

**ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ
РАЗВЕДОЧНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ В СВЯЗИ С РАЗЛИЧНЫМИ
РАЗМЕРАМИ УЧАСТКОВ И АНИЗОТРОПНОСТЬЮ ТЕЛ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Л. М. ПЕТРОВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр минералогии, петрографии и геологии
и разведки месторождений полезных ископаемых)

В оригинальной монографической книге Б. С. Левоника¹ рассмотрен, наряду с другими, вопрос об определении оптимальных расстояний между разведочными выработками. Для этой цели предложена следующая формула определения относительной ошибки ε (в процентах):

$$\varepsilon = 0,1 K_1 \cdot N, \quad (1)$$

где 0,1—эмпирический коэффициент;

K_1 —коэффициент изменчивости, определяемый как отношение максимальной частоты вариационного ряда к средней его частоте и принимаемый в пределах от 0,1 до 5—10;

N —«число», обозначающее расстояние между разведочными выработками, м.

Решение конкретных задач по формуле (1) предлагается автором книги для ряда чисел N от 1 до 1000 (табл. 1).

Из таблицы видно, что, во-первых, определяемое на основе формулы (1) расстояние между разведочными выработками находится в простой пропорциональной зависимости от значений K_1 и ε ; в этом отношении формула (1) не отличается, например, от эмпирической формулы В. А. Прокина (1961). Действительный же характер этой зависимости, как известно, обычно оказывается более сложным и установление его остается первостепенной задачей. Во-вторых, совершенно нереальными, при сравнении с соответствующими ошибками, оказываются

¹ Вопросы экономической геологии. АН СССР, 1963.

Оптимальные линейные расстояния между разведочными выработками при заданной точности разведки (ошибки ϵ)

ϵ , %	Объекты разведки месторождений		
	редких и благородных металлов ($K_1=5$)	цветных и черных металлов ($K_1=1$)	угольных и газо-нефтяных ($K_1=0,1$)
0,01			1
0,05			5
0,1		1	10
0,5	1	5	50
1	2	10	100
5	10	50	500
10	20	100	1000
50	100	500	
100	200	1000	

расчетные расстояния для простой группы месторождений (угольных и газо-нефтяных). Последнее связано как с неудачно выбранной шкалой изменчивости, так и с непонятно какой принятой для нее относительной размерностью, если учесть, что согласно своему определению коэффициент K_1 в абсолютном значении всегда должен быть больше 1 (как и показатель НП по В. В. Богацкому (1963)) и если попытаться сравнить выбранную шкалу его, например, с известной шкалой изменчивости по коэффициенту вариации v .

Основным недостатком формулы (1), как и всех известных аналогичных ей формул, является то, что она не учитывает зависимость расстояния между разведочными выработками от размера объектов разведки. Последние же не только могут быть мелкими, средними или крупными в пределах каждой данной группы месторождений, но и по-разному варьируют внутри каждой из этих категорий объектов для разных групп месторождений. На важность учета этого фактора при выборе оптимальной плотности разведочной сети настоятельно указывалось на специальной сессии по разработке основных мероприятий по повышению достоверности результатов геологоразведочных работ (Коган, 1965).

В связи с последним более предпочтительными оказываются методики, определяющие необходимое и достаточное равномерное число пересечений на основе теории вероятностей и математической статистики, исходя из которого для объекта с данной абсолютной площадью находится расстояние между ними (Смирнов, 1957; Богацкий, 1963). В этом случае остается только найти способ корректировки такого числа пересечений в соответствии с дифференциацией участков по их относительным размерам.

Выражением одной из таких методик могла бы явиться другая формула из книги Б. С. Левоника, называемая основной формулой относительной ошибки:

$$\epsilon = \pm \frac{100K_1}{N \cdot K_2} \sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]}, \quad (2)$$

где N —«генеральная» совокупность или количество всех геологоразведочных выработок;

K_1 — то же, что и в формуле (1);

- K_2 — коэффициент разведанности, выражающий плотность разведочной сети и принимаемый для категории A , равным 1, для категории B — от $1/2$ до $1/4$ и для категории C_1 — от $1/5$ до $1/10$;
- N_h — топологическая выборка или количество выработок, определяющих собой разведанные запасы какой-либо категории — A , B и C_1 ;
- n_h — случайная выборка или количество разведочных выработок данной категории запасов, взятых на выборку, с целью сокращения процесса изучения генеральной совокупности N ; n_h может изменяться от 1 до N_h ;
- P_h — вероятность, соответствующая каждой группе случайной выборки; $P_h = n_h/N_h$;
- q_h — невероятность, соответствующая каждой группе случайной выборке; $q_h = 1 - P_h$.

Подчеркнем, что по формуле (2) определяется относительная ошибка для каждой данной категории запасов, что подтверждается, в частности, корректировкой значения N с помощью коэффициента K_2 . Однако здесь необходимо сделать два замечания. Во-первых, неправильно использован в формуле (2) показатель K_2 (особенно применительно к категории A , для которой $K_2=1$). Во-вторых, определяемое таким образом число выработок для каждой категории N_{A,B,C_1} предполагает распространение его, а значит и ошибки ε_{A,B,C_1} на участок одного и того же размера (на всю площадь участка). В практике же детальной разведки на разных по сложности участках месторождений имеют место различные соотношения категорий запасов (площадей их распространения), которые можно выразить через показатель соотношения R_{A,B,C_1} , характеризующий долю каждой категории запасов в пределах от 0 до 1. С учетом этих замечаний формула (2) должна иметь следующий вид:

$$\varepsilon_{A,B,C_1} = \pm \frac{100K_1(K_2^A \cdot R_A + K_2^B \cdot R_B + K_2^{C_1} \cdot R_{C_1})}{N \cdot K_2^{A,B,C_1} \cdot R_{A,B,C_1}} \sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]}$$

или $\varepsilon_{A,B,C_1} = \pm \frac{100K_1}{N_{A,B,C_1}} \sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]}$, (2')

где $N_A : N_B : N_{C_1} = K_2^A \cdot R_A : K_2^B \cdot R_B : K_2^{C_1} \cdot R_{C_1} = 1/\varepsilon_A : 1/\varepsilon_B : 1/\varepsilon_{C_1}$.

Входящее в формулы (2) и (2') выражение $\sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]}$ характеризует собой вероятность точности определения относительной ошибки. Решив относительно его формулу (2'), получим, что

$$\sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]} = \frac{\varepsilon_{A,B,C_1} \cdot N_{A,B,C_1}}{100K_1}. \quad (3)$$

Так как на нормально разведанных месторождениях (участках)

$$N_A : N_B : N_{C_1} = 1/\varepsilon_A : 1/\varepsilon_B : 1/\varepsilon_{C_1} = K_2^A \cdot R_A : K_2^B \cdot R_B : K_2^{C_1} \cdot R_{C_1},$$

то для данных N и K_1 правая часть уравнения (3) будет оставаться постоянной при любых соотношениях между ε_{A,B,C_1} и N_{A,B,C_1} ; в аналогичных производных уравнениях других формул (Смирнов, 1957; Богацкий, 1963) эта часть отвечает по своему содержанию коэффициенту вероятности t .

Расчеты показывают, что из всех возможных значений выражения $\sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]}$ практического внимания заслуживают значения его, начиная от 2 до 3 и выше, что обеспечивает, как известно, на 95—99,7% вероятности и выше правильную оценку заданной величины

относительных ошибок. Для целей достаточно достоверной разведки месторождений, разведываемых буровыми и горно-буровыми системами, величину в 99,7% практически можно принять за 100% вероятности, что позволяет взять за постоянное значение выражения

$\sqrt{\Sigma[(N_h - n_h)P_h \cdot q_h]}$ или коэффициента t цифру 3.

С учетом последнего, определение вероятностной выборки числа пересечений (выработок) в детальную разведку месторождений, разведываемых буровыми горно-буровыми системами, должно производиться по следующей формуле:

$$N = \frac{300K(K_A \cdot R_A + K_B \cdot R_B + K_{C_1} \cdot R_{C_1})}{\varepsilon_{A,B,C_1} \cdot K_{A,B,C_1} \cdot R_{A,B,C_1}} \quad \text{или} \quad N_{A,B,C_1} = \frac{300K}{\varepsilon_{A,B,C_1}}, \quad (4)$$

где N — число всех единичных разведочных блоков на участке,
 $N = N_A + N_B + N_{C_1}$;

ε_{A,B,C_1} — допустимая относительная ошибка определения среднего значения параметров;

K_{A,B,C_1} — то же, что и K_2 в формуле (2), причем K_B и K_{C_1} могут принимать значения от $1/2$ до $1/16$ и меньше при $K_B > K_{C_1}$;

K — показатель изменчивости наименее устойчивого параметра для ряда месторождений, разведываемого буровыми и горно-буровыми системами.

Нам представляется, что на современном этапе изучения для количественной оценки изменчивости параметров на рассматриваемых месторождениях следует использовать либо показатель НП (Богацкий, 1963), либо коэффициент вариации v (Смирнов, 1957; Петров, 1963). В первом случае ряд изменчивости параметра на этих месторождениях может быть представлен, по-видимому, устойчиво-максимальными значениями НП в пределах от 1 до 4—5, во втором — от 0 до 100%. Так как формула (4) соответствует К-НП, то для использования в ней коэффициента v необходимо найти функцию $F(v) = НП \cdot K$ при условии соответствия шкалы значений v шкале значений НП. С этой целью примем за условный эталон наименьшей изменчивости по шкале коэффициента v величину в 10%. Тогда искомую функцию можно выразить с помощью следующей формулы:

$$K = \left[2 \cdot \lg(10 + v) - \lg\left(\frac{100 - v}{10}\right) \right], \quad (5)$$

где \lg — десятичный логарифм.

При колебании v от 1 (практически от 10%) до 100% значение K по формуле (5) будет изменяться в пределах от 1,0 до 4,2.

Формула (4) определяет необходимое и достаточное число равномерно распределенных элементарных (единичных) разведочных блоков, а не число разведочных выработок, которое может быть равно или больше числа элементарных блоков в зависимости от того, опирается ли блок на одну центральную выработку (по принципу ближайшего района) или он ограничен четырьмя выработками (узловые сетки).

Выбор одной из этих сеток единичных разведочных блоков для аналитического расчета числа выработок, при прочих равных условиях, зависит от детальности разведки. При оценке запасов по категории C_1 , контур которой проводится на основе близкой или далекой экстраполяции, расчет числа выработок C_1 должен базироваться на сетках, построенных по принципу ближайшего района ($C_{c1} = N_{c1}$). При оценке запасов по категориям А и В, контур блоков которых обычно проводится по выработкам, расчет числа их $C_{A,B}$ должен базироваться на узловых сетках и производиться по формулам:

Таблица 2

Оптимальные расчетные расстояния между скважинами в м на разных по сложности и размерам каменноугольных участках

Категории запасов (с, %)	Участки простого строения ($R_A=0,3$; $R_B=0,3$; $R_{C_I}=0,4$) Показатель дислоцированности 1		Участки очень сложного строения ($R_B=0,4$; $R_{C_I}=0,6$) Показатель дислоцированности 3										
	Степень выдержанности пластов (при мощности пластов или зольности угля)												
	выдержанные ($K=НП=1,5$)	относительно выдержанные ($K=НП=2,3$)	невыдержанные ($K=НП=4$)	относительно выдержанные ($K=НП=2,3$)	невыдержанные ($K=НП=4$)								
	4	12	24	4	12	24	4	12	24	4	12		
A (10)	100×300	160×500	200×600	95×200	130×400	155×500	75×150	100×300	155×500	100×300	100×300		
B (20)	100×600	160×1000	200×1200	95×400	130×800	155×1000	75×300	100×600	155×1000	100×600	85×400		
C ₁ (40)	130×1200	220×2000	265×2400	125×800	175×1600	205×2000	100×600	135×1200	205×2000	65×500	115×800	50×400	90×600

Размеры участков, км²

Примечание. На участках очень сложного строения, показатель дислоцированности которых, например, в 3 раза больше показателя дислоцированности на участках простого строения, плотность разведочной сети скважин увеличивается соответственно этому соотношению.

для квадратной формы площади распространения запасов каждой из категорий А и В

$$C_{A+B} = (\sqrt{N_{A+B}} + 1)^2;$$

для прямоугольной формы этой площади при соотношении сторон 1:2

$$C_{A+B} = \left(\sqrt{\frac{N_{A+B}}{2}} + 1 \right) \left(2\sqrt{\frac{N_{A+B}}{2}} + 1 \right) \text{ и т. д.} \quad (6)$$

Исследование узловых сеток элементарных разведочных блоков показало, что число выработок и элементов интерполирования, образуемых каждой парой соседних выработок, изменяется в определенной диспропорциональной зависимости от абсолютного числа блоков, которая отражает закономерное увеличение или уменьшение удельного числа выработок и элементов интерполирования при соответствующем уменьшении или росте числа блоков (Петровский, 1965). Так как изменение абсолютного числа элементарных разведочных блоков выражает соответствующее пропорциональное изменение относительных размеров объектов разведки, то отмеченную выше естественную диспропорциональную зависимость можно положить в основу определения оптимального числа единичных разведочных блоков и выработок в связи с различными относительными размерами участков.

Примем, что определяемое по формуле (4) вероятностное число единичных разведочных блоков N отвечает оптимальным требованиям разведки средних по размерам участков с некоторой постоянной для данного ряда месторождений площадью $S_{\text{ср}}$. Тогда расчетное число блоков $N_{\text{уч}}$ для конкретного участка разведки с площадью $S_{\text{уч}}$ необходимо было бы корректировать на отношение $S_{\text{уч}}/S_{\text{ср}}$. В этом случае расчетное расстояние между разведочными выработками, при прочих равных условиях, оставалось бы постоянным для участков с любой площадью в некотором ряду их от $S_{\text{уч}}^{\text{min}}$ до $S_{\text{уч}}^{\text{max}}$, подобно тому, как это имеет место, например, в табл. 1, а также в практике работы геологов-разведчиков, стремящихся сохранить постоянным расстояние между разведочными выработками на основе так называемого принципа аналогии без учета размера участков (Коган, 1965).

Другая более многочисленная группа исследователей считает первостепенной необходимостью сохранение постоянным числа пересечений (выработок), соответствующего необходимой и достаточной выборке (Смирнов, 1957; Богацкий, 1963; Петров, 1963). В этом случае расстояние между разведочными выработками на конкретных участках не будет оставаться постоянным, но всецело будет определяться только абсолютными размерами участков.

Действительный характер изменения плотности разведочной сети на разных по размерам участках, как известно, должен сопровождаться соответствующим изменением как числа элементарных блоков или выработок $N_{\text{уч}}$, так и расстояния между ними l (Петровский, 1965). Принципиальная схема, отражающая существо точек зрения рассмотренных выше известных двух групп аналитических методов и предлагаемого оптимального варианта расчета плотности разведочной сети, показана на рис. 1. Из последнего видно, что оптимизация основных параметров плотности разведочной сети достигается путем использования отмеченной выше естественной или логически произвольной диспропорциональной зависимости значений этих параметров от размеров участков. На схеме принято, что при расчете плотности разведочной сети на крупных участках следует исходить из условий распространения на интервал приращений площади $S_{\text{уч}}/S_{\text{ср}}$ в пределах от 1 до 2-й или от 2 до 3-й ста-

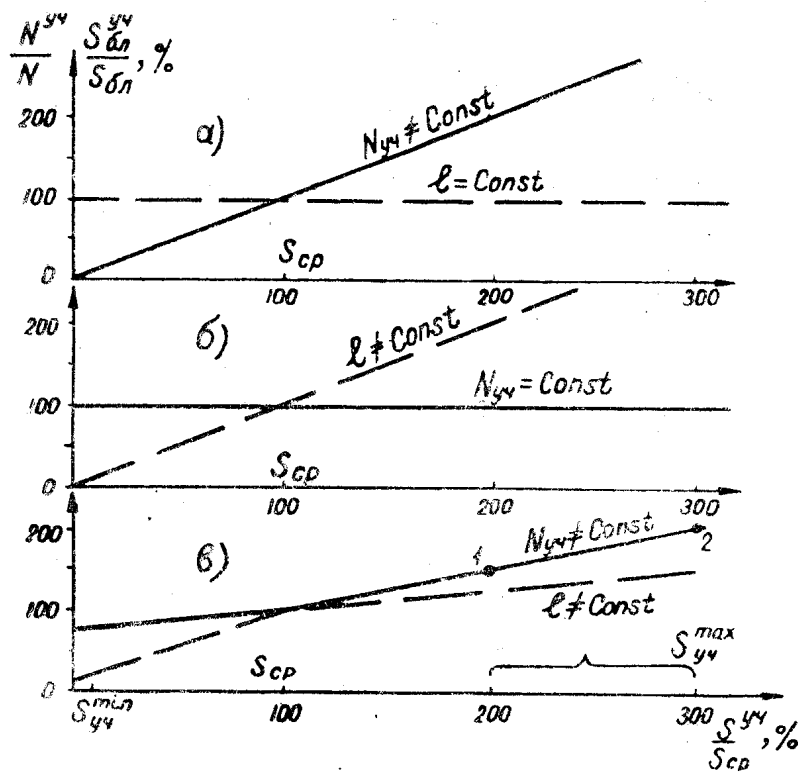


Рис. 1. Принципиальная схема зависимости расчетных параметров разведочной сети от размеров участков по аналитическим методам Прокина В. А. и Левоника Б. С. (а), Смирнова В. И. и Богацкого В. В. (б) и предлагаемому оптимальному варианту (в)

статистической выборки единичных разведочных блоков объемом соответственно в $1,5 N$ (точка 1) или $2 N$ (точка 2).

На мелких участках, исходя прежде всего из экономических соображений, предлагается принимать для таких расчетов статистическую выборку элементарных блоков в пределах от N до $3/4 N$. Конкретизируем теперь условия применения оптимального варианта определения плотности разведочной сети для разных групп месторождений с целью выработки математической формы корректировочного коэффициента α , представляющего собой функцию $(S_{уч}/S_{ср})$.

Для характеристики средних размеров участков выше была принята некоторая постоянная для каждой группы месторождений площадь $S_{ср}$, которую фактически следует рассматривать за верхний предел $S_{ср}^{верх}$ некоторого ряда средних размеров участков с интервалом площадей от $S_{ср}^{нижн.}$ до $S_{ср}^{верх}$. Тогда для любого ряда участков, $S_{уч}^{max}$ которого будет находиться в пределах от $2S_{ср}^{верх}$ до $3S_{ср}^{верх}$, графическое поведение функции $N_{уч} = f \cdot N$ на отдельных участках ряда должно носить следующий общий характер (рис. 2, а). Изменение величины коэффициента f на каждом данном отрезке этой кривой, с постоянным углом наклона его к оси абсцисс, зависит от конкретного положения $S_{уч}$ на интервалах ряда от $S_{ср}^{верх}$ до $S_{уч}^{max}$ и от $S_{уч}^{min}$ до $S_{ср}^{нижн.}$ и описывается следующими соответствующими выражениями:

$$f_{max} = \left(1 + \frac{S_{уч} - S_{ср}^{верх}}{S_{уч}^{max} - S_{ср}^{верх}} \right) \quad \text{и} \quad (7)$$

$$f_{min} = \left[1 - \left(\frac{S_{ср}^{нижн.} - S_{уч}}{S_{ср}^{нижн.} - S_{уч}^{min}} \right) 0,25 \right]. \quad (8)$$

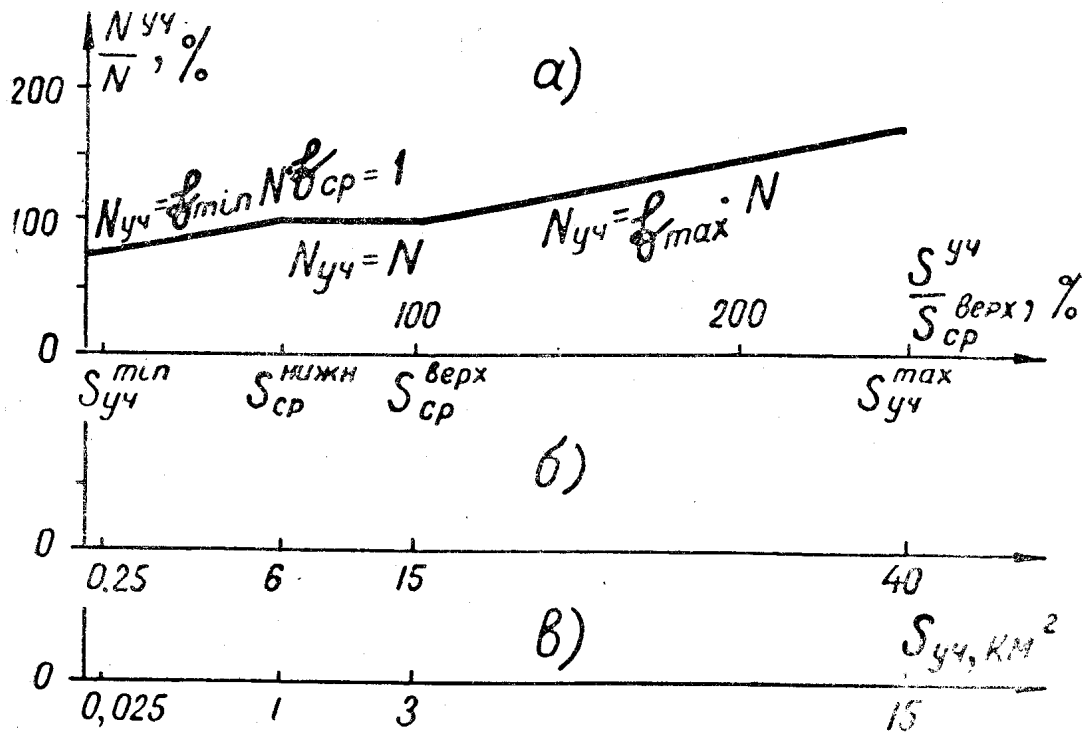


Рис. 2. Характер поведения общей оптимальной кривой функции $N_{уч} = f: N$ (а) с примерными частными шкалами изменения площадей мелких, средних и крупных участков для пластовых рудных (в) и каменноугольных (б) месторождений

Применительно к ряду площади участков каждой данной группы месторождений f_{\max} и f_{\min} могут изменяться в зависимости от конкретных значений $S_{ср}^{\text{верх}}$, $S_{ср}^{\text{нижн}}$, $S_{уч}^{\max}$ и $S_{уч}^{\min}$, а также их соотношений (в этом направлении еще необходимы широкие исследования). Для многопластовых каменноугольных месторождений и рудных месторождений первых двух групп (Смирнов, 1957), например, такие ряды могут быть представлены в следующем виде (рис. 2, б, в).

Таким образом, определяемое на основе всех аналитических методов число единичных разведочных блоков должно корректироваться с учетом относительных размеров участков путем умножения его на дифференцированный показатель f . Тогда и рекомендуемая для этой цели формула (4) получит следующий окончательный вид:

$$N_{A,B,C,T}^{уч} = \frac{300K}{\varepsilon_{A,B,C,T}} f. \quad (9)$$

Для определения оптимальных расстояний между разведочными выработками сначала необходимо рассчитать оптимальные размеры единичных разведочных блоков $S_{A,B,C}^{\text{бл}}$ по формуле

$$S_{A,B,C}^{\text{бл}} = \frac{R_{A,B,C} \cdot S_{уч}}{N_{A,B,C}^{уч}}, \quad (10)$$

а затем — размеры короткой ($b_{A,B,C,T}$) и длинной ($l_{A,B,C}$) сторон их с учетом степени анизотропии параметров и свойств тел полезных ископаемых для данного участка детальной разведки. Последнее очень важное требование можно выполнить на основе разложения величины $S_{A,B,C}^{\text{бл}}$ на сомножители $b_{A,B,C}$ и $l_{A,B,C}$ при условии соблюдения следующего соотношения:

$$K_{\text{пл}} \cdot K_{\text{прост}} = n : m = B_{A,B,C_1} / b_{A,B,C} : Z_{A,B,C} / l_{A,B,C}, \quad (11)$$

где $K_{\text{пл}}$ и $K_{\text{прост}}$ — показатели изменчивости наименее устойчивого параметра тела полезного ископаемого соответственно по падению и простиранию (Петров, 1963);
 n и m — число пересечений или элементов интерполирования соответственно в направлении падения и простирания тела;

B_{A,B,C_1} и $Z_{A,B,C}$ — размеры тела по его ширине (падению) и длине в контуре каждой категории запасов.

Так как величины $b_{A,B,C}$ и $l_{A,B,C}$ определяются соответственно выражениями $S_{A,B,C_1}^{\text{бл}} / l_{A,B,C_1}$ и $S_{A,B,C_1}^{\text{бл}} / b_{A,B,C}$, то после произвольной подстановки их в уравнение (11) задача практически сводится к определению одной из сторон элементарного блока по следующим формулам:

$$b_{A,B,C_1} = \sqrt{\frac{K_{\text{прост}} \cdot S_{A,B,C_1}^{\text{бл}} \cdot B_{A,B,C_1}}{K_{\text{пл}} \cdot Z_{A,B,C_1}}}, \quad l_{A,B,C_1} = \sqrt{\frac{K_{\text{пл}} \cdot S_{A,B,C_1}^{\text{бл}} \cdot Z_{A,B,C_1}}{K_{\text{прост}} \cdot B_{A,B,C_1}}}. \quad (12)$$

Очевидно, что на основе формул (12) можно было бы получить, после подстановки в них выражений (10) и (9), обобщенные формулы для прямого расчета оптимальных расстояний между скважинами. Однако до установления действительной математической формы связи между входящими в формулу (4) показателем изменчивости K , ошибкой Σ и числом элементарных блоков N это оказалось бы преждевременным, а также вышло бы за границы настоящего сообщения.

В качестве примера в табл. 2 приведен расчет оптимальной плотности сети скважин применительно к простым и очень сложным каменноугольным участкам; за прототип изменчивости пластов угля на простых участках принято Черногорское месторождение, показатели изменчивости НП пластов угля по которому заимствованы из работы В. В. Богацкого (1963).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Богацкий. Математический анализ разведочной сети. Госгеолтехиздат, 1963.
2. И. Д. Коган. Влияние геологических и других факторов на достоверность подсчитываемых запасов полезных ископаемых. Материалы совещаний и семинаров. Сессия экспертно-геол. совета, Госгеолком СССР, М., 1963.
3. А. А. Петров. Применение математической статистики для решения основных вопросов разведки месторождений. «Сов. геол.», 1963, № 9.
4. Л. М. Петровский. Об определении рациональной плотности разведочной сети на угльных месторождениях. Изв. вуз. «Геология и разведка», 1965, № 10.
5. В. А. Прокин. Выбор рациональной методики разведки Сибавевского месторождения. Сб. материалов по геологии цветных, редких и благородных металлов. Центр научн.-исследоват. горноразвед. ин-т, вып. 5, М., 1961.
6. В. И. Смирнов. Геологические основы поисков и разведки рудных месторождений. Изд. МГУ, 1957.