ВЕСТНИК СВНЦ ДВО РАН, 2011, № 1, с. 2–9

ГЕОЛОГИЯ

УДК 553.41:550:8:519.21

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОТБОРЕ И ОБРАБОТКЕ ПРОБ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С КРУПНЫМ ЗОЛОТОМ

А. Н. Петров[1], В. К. Прейс[2]

[1]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан
[2]Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
E-mail: regtecton@neisri.ru

Рассматривается вероятностная модель распределения крупного золота в месторождениях жильного типа. Оцениваются вероятности попадания частиц в пробы разного объема. Делаются выводы о необходимости предварительного гравитационного обогащения результатов дробления +1 мм. Доказывается, что при наличии частиц золота крупнее 1 мм появление в отдельных стандартных пробах ураганных содержаний неизбежно. Предлагается оценивать содержания не по отдельным пробам стандартного размера, а по большеобъемным пробам или серии проб. Приводятся результаты вычислений, определяющих минимальное и максимальное количество частиц разной крупности, которое с заданной вероятностью может быть обнаружено в пробах разного объема при разных содержаниях.

***Ключевые слова*: борозда (для опробования), керн, бороздовая проба, проба, золото, крупное золото, руда, жильный тип.**

Поиски и разведка любых рудных месторождений базируются на опробовании разведочных сечений. Способы отбора и анализа проб обусловливают достоверность и надежность геологического прогноза, а сами работы требуют высоких затрат и определенного риска, который целиком ложится на плечи недропользователей: значительные затраты могут не окупиться при эксплуатации, а излишняя экономия средств способна привести к отрицательной оценке перспективных объектов. В настоящее время проблема усложняется расширением сферы поиска за счет труднодоступных объектов (географическая отдаленность, отсутствие транспортной инфраструктуры, плохая обнаженность, глубокое залегание и т. д.).

Золоторудные месторождения относятся к числу и наиболее сложных по методике исследований, и наиболее затратных по финансовым вложениям. Особые трудности возникают при изучении жильных месторождений, значительную часть запасов которых составляет самородное золото крупных фракций. Так, например, на месторождении Федоровское (Кузнецкий Алатау) золото класса +3 мм составляет 64% запасов (Конышев, 2007). Сходная ситуация наблюдается на месторождении Каральвеем (Восточная Чукотка), где доля частиц +5 мм составляет почти половину запасов (Леля А. Д. и др., 1986 г.). Неоднократно отмечалась парадоксальная ситуация, когда в отдельных образцах и пробах визуально наблюдаются крупные частицы золота, а пробирные анализы дают низкое содержание. Этот парадокс должен иметь объяснение, а способы опробования и анализа его результатов должны учитывать это обстоятельство.

В настоящее время способы опробования на разных стадиях поисковых и геологоразведочных работ (ГРР) регламентированы инструкциями, которые, как правило, базируются на эмпирической основе и слабо обоснованы теоретически. Применение математических методов для выбора оптимальных способов опробования должно в значительной степени повысить качество ГРР и одновременно снизить затраты на их проведение. Описанные в литературе (Рыжков, Гудков, 1966; Кувшинов и др., 1992) методы строгого анализа геологических данных базируются на математической статистике, основной задачей которой является получение научно обоснованных выводов о массовых явлениях и процессах по данным экспериментов или наблюдений, представляя эти выводы в виде утверждений об общих вероятностных характеристиках. На практике применение статистического анализа сводится к обработке и сравнительному анализу результатов опробования, полученных в результате поисков, разведки и эксплуатации месторождений, т. е. в процессе и после проведения работ. Способы отбора и анализа проб, оправдавшие себя на изученных объектах, переносятся на новые объекты со сходным геологическим строением. Между тем одинаковых месторождений в природе не существует, поэтому выводы, полученные на основе статистической обработки эмпирического материала, могут не в полной мере подходить для сходного, но не идентичного объекта. Иными словами, указанные методы предполагают выполнение достаточно трудоемких и затратных работ, но не всегда гарантируют успех.

Появление персональных ЭВМ, общедоступных и в то же время обладающих высокими вычислительными ресурсами, открывает новое направление исследований – численный эксперимент, позволяющий создавать и анализировать математические модели различных типов месторождений и на их основе судить об оптимальных способах опробования еще до начала работ. В частности, при планировании и ведении поисковых и геологоразведочных работ на месторождениях, где крупные частицы золота могут составлять или составляют значительную часть общего запаса, немаловажное значение имеет оценка вероятности получения (или неполучения) достоверных данных при разных содержаниях, фракциях крупности, способах отбора и анализа проб и т. д. Иными словами, следует получить ответы на следующие вопросы:

какова вероятность получения объективной информации по результатам отбора и анализа проб заданного объема при том или ином относительном содержании в изучаемом рудном теле;

в какой мере гранулометрический состав полезного компонента влияет на вероятность получения представительной пробы;

какие объемы проб гарантируют или по крайней мере обеспечивают высокую вероятность получения надежных данных;

в какой мере результаты опробования обеспечивают приемлемую оценку истинных содержаний и запасов месторождения.

Создание математической модели предполагает, в первую очередь, точную формулировку задачи, ради которой она создается. Для этого необходимо найти для геологических понятий математические аналоги. Моделируя золоторудное месторождения жильного типа, следует уточнить такие понятия, как «месторождение», «рудное тело», «запас металла», «содержание (концентрация)», «проба» и т. д. При создании математической модели указанные понятия могут не полностью совпадать с общепринятыми определениями в практической геологии.

Месторождение представляется как совокупность рудных тел. Рудное тело целесообразно рассматривать как часть геологического пространства, ограниченную замкнутой поверхностью Ω, занимающую объем $V_т$. Рудное тело содержит частицы полезного компонента различной формы и крупности d. Запас металла в золоторудном теле представляет собой общую массу $M_з$ содержащихся в нем частиц золота. Месторождение является промышленным, если при данных экономических и горно-геологических условиях общая масса золота, извлеченного из всех рудных тел, не меньше заданной величины $M_к$, а относительное содержание в каждом рудном теле не меньше заданной величины (кондиции) $C_к$.

Содержание C представляет собой количественную характеристику, равную массе золота в единице массы руды. При этом среднее содержание по месторождению (рудному телу) $C_{ср}$ представляет собой отношение запаса металла в теле к его массе. Истинное значение этой характеристики может быть установлено только после завершения эксплуатации месторождения. В процессе геологоразведочных работ предварительная оценка осуществляется по результатам отбора и анализа проб. Проба представляет собой объем породы, взятый в пределах изучаемого объекта, который предположительно находится в пределах рудного тела. Значимая проба содержит хотя бы одну частицу золота. Содержание металла в пробе $C_п$ представляет собой отношение общей массы всех извлекаемых золотин к массе пробы. Оптимальная проба представляется как наименьший объем породы, обеспечивающий, с одной стороны, высокую вероятность получения значимых содержаний в самой пробе, а с другой – позволяющий судить о среднем содержании металла в рудном теле.

Крупность золотины рассматривается как ее наибольший размер d. Коэффициент формы золотины крупностью d представляет собой отношение ее объема $v_з$ к кубу со стороной d:

$$\varphi = v_з / d^3.$$

Все частицы золота по крупности можно разделить на фракции – интервалы $d_i \pm \Delta_i$. При достаточно малом значении Δ_i можно принять, что общее количество частиц i-й фракции K_i представляет собой сумму частиц с размером Δ_i. Частицы каждой фракции различаются и коэффициентами формы, поэтому массы частиц из одной фракции могут существенно различаться. Предполагается, что частицы золота распределяются случайным образом, причем обнаружение одной частицы не влияет на вероятность обнаружения другой, т. е. является независимым событием. Строго говоря, для учета вклада частиц определенной крупности в общий запас рудного тела необходимо по каждой фракции учитывать и классы коэффициентов формы. Однако модель, учитывающая одновременно всевозможные варианты распределения частиц золота разной крупности, коэффициентов формы и содержаний была бы чересчур громоздкой, сложной для вычислений и трудна для наглядной геологической интерпретации. Мы ограничимся анализом упрощенной модели, описывающей случайное распределение частиц одной крупности d, с постоянным коэффициентом формы φ. В рамках данной модели рудное тело представляется в виде совокупности ячеек равного объема d^3. При этом общее количество ячеек равно N, из которых n содержат частицы золота. Тогда вероятность *p* того, что произвольная ячейка содержит частицу металла, определяется простым соотношением:

$$p = n/N. \quad (1)$$

Объем рудного тела V будет равен:

$$V = Nd^3, \quad (2)$$

общий объем v содержащегося в нем золота, с учетом коэффициента формы φ, составит:

$$v = n\varphi d^3, \quad (3)$$

а произвольный объем породы V_p, взятый предположительно в пределах рудного тела, представляется как совокупность ячеек:

$$V_p = kd^3. \quad (4)$$

Масса каждой частицы (в граммах) $m_{d\varphi}$ определяется отношением

$$m_{d\varphi} = 10^{-3}\rho_з d^3\varphi, \quad (5)$$

где φ – коэффициент формы; $\rho_з$ – плотность золота; d – крупность, мм. Масса $M_{d\varphi}$ всего золота в рудном теле (в граммах) будет:

$$M_{d\varphi} = nm_{d\varphi} = n10^{-3}\rho_з d^3\varphi. \quad (6)$$

Масса $M_т$ всего тела (в тоннах) при средней плотности вмещающих пород $\rho_п$ практически равна

$$M_т = 10^{-9}N\rho_п d^3. \quad (7)$$

Тогда среднее содержание в рудном теле (в граммах на 1 т) C будет определяться через вероятность

$$C = p10^6\varphi\rho_з/\rho_п. \quad (8)$$

Вероятность *p* через содержание C с учетом коэффициента формы φ определяется соотношением

$$p = \rho_п\ 10^{-6}\ /C\varphi\rho_з. \quad (9)$$

Иными словами, содержание C можно представить как вероятность *p* обнаружить ячейку, содержащую частицу золота. Тогда вероятность обнаружения ячейки, не содержащей металла, будет:

$$q = 1 - p = 1 - \ \rho_п\ 10^{-6}/C\varphi\rho_з. \quad (10)$$

Вероятности *p* и *q* – независимые события. Поэтому вероятность Q, того, что k ячеек одновременно не содержат ни одной частицы металла, определяется соотношением

$$Q = q^k, \quad (11)$$

а вероятность P, того, что в заданный объем попадает хотя бы одна частица золота – соотношением

$$P = 1 - Q. \quad (12)$$

Рассматривая пробу объемом V_p (в кубических метрах) как совокупность k ячеек, где

$$k = V_p 10^9\ /d^3, \quad (13)$$

используя формулы (9) – (11), можно вычислить вероятность того, что проба объема V_p при крупности d, коэффициенте формы и среднем содержании рудном в теле G содержит не менее одной частицы металла. В пробе объемом V_p минимальное содержание (всего одна частица) будет:

$$G_p = m_{d\varphi}\ /\ \rho_п V_p = 10^{-3}d^3\varphi\rho_з\ /\ \rho_п V_p, \quad (14)$$

где $m_{d\varphi}$ – масса частицы золота крупностью d, с коэффициентом формы φ и плотностью $\rho_з$ (≈ 16 г/см^3); $\rho_п$ – плотность вмещающих пород (≈ 2,6 г/см^3).

На основе соотношений (11) – (14) разработаны вычислительные алгоритмы, реализованные в программах на языке C++, позволяющие провести серию численных экспериментов, суть которых состоит в определении вероятности получения положительной пробы при различных значениях среднего содержания, крупности и коэффициента формы.

Используя данную модель, попробуем с точки зрения теории вероятности объяснить отмеченный выше парадокс: почему видимое в образцах золото зачастую не улавливается пробирным анализом. Сравним вероятности попадания частицы золота с крупностью d в навеску массой 50 г (около 20 см^3) и в пластинку размерами 20×20 см (примерная площадь поверхности образца) толщиной, равной диаметру золотины при разных крупностях и средних содержаниях (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что для золотин с крупностью более 0,3 мм вероятность попадания хотя бы одной частицы в навеску для пробирного анализа достаточно низка даже при высоких содержаниях и резко убывает с увеличением крупности. Вероятность увидеть частицу золота на поверхности образца также низка, однако при крупности от 0,5 мм и выше в несколько раз превышает вероятность попадания в навеску. Иными словами, даже с точки зрения теории вероятности шанс увидеть достаточно крупную частицу золота значительно выше, чем «поймать» ее при пробирном анализе. Примечательно, что превышение вероятности обнаружения частицы визуально над вероятностью ее попадания в навеску мало зависит от содержания. Так, например, при крупности частицы 2,5 мм вероятность ее визуального обнаружения будет в 5 раз выше, чем вероятность попадания в навеску, а при крупности 5 мм – в 10 раз.

Таблица 1. **Вероятность P_1 попадания не менее одной частицы металла крупностью K_p в навеску для пробирного анализа и вероятность P_2 ее визуального обнаружения на поверхности образца; P_1/P_2 – отношение вероятностей**

Table 1. **The P_1 probability for presence of a not less than one gold particle of K_p size in the fire assay sample and the P_2 probability for its being observed over the sample surface; P_1/P_2 is the probability relationship**

K_p	Содержание, г/т								
	1			15			50		
	P_1, %	P_2, %	P_1/P_2	P_1, %	P_2, %	P_1/P_2	P_1, %	P_2, %	P_1/P_2
0,1	36,1	8,9	0,25	99,88	75,31	0,75	99,88	75,31	0,75
0,2	5,5	2,3	0,4	56,85	29,5	0,5	56,85	29,5	0,5
0,3	1,6	1,0	0,6	22,04	14,39	0,65	22,04	14,39	0,65
0,4	0,7	0,58	0,8	9,97	8,3	0,83	9,97	8,3	0,83
0,5	0,36	0,37	1,0	5,23	5,4	1,03	5,23	5,4	1,03
1,0	0,04	0,09	2,1	0,67	1,4	2,1	0,67	1,4	2,1
1,5	0,013	0,04	3,1	0,20	0,62	3,1	0,20	0,62	3,1
2,0	0,0056	0,023	4,2	0,08	0,34	4,2	0,08	0,34	4,2
2,5	0,002	0,015	5,2	0,04	0,22	5,2	0,04	0,22	5,2
3,0	0,0016	0,010	6,2	0,025	0,15	6,2	0,025	0,15	6,2
3,5	0,0010	0,0076	7,3	0,015	0,11	7,3	0,015	0,11	7,3
4,0	0,0007	0,0058	8,3	0,010	0,09	8,3	0,010	0,09	8,3
4,5	0,0005	0,0046	9,4	0,007	0,07	9,4	0,007	0,07	9,4
5,0	0,0004	0,0037	10,4	0,005	0,05	10	0,005	0,05	10
5,5	0,0003	0,0031	11,4	0,004	0,046	11,4	0,004	0,046	11,4

Вопросы, связанные с вероятностью попадания крупной частицы золота в навеску для пробирного анализа, можно было бы и не обсуждать по другой, более веской причине. Дело в том, что золото обладает высокой ковкостью. Из-за этого при подготовке пробы по классической схеме в процессе дробления частицы металла не разрушаются, а расплющиваются. Они будут задержаны на сите 1 мм. Более того, деформированы могут быть и частицы мельче 1 мм. Они также могут не пройти через сито и, следовательно, не попасть в навеску. Таким образом, шанс «уловить» крупную частицу при подготовке пробы для пробирного анализа сводится к нулю. Это одна из явных причин занижения содержаний.

Напрашиваются выводы, имеющие практическое значение. Во-первых, наличие видимого золота фракций +0,5 мм является более веским аргументом в пользу высоких содержаний металла, нежели результаты пробирных анализов, выполненных по классической схеме; во-вторых, для получения полноценной количественной информации об истинных содержаниях необходимо использовать иные методы отбора и обработки проб: подвергать анализу достаточно большой объем материала, не истертого, а дробленого до первых миллиметров.

Предлагается следующая схема. Материал каждой пробы подвергается дроблению сначала в щековой дробилке до 6 мм, затем в валковой дробилке до 1 мм. Фракцию +1 мм необходимо подвергнуть гравитационному обогащению. В этом случае крупные частицы металла не будут потеряны. Подсчитав количество частиц, определив их общую массу, легко определить среднюю крупность при допустимом коэффициенте формы (0,5–0,25). Такого рода методика подготовки проб к анализу разработана ЦНИГРИ (Методика..., 2005). Применение предварительного гравитационного концентрирования свободного золота на ряде месторождений (в частности Наталка и Дегдекан) позволило повысить достоверность определения содержаний для всех фракций золота (Токарев и др., 2008).

Если указанная технология соблюдается, то возникают следующие вопросы:

какова вероятность получения непустой (т. е. содержащей хотя бы одну частицу данного размера) пробы стандартного размера при данном среднем содержании в рудном теле;

каково будет минимальное содержание в непустой пробе при попадании в нее частицу данной крупности и коэффициента формы.

Для ответа проведем серию численных экспериментов.

Определим вероятность попадания в половину керна длиной 1 м диаметром 59 и 79 мм в бороздовые пробы 100×10×3, 100×10×5 и 100×20×3 см и 1 м^3 частицы золота с крупностью d от 0,5 до 4,5 мм при коэффициенте формы 0,25 при среднем содержании в руде 15 г/т (табл. 2).

Таблица 2. **Вероятности попадания частиц золота крупностью от 0,5 до 4,5 мм с коэффициентом формы K_f = 0,25 в половину керна длиной 1 м диаметром 59 (К1) и 79 (К2) мм и в бороздовые пробы 100×10×3 см (0,003 м^3), 100×10×5 см (0,005 м^3) и 100×20×3 (0,006 м^3) и пробу объемом 1 м^3**

Table 2. **The presence probabilities for gold particles from 0.5 to 4.5 mm with their shape factor K_f = 0.25 within a half portion of a core sample, length 1 m and diameters 59 mm (K1) and 79 mm (K2), in channel samples 100×10×3 cm (0.003 m^3), 100×10×5 cm (0.005 m^3) and 100×10×3 cm (0.006 m^3), and in a 1 m^3 sample**

d	K1		K2		0,003		0,005		0,006		1	
	p	c	p	c	p	c	p	c	p	c	p	c
0,5	99,09	0,01	99,97	0,56	99,99	0,44	100	0,26	100	0,22	100	0,001
1,0	44,46	8,11	65,48	4,48	73,69	3,57	89,2	2,14	93,08	1,78	100	0,01
1,5	15,99	27,4	27,03	15,15	32,68	12,06	48,29	7,24	54,68	6,03	100	0,03
2,0	7,08	64,94	12,44	35,91	15,37	28,6	24,28	17,1	28,38	14,3	100	0,08
2,5	3,69	126,8	6,58	70,14	8,19	55,85	13,27	33,51	15,71	27,92	100	0,16
3,0	2,15	219,2	3,86	121,2	4,82	96,52	7,91	57,91	9,41	48,26	100	0,29
3,5	1,36	348,	2,45	192,4	3,06	153,3	5,06	91,96	6,03	76,64	99,99	0,46
4,0	0,91	519,6	1,64	287,3	2,06	228,8	3,41	137,3	4,08	114,4	99,90	0,68
4,5	0,64	739,8	1,16	409,0	1,45	325,7	2,41	195,5	2,88	162,9	99,24	0,97

Примечание. d – крупность, мм; p – вероятность, %; c – содержание в пробе, г/т.

Из результатов вычислений вытекает, что при крупности металла выше 1 мм даже при высоких содержаниях (15 г/т) вероятность обнаружения хотя бы одной золотины в единичной бороздовой пробе, тем более в керне и отдельном штуфе, крайне низка. При этом содержания в значимых пробах неизбежно будут многократно превышать истинные. Для сравнения оценим вероятности в валовой пробе объемом 1 м^3. Вероятность получения непустой пробы (содержащей как минимум одну частицу крупностью от 0,5 до 4,5 мм) возрастает практически до 100%. При этом минимально возможные содержания могут только занижаться. Соответственно, отсутствие в такой пробе хотя бы одной частицы служит явным указанием на отсутствие приемлемых содержаний в исследуемом объекте.

В связи с этим следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Одной из характеристик, которой настоятельно рекомендуют пользоваться при статистическом анализе данных, является так называемый коэффициент неоднородности (Леля А. Д. и др., 1982 г.). В случае крупного золота при случайном распределении неоднородность как чередование пустых и продуктивных проб стандартного объема будет присутствовать неизбежно.

Представляется уместным провести такую аналогию. На лист клетчатой бумаги бросим, например, 10 г мелкой крупы. Клетка в данном случае будет служить аналогом пробы, а крупинка – частицей мелкого золота. При случайном распределении практически все клетки будут заполнены, хотя количество крупинок в них будет разным. Наличие большого количества пустых клеток будет свидетельствовать об отклонении от случайного распределения, например, в том случае, если лист оказался неровным. Тогда в ложбинках будет наблюдаться их скопление, а на выпуклых участках полное отсутствие. Тогда и можно говорить о неоднородности и выявлять участки с повышенной и пониженной концентрацией. Если же на тот же лист клетчатой бумаги бросить 10 г фасоли, то большинство клеток обязательно будут пустыми. Возвращаясь к вопросу о компьютерных экспериментах, легко предвидеть, что при случайном распределении крупных частиц золота вероятность получения пустых проб будет достаточно высока даже при высоких содержаниях в руде. Следовательно, к выводам о неоднородности оруденения в таких условиях следует относиться с большой осторожностью.

Таким образом, если золото крупных фракций составляет основную часть запаса, то единичная проба стандартного размера будет либо пустой, либо с явно завышенным содержанием. Увеличение объема пробы, если она взята в пределах рудного тела, естественно, повышает вероятность получения содержания, близкого к среднему. Однако отбор и обработка слишком больших объемов требует высоких затрат, которые могут оказаться неоправданными, особенно в тех случаях, когда результатом является доказательство неперспективности объекта. Целесообразно поставить следующий вопрос: какой объем пробы достаточен для получения положительного или отрицательного ответа с заданным уровнем вероятности. Как показывают специально проведенные исследования (Филонюк и др., 2008), использование для этой цели известной формулы Ричардса-Чечетта однозначного ответа на этот вопрос не дает.

Представляется целесообразным провести с нашей моделью серию численных экспериментов, основанных на формуле Бернулли, т. е. для ответа на поставленный вопрос воспользоваться биномиальным законом распределения. По сути дела это основная модель поведения случайных величин, лежащая в основе практически всех законов, рассматриваемых в теории вероятности и математической статистике (Босс, 2005). Суть его применительно к нашему случаю можно объяснить следующим образом: задав среднее содержание в рудном теле, крупность и коэффициент формы частиц золота, мы можем вычислить по формуле (9) вероятность p того, что произвольная ячейка содержит частицу данной крупности. В таком случае вероятность P_k обнаружить среди среди N ячеек одновременно k частиц определяется по формуле Бернулли:

$$P_k = C_N^k p^N q^{N-k}, \qquad (15)$$

где $C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$, $q = 1 - p$.

Приведенная формула (9), определяющая вероятность обнаружения пустой пробы, является по сути дела вырожденным случаем биномиального распределения при $k = 0$.

При большом количестве частиц прямые вычисления по этой с первого взгляда простой формуле практически невозможны. По этой причине при решении статистических задач рекомендуется прибегать к асимптотическим аппроксимациям, в частности, к нормальному закону с математическим ожиданием $Mx = p\mathrm{N}$ и дисперсией $D = \mathrm{N}p(1 - p)$. Между тем существуют достаточно простые рекуррентные формулы (Смирнов, Дунин-Барковский, 1969), по которым вычисления сводятся к несложным итерационным алгоритмам. Учитывая высокую скорость вычислений современных ЭВМ, для обозримых величин определение соответствующих вероятностей осуществляется практически в режиме реального времени. Это позволяет проводить численные эксперименты на базе непосредственно биномиального закона.

Исходя из биномиального закона, вероятность p_m обнаружения среди N ячеек не более m частиц определяется суммой:

$$p_m = \sum_{i=0}^{m} C_N^i p^N q^{N-i}. \qquad (16)$$

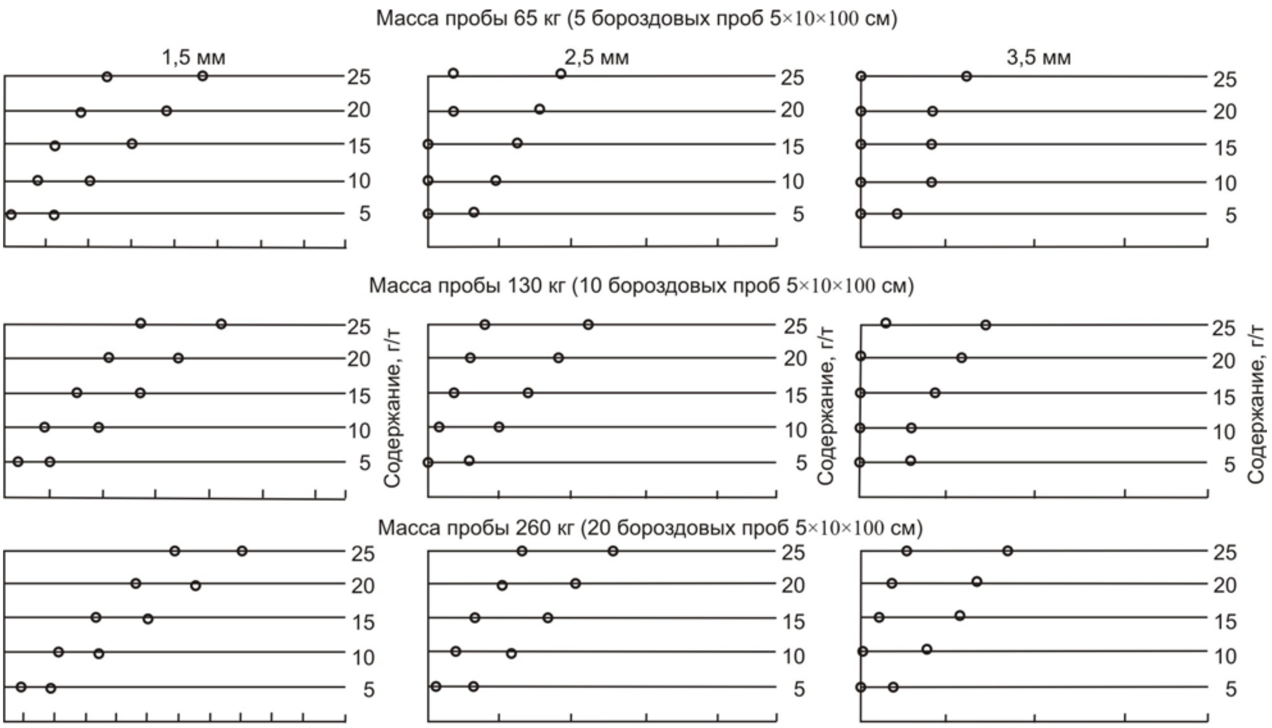
Формулу (16) можно использовать для определения минимально и максимально возможного количества частиц, которые с заданной вероятностью или уровнем значимости можно обнаружить в пробе заданного объема при заданном среднем содержании, крупности и коэффициенте формы. При высоком уровене вероятности, например, 99% (уровень значимости 0,001), число m определяет количество частиц в пробе, по которому можно с уверенностью 99% утверждать, что при данной крупности и коэффициенте формы содержание в пробе выше, чем предполагаемое среднее содержание в рудном теле. Если для вероятности задан низкий уровень, например, 1%, то число m определяет количество частиц в пробе, по которому можно с уверенностью 99% утверждать, что при данной крупности и коэффициенте формы содержание в пробе ниже предполагаемого. По сути дела предлагаемый способ есть не что иное, как проверка гипотезы о соответствии биномиальному распределению с заданными параметрами. Представляется, что такой подход является наиболее обоснованным именно в случае с крупным золотом, когда случайное распределение нельзя считать непрерывным.

На основе формул (9) и (16) нами разработан алгоритм, реализованный в виде функции языка С, с помощью которого с вероятностью $p_{\min}$ и $p_{\max} = 1 - p_{\min}$ определяются числа m0 и m1 – минимальное и максимальное количество частиц, которое может быть обнаружено в пробе объемом V_p при среднем содержании С (в г/т) и крупности частиц d (в мм), с коэффициентом формы K_f.

На рисунке приведены результаты таких вычислений для вероятности 90% в пробах разного объема для частиц крупностью 1,5; 2,5 и 3,5 мм при предполагаемых содержаниях от 5 до 25 г/т (коэффициент крупности принят 0,25).

Из рисунка видно, что в пробах массой 65 кг объективная оценка содержания может быть осуществлена только при крупности не более 1,5 мм. В пробах массой 130 кг оценка содержаний возможна и для фракций 2,5 и 3,5 мм, только при высоких (от 10 г/т) содержаниях. При массе проб 260 кг оценка невозможна только для фракции 3,5 мм при содержаниях ниже 15 г/т. Ясна общая тенденция: чем выше крупность и ниже содержание, тем больший объем пробы необходим для объективной оценки. В принципе для обоснования указанной тенденции нет необходимости прибегать к математике – она достаточно очевидна и из здравого смысла. Однако для определения количественных параметров необходимого и достаточного объема проб для предполагаемых параметров здравого смысла недостаточно.

Как было показано, при низких содержаниях, большой крупности и малом объеме наиболее высокой будет вероятность не обнаружить в пробе ни одной частицы золота. В таких случаях нижний предел оценить невозможно. Важно найти минимальный объем пробы, по которому такая оценка осуществима. Для этого создан алгоритм, позволяющий определить число k – минимальное количество проб объемом V_p каждая, которое при содержании С, крупности d и коэффициенте формы K_f с вероятностью $p_{\min}$ обеспечивает значение $m > 0$. Указанный алгоритм также реализован в виде функции языка С.



Оценка содержаний в рудном теле по сериям бороздовых проб. Точками показаны минимально и максимально возможные количества частиц в пробе при содержании в рудном теле от 5 до 25 г/т

The ore body assessments underlain by channel sampling data. The lowest and highest quantities of gold particles, which can be possibly present in a sample, are shown by dots in accordance with the ore body assessments from 5 to 25 g/t

На основе упомянутых функций разработаны программы, позволяющие проводить численные эксперименты, суть которых состоит в следующем. Задается уровень значимости (вероятность, ниже которой событие считается невозможным) и коэффициент формы. С помощью программ для разных средних содержаний по фракциям крупности определяется минимальный объем, обеспечивающий нахождение как минимум одной частицы, и количество частиц в пробе, которое при данных параметрах максимально возможно.

В частности, приняв коэффициент формы 0,25 с вероятностью 90% , можно утверждать, что при среднем содержании 5 г/т, проводя опробование бороздами 5×10×100 см,

при крупности 0,5 мм достаточно одной пробы (13 кг), в ней должно быть от 13 до 24 частиц;
при крупности 1 мм достаточно одной пробы (13 кг), в ней должно быть от 1 до 4 частиц;
при крупности 1,5 мм необходимы 4 пробы (52 кг), в них должно быть от 1 до 5 частиц;
при крупности 2 мм необходимо 8 проб (104 кг), в них должно быть от 1 до 4 частиц;
при крупности 2,5 мм необходимо 16 проб (208 кг), в них должно быть от 1 до 4 частиц;
при крупности 3 мм необходимо 27 проб (351 кг), в них должно быть от 1 до 4 частиц;
при крупности 3,5 мм необходимы 43 пробы (559 кг), в них должно быть от 1 до 4 частиц;
при крупности 4 мм необходимы 64 пробы (832 кг), в них должно быть от 1 до 4 частиц;
при крупности 4,5 мм необходима 91 проба (1183 кг), в ней должно быть от 1 до 4 частиц.

С помощью указанных программ можно сгенерировать большое количество таблиц и номограмм, помогающих прогнозировать возможные результаты опробования или интерпретировать полученные данные. Еще проще использовать сами программы напрямую, задавая известные или предполагаемые параметры и получая ответы в текстовом или графическом виде. Объем журнальной статьи не позволяет привести сборник таблиц и номограмм, а коды программ для большинства геологов, не имеющих практики программирования, скорее всего, бесполезны. Тем не менее наши численные эксперименты над упрощенной моделью позволяют сделать ряд выводов, которые в практической деятельности игнорировать не следует.

При значительной доле, тем более преобладании крупного золота необходимо в первую очередь подвергать гравитационному обогащению надрешетную фракцию материала после валковой дробилки. В противном случае содержания будут как минимум занижены.

Единичные буровые и бороздовые пробы заведомо не эффективны. Необходимо либо увеличивать объемы проб, либо анализировать серии проб. Поэтому проходка и опробование борозд 3×10 см единичной канавы, подсекающей потенциальное рудное тело, при отсутствии содержания металла не является доказательством того, что данная жила «пустая».

При опробовании месторождений с крупным золотом отсутствие в единичных пробах весовых содержаний не может служить веским основанием для прекращения работ, а наличие единичных ураганных проб следует интерпретировать как явный признак высокой перспективности изучаемого объекта, даже если такие пробы единичны.

Количественные оценки, связанные с определением оптимального количества проб и наиболее вероятных содержаний, которые можно вычислить, используя указанные алгоритмы, могут играть роль неких границ, переступать которые неразумно. В то же время любые вычисления не принесут пользы без знания конкретной геологической ситуации.

В заключение отметим, что предложенную модель и связанные с ними численные эксперименты не следует воспринимать слишком буквально. Естественно, месторождений с постоянной крупностью, тем более с одинаковыми формами не существует. Так что приведенные оценки весьма приблизительны и не могут рассматриваться как прямые инструкции.

ЛИТЕРАТУРА

Босс В. Лекции по математике. Т. 4. Вероятность, информация, статистика. – М. : КомКнига, 2005. – 216 с.

Конышев В. О. Пути повышения достоверности опробования руд с крупным золотом // Руды и металлы. – 2007. – № 2. – С. 40–54.

Кувшинов В. П., Бакулин Ю. А., Иванов В. Н. и др. Опробование руд коренных месторождений золота. – М. : ЦНИГРИ, 1992. – 160 с.

Методика гравитационного концентрирования свободного золота при подготовке к анализу руд проб драгоценных металлов. – М. : ЦНИГРИ, 2005. – 23 с.

Рыжков П. А., Гудков М. В. Применение математической статистики при разведке недр. – М. : Недра, 1966. – 235 с.

Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М. : Наука, 1969. – 512 с.

Токарев В. Н., Никитенко Е. М., Лукиных В. Е., Новикова Т. М. Применение гравитационного метода пробоподготовки при оценке и разведке золоторудных объектов, локализованных в черносланцевых отложениях Северо-Востока России // Золото северного обрамления Пацифика / междунар. горно-геол. форум : тез. докл. Всеколым. конф., посвящ. 80-летию Первой Колымской экспедиции Ю. А. Билибина. – Магадан, 2008. – С. 135–136.

Филонюк В. А., Павлюк А. М., Мильшин Е. А. и др. Причины систематического неподтверждения оценок качества руды по данным эксплоопробования на Зун-Холбинском руднике и обоснование методики достоверного определения среднего содержания золота в руде при планировании добычи // Золотодобыча. – 2008. – № 120. – С. 19–23.

Поступила в редакцию 24.06.2009 г.

USING NUMERICAL MODELING RESULTS IN ORE SAMPLING AND PROCESSING PROCEDURES IN STUDIES OF ORE DEPOSITS WITH COARSE GOLD

A. N. Petrov, V. K. Preis

The authors examine the probability model for coarse gold distribution in lode deposits. The probability of gold particles presence is assessed for different sample sizes. A preliminary gravity-based processing is required for crushed material greater than 1 mm (+ 1mm) in size. With gold particles larger than 1 mm, some standard samples can have the highest (hurricane) grades. Gold grades shall be assessed either from large-size samples or a set of samples rather than from separate samples of standard size. The paper gives the calculated minimum and maximum quantities of different-size gold particles, which can be present with an assigned probability in samples, which differ by their size and gold grade values.

***Key words*: sampling channel, core sample, trench sample, sample, gold, coarse gold, ore, lode.**