина допринася за плавното представяне на терена, подобно на изохипсите. Също както при масовите точки, при меките линии може да се използват и триизмерно или двумерно съставени полилинии.

Функцията на твърдите линии (hardlines), наричани още и breaklines в алгоритъма на пресмятане на TIN-повърхнина, имат най-голяма тежест. Тяхната функция е рязко да променят наклона на триъгълниците точно по трасето на самата линия, а не като меките линии, при които под внимание се вземат единствено възлите и техните координати. Наличието на тези линии представлява и най-голямото предимство на TIN-повърхнините пред останалите компютърно генерирани повърхнини, и ги прави най-доброто решение при тримерно геоложко моделиране, особено при експлоатационно проучване на рудници и кариери.



Фиг. 5. TIN повърхнина. С черно са посочени твърдите линии (breaklines), с бяло меките линии (contours)

За изчисляване на обемите от полезно изкопаемо е необходимо "сравняването" на две TIN-повърхнини. В основния случай, тези повърхнини се различават помежду си по генериращите ги триъгълници (фиг. 3). Компютърът проверява върховете на всеки един от триъгълниците и поставя точки във всяка една от повърхнините така, че да се получат еднакви триъгълници, лежащи непосредствено един над друг в двете повърхнини. От еднакви триъгълници се създават фигури, формата на които с достатъчна точност може да се приеме за триъгълна призма. От формулата

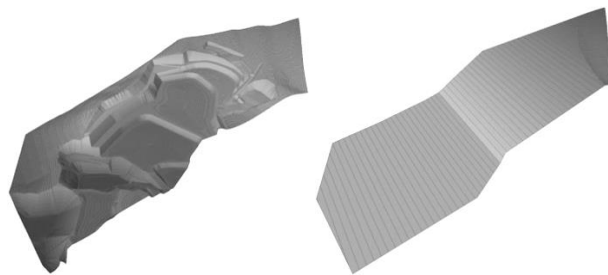
$$V = S_1 h_1 + S_2 h_2 + \dots + S_n h_n, \quad (8)$$

при S_n лице на отделен триъгълник (основа на призма) от съставните на повърхнината, h_n вертикално разстояние (височина на призма) между еднаквите триъгълници в повърхнините, се изчислява обема между две ограничителни повърхнини.

Примери на прилагане на МОП

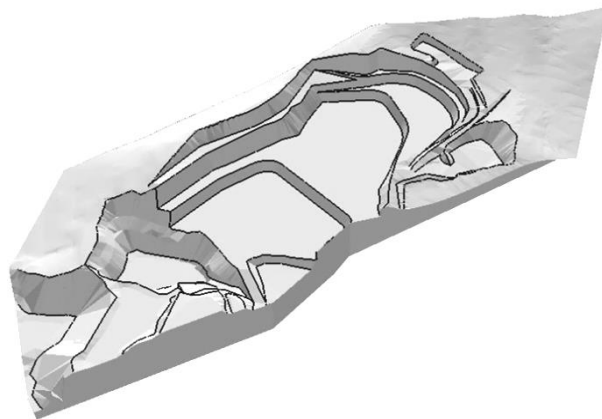
Пример 1. Изчисляване на запаси при стратифицирано полезно изкопаемо и разчленен релеф

На фигура 6 са изобразени две генерирани TIN-повърхнини: първата представяща топографската характеристика на терена (релефа) със съществуващите минни изработки, а втората е границата между отделните литоложки разновидности (показани до определена кота, което налага и промяната в наклона в конкретния пример – от наклонена до хоризонтална равнина при достигане до избраната кота).



Фиг. 6. Ограничителни TIN повърхнини: лява – генерирана по данни за топографията на проучваната площ, дясна – пластова повърхнина, представляваща долната граница на запасите

Между тези две повърхнини следва да бъде изчислен обема на тялото от полезно изкопаемо, формата на което е показана на фигура 7. Ако приемем, че наклонът на пластовете е сравнително постоянен и благоприятно ориентиран спрямо формата на проучваната площ, то изчисляването на запасите по метода на геоложките блокове би било сравнително лесно и достоверно, но комбинацията между наклонени пластовете и разчленен терен би довело до нуждата от генерализиране на данните за по-бързо пресмятане, а оттам и до занижаване на точността.

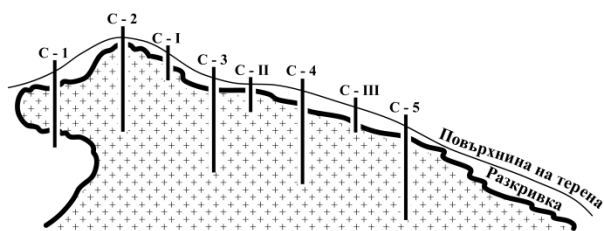


Фиг. 7. Тримерно тяло, ограничено от две TIN повърхнини

Пример 2. Изчисляване на запаси от интрузивни скали

При определянето на запаси от интрузивни скали, от основна важност е определянето на степента на изветряне на скалата, и отделяне на негодния изветрял слой. В такъв случай, проектираните сондажни изработки би следвало да имат две отделни цели. Целта на първия тип сондажи е да провери разпределението на суровината в дълбочина. В основния случай не би следвало да има литоложки изменения в дълбочина, ето защо не е необходимо да се проектира гъста сондажна мрежа (фиг. 8, сондажи С-1 до С-5). Поради своята изменчивост, за да се очертае границата на откривката (почвения слой и изветрялата скална маса) с по-голяма точност, е необходимо прокарването на допълнителни сондажи на малка дълбочина, целта на които е да достигнат здрава скала (фиг. 8, сондажи С-I до С-III).

Разликата в броя на сондажите, включени в изчисленията на долната граница на запасите и тези, показващи единствено дебелината на откривката, би направила невъзможно изчисляването на обемите по класическите методи (геоложки блокове и вертикални разрези), където се изчисляват средни дебелини по сондажите. Чрез метода на ограничителните повърхнини тези проблеми на практика не съществуват и колкото повече информация може да бъде включена във всяка отделна повърхнина, толкова по достоверен е крайният резултат.



Фиг. 8. Примерен разрез при проучване на интрузивни скали: сондажи С-1 до С-5 са зададени с цел проверка на литоложката разнородност в дълбочина и откривката, сондажи С-I до С-III определят само дебелината на откривката

Проверка на изчисленията по МОП

Основният недостатък на дискутирания метод е в невъзможността за бърза и лесна проверка на резултатите посредством ръчни изчисления. Това е така, поради големите обеми от данни, които обработва компютъра и практическата невъзможност за ръчно обработване на информация, включваща хиляди до десетки хиляди точки. Към момента вариантите за ръчна проверка не са напълно систематизирани, поради неограничения брой на геоложки обстановки на проучване. Все пак могат да се дадат няколко препоръки, касаещи основно разгледаните по-горе два примера.

Проверка на МОП – вариант 1

Като първи вариант за проверка може да се посочи модифицирано използване на разработения от Соболевский (1932) метод на изолиниите (в частност за изохипсите). За целта, цялата площ се разделя на мрежа от квадрати, размерът на които зависи от желаната точност при проверка на резултатите. В случаите, когато най-ниската кота на горната граница на тялото е по-

голяма от най-високата кота на долната граница, за опростени изчисления може тялото да бъде разделено на две, като по този начин то се описва с една крива повърхнина и една равнина за вертикални граници. Така по формулата

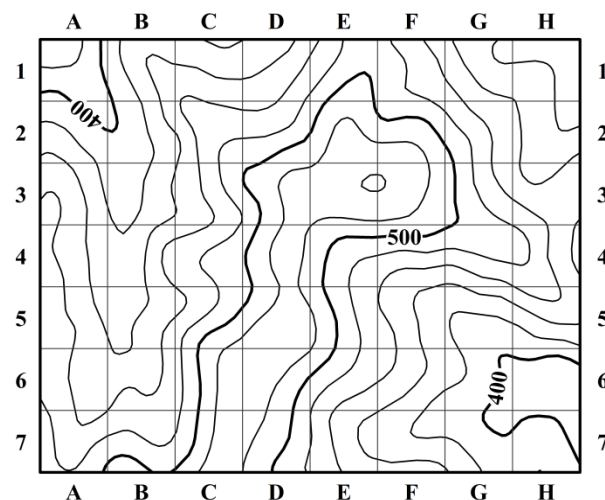
$$\Delta h = |H_f - H_e|, \quad (9)$$

където H_f е котата на равнината, а H_e е котата на центъра на всеки отделен квадрат, се намира превишението за всеки квадрат от площта.

От формулата:

$$V = (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n) S_e, \quad (10)$$

където $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$ са превишенията за отделните елементарни площи, а S_e е площта на отделния квадрат, се получава обемът на всеки един от двата отделни блока. В случаите, когато най-ниската кота на горната граница на блока е по-малка от най-високата кота на долната граница, между двете граници не може да се построи равнина, т.е. запасите трябва да бъдат изчислявани като един блок.



Фиг. 9. Модел за изчисление на запаси по метода на изолиниите. От котата на центъра на всеки един от квадратите се изчислява дебелината на полезното изкопаемо

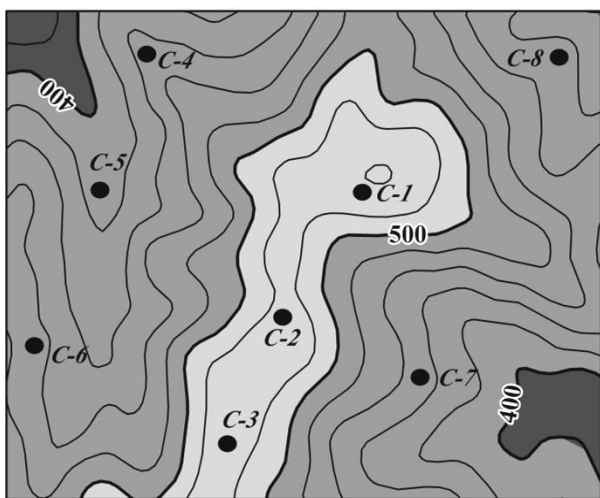
Използват се същите формули, но вече H_f не е константа, а се променя за всеки отделен квадрат. Точността при използването на модифицирания метод на изолиниите, използван тук за проверка на резултатите, може да се счита за приближаваща тази на метода на ограничителните повърхнини, изпълнени с помощта на софтуерни приложения, само ако площта и броят на квадратите от първия отговарят на тези от втория метод. Това естествено не може да се получи на практика, поради различните възможности за обработка на данни от човек и машина, но резултатите, получени от проверката, могат да разкрият съществени различия в изчислените обеми, породени основно от груби или случайни грешки и от грешки при въвеждането на данните в програмата.

Проверка на МОП – вариант 2

Втория вариант за проверка на изчисленията по МОП е подходящ най-вече за силно разчленен терен и особено

при проучване на обект със съществуващи кариерни гнезда. При изчисляването по метода на геоложките блокове, средната дебелина се изчислява като средно-аритметично от дълбочината на всички сондажи. Това обаче е некоректно, понеже не се взема предвид разпределението на сондажите. Ето защо, за проверка на метод работещ с голяма точност, какъвто е МОП, методът на геоложките блокове не може да бъде използван в класическия му вид, а трябва да се направят известни корекции на изчисленията.

Стъпките на работа при този метод на проверка се изразяват в следното: разделя се площта на характерни нива, според теренните коти (фиг. 10); изчислява се средната дълбочина на сондажите за всеки избран интервал; изчислява се площта, заемана от всеки интервал, а оттам и процентното съотношение между отделните площи. Тези отношения се използват, като тежести при изчисляване на общата средна дебелина.



Фиг. 10. Поделене на площта на проучване на характерни интервали според теренната кота

Изчисляването на крайния обем става по формулата:

$$V = Sh_t, \quad (11)$$

където S е проучваната площ, а h_t е средната дебелина от сондажите изчислена по формулата:

$$h_t = \frac{h_1 I_1 + h_2 I_2 + \dots + h_n I_n}{S}, \quad (12)$$

при h_n – средна дебелина за интервала и I_n – площ заемана от интервала.

Този метод за проверка, както и първият метод, не може да посочи изчислявания обем с точност, равна на точността на метода на ограничените повърхнини, но в сравнение с метода на геоложките блокове или метода на вертикалните разрези, може по-адекватно да се използва за проверка на изчисленията, за откриване на груби грешки, без нуждата от специални компютърни умения.

Литература

- Золотарев, А. С. 1936. *Подсчет запасов полезного ископаемого в блоке между сходящимися профилями*. ОНТИ.
- Прокофьев, А. П. 1953. *Практические методы подсчета запасов рудных месторождений*. М., Государственное издательство геологической литературы, 131 с.
- Соболевский, П. К. 1932. Современная горная геометрия. – *Социалистическая реконструкция и наука*, 7, 42-78.
- Фейган, Я. 1956. Графический способ определения объемов блоков между параллельными сечениями. – *Разведка и охрана недр*, 4.
- Христов, И. 1974. *Минна геометрия*. С., Техника, 383 с.
- Franklin, W. R. 1973. *Triangulated irregular network program*: <http://www.ecse.rpi.edu/wrf/wiki/Research/tin73.tgz>.