

ДИСКУССИИ

УДК 553.4:550.84

©И.И.Силин, 2014

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

И.И.Силин (ИМГРЭ Роснедра Минприроды России)

Для оценки прогнозных ресурсов по данным геохимического опробования используются параметры, разработанные для подсчета промышленных запасов: промышленное содержание, объем рудного блока, коэффициент рудоносности. Ограниченное число проб и низкое содержание полезного компонента в исходных поисковых данных затрудняют определение указанных параметров, поэтому вместо них вводятся относительные величины, количественно связанные с параметрами промышленных месторождений. Приведены примеры применения метода.

Ключевые слова: прогнозные ресурсы, коэффициент промышленной концентрации, коэффициент промышленной рудоносности.

Силин Игорь Иванович, igorivsil@gmail.com

GEOSTATISTICAL ESTIMATION OF PROGNOSTIC RESOURCES USING GEOCHEMICAL SURVEY DATA

I.I.Silin

Method of prognostic resources estimation using geochemical survey data employs the same parameters as calculation of economic reserves, i.e., cutoff grade, block volume and factor of mineralization. Since the source geochemical survey data contain a small proportion of mineralized samples and the metal grade is low, these are substituted by arbitrary values quantitatively related to parameters of economic deposits. Relevant case histories are presented.

Key words: undiscovered resources, economic concentration factor, economic ore potential factor.

Усредненная доля (доли единицы) в наименьшей рентабельной цене первого товарного продукта, приходящаяся на прогнозных ресурсы и запасы различных категорий, приведена в табл. 5 справочника «Богатство недр России» [2]. По данным этой таблицы, усредненная доля затрат на получение ресурсов категории P_2 и запасов категории C_2 составляет сотые доли от товарной стоимости продукта, а в каждой последующей стадии работ существенно возрастает. Следовательно, чем раньше выбран перспективный объект, тем большую прибыль можно получить в результате его освоения. По этой причине наблюдается интерес инвесторов к более ранним стадиям геологоразведочного процесса. При удачном выборе перспективного участка по материалам среднемасштабных геологических съемок сравнительно невысокие затраты на поисковые работы позволяют быстро получить прирост ресурсов и запасов низких категорий. Тем самым, перспективный участок переходит в категорию потенциального промышленного месторождения. Рыночная цена его многократно возрастает.

Однако риск ошибочного выбора участка на ранней стадии поисковых работ особенно высок.

Он обусловлен рядом причин, приводящих в конечном счете к неверной оценке его прогнозных ресурсов [1]. Действующие «Инструкции», «Методические руководства» и «Требования», разработанные еще в прошлом веке, часто стеной стоят на пути современных методов, основанных на рыночной экономике геологоразведочных работ.

Применяемый для вычисления прогнозных ресурсов и запасов низких категорий математический аппарат не учитывает пространственную изменчивость рудных характеристик, что особенно свойственно месторождениям золота. Поэтому многие частные компании для подсчета запасов предпочитают обращаться к экспертам, использующим программные комплексы, основанные на геостатистическом анализе: BRGM/Франция, DATAMINE MINERAL INDUSTRIES COMPUTING LTD/Великобритания, GEMCOM SERVICES INC/Канада, KRJA SYSTEMS/MAPTEK/Австралия, LYNX GEO-SYSTEMS INC/ЮАР, ВНИИГЕОСИСТЕМ/Россия, ЗАО «ИНТЕГРА»/Россия и др.

Предлагаемый метод расширяет диапазон применения прикладной геостатистики за счет технологии подсчета прогнозных ресурсов по геохимическим данным.

Геостатистический подсчет ресурсов на стадии геохимических съемок и поисков. Метод вычисления прогнозных ресурсов по геохимическим данным использует те же параметры, что и подсчет промышленных запасов, а именно: промышленное содержание, объем рудного блока, коэффициент рудоносности. Поскольку в исходных поисковых данных из-за малого числа рудных проб и низкого содержания металла указанные параметры отсутствуют, вместо них вводятся относительные величины, количественно связанные с параметрами промышленных месторождений. Для этого выполняются следующие операции, использующие объективные данные.

Доля промышленного содержания элемента в пробе устанавливается путем нормирования результатов лабораторных определений на минимально-промышленное содержание элемента, принятое по мировым (или региональным) оценкам. Полученные величины называются коэффициентами промышленной концентрации (K_{Cp}).

Доля площади рудоносного блока с промышленным содержанием металла определяется с помощью коэффициента промышленной рудоносности (K_{Sp}), равного отношению площади с промышленным содержанием металла (по K_{Cp}) к площади всего рудоносного блока (в долях единицы). Ориентировочные пороги рангов аномальных геохимических полей (АГХП) можно принять соответствующими десятичной градации объектов (в K_{Cp}): рудное тело (РТ) — 1, рудное месторождение (РМ) — 0,5, рудное поле (РП) — 0,1, рудный узел (РУ) — 0,01. Глубина прогнозирования для крутопадающих рудоносных структур определяется технологически доступной глубиной отработки месторождений данного типа. При упрощенном вычислении прогнозных ресурсов фактическая продуктивность ореола корректируется на величины K_{Cp} и K_{Sp} . При этом коэффициенты считаются независимыми переменными. На самом деле, в рудоносном блоке они функционально связаны.

Для более точного определения прогнозных ресурсов вычисляется функция связи коэффициентов промышленной концентрации и промышленной рудоносности. В общем случае она выражается функцией, обладающей эластичными свойствами: $F(K_{Sp}K_{Cp}) = (K_{Cp}/K_{Sp}) \cdot (dK_{Cp}/dK_{Sp})$. Выявленная зависимость позволяет определить коэффициент рудоносности по заданному численному значению коэффициента промышленной концентрации.

Уточненные прогнозныe ресурсы определяются по общепринятой формуле подсчета промышленных запасов. Однако вместо среднего содержания металла в ореоле в формуле используется принятое минимальное промышленное содержание, скорректированное на величину K_{Cp} , а площадь рудоносного блока корректируется на величину коэффициента промышленной рудоносности при заданном значении коэффициента промышленной концентрации:

$$Q = (S \cdot K_{Sp}) \cdot H \cdot d \cdot C_p,$$

где Q — прогнозныe ресурсы металла, кг; S — площадь потенциального месторождения, м²; K_{Sp} — коэффициент промышленной рудоносности, равный $K_{Sp} = f_{K_{Sp}}(K_{Cp})$; H — глубина отработки прогнозируемого месторождения, м; d — объемный вес руды, т/м³; C_p — заданное минимальное промышленное содержание металла, кг/т.

Пример вычисления прогнозных ресурсов по результатам донного опробования. Предлагаемый метод оценки прогнозных ресурсов описывается на примере статистической обработки атрибутивной таблицы результатов донного опробования листа м-ба 1:200 000*. Для составления табл. 1 необходимо исходные табличные данные, записанные в Excel, дополнить коэффициентами промышленной концентрации путем деления содержаний элементов на их минимальное промышленное содержание по мировым или региональным оценкам [4, 5]. В упомянутом справочнике [2] в табл. 6 приведены расчетные предельно рентабельные цены единицы полезного ископаемого по состоянию на 2008 г. Текущие цены на полезное ископаемое устанавливаются на основе текущей цены доллара, а минимальное промышленное содержание — исходя из зависимости между ценой полезного ископаемого и его минимально-промышленным содержанием. Например, зависимость содержания (1 г/т) от цены на золото в 2008 г. (30 дол/г) описывается формулой, приведенной на диаграмме (рисунок). Цена в 2014 г. выросла до 42 дол/г. Если из этой цены вычесть стоимость всех затрат на получение товарного продукта [2, табл. 5], то останется минимальная цена 1 г Au в недрах. Подставляя данное значение в формулу, показанную на рисунке, получаем текущее значение минимально-промышленного содержания Au, равное 0,89 г/т.** Аналогичным образом можно получить расчетное значение минимально-промышленных содержаний других метал-

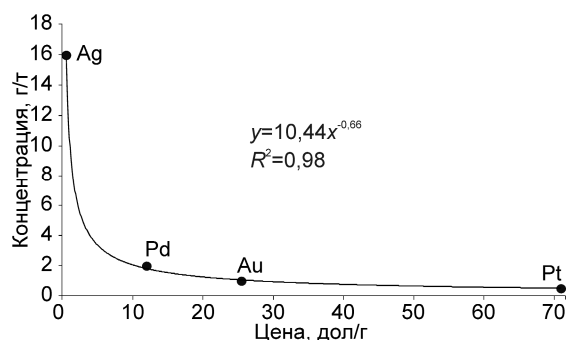
* Прогнозные геохимические карты на геологической основе в статье не приводятся из-за цветовой сложности рисунков.

** При составлении таблиц минимально-промышленное содержание Au принято равным 1 г/т.

1. Поэлементная статистика результатов анализа 940 проб донных отложений листа м-ба 1:200 000, г/т

Параметры	Au	Hg	Pb	Cu	Zn	Ag	Bi	W	Mo	Be	Li	Sn	Mn
Номера проб	16	26	35	25	14	24	64	24	23	35	9	89	33
Минимум	0,001	0,002	10	15	30	0,03	0,5	1	0,6	0,5	10	1	0,01
Максимум	0,27	0,28	200	200	5000	0,5	3	3	5	5	40	5	4000
Среднее	0,015	0,017	17,6	40	102	0,05	0,56	1	1,2	1,3	20	1,5	892
Стандартное отклонение	0,01	0,015	11,4	10,7	86	0,04	0,14	0,2	0,47	0,5	5,2	0,7	401
$C_a = C_{Cp} + 2S$	0,03	0,05	40	60	273	0,13	0,7	1,4	2,4	2,3	30,4	2,9	1694
$K_c = C_{\text{макс}} / C_{Cp}$	18	16	11	5	49	10	5	3	4	4	1,3	1,7	4,5
Кларк верхней коры (К)	0,0065	0,007	17	39	78	0,13	0,33	2,5	1,5	2,1	30	3,8	670
C_a / K	4,6	7,1	2,4	1,5	3,5	1	2,1	0,56	1,6	1,1	1	0,76	2,5
$C_{\text{мин. пром.}}$	1	100	7000	3000	10 000	100	1000	1000	800	1000	1000	2500	80 000
$K_{Cp} = C_{\text{макс}} / C_{\text{мин. пром.}}$	0,27	0,003	0,03	0,07	0,5	0,005	0,003	0,003	0,006	0,005	0,04	0,002	0,05

Ранговый ряд элементов по K_c : 49Zn–18Au–16Hg–11Pb–10Ag–6Yb–5CuBiCr–4MnBaZrSrNb–3WNiTi–2VPCoSn. Ранговый ряд по K_{Cp} : **РП (0,5Zn–0,27Au)** — **РУ** (0,09Ti–0,07Cu–0,06Co–0,05MnBa–0,04NiLiNbY–0,03PbVSrPYb–0,02Zr–0,01Cr) — P3 (0,005Mo–0,005BeAg–0,003HgBiW–0,002Sn). Коэффициент корреляции K_c и K_{Cp} равен +0,9.



Зависимость минимальной промышленной концентрации от мировой цены металла

лов. Однако на практике подобная корректировка минимально-промышленного содержания при вычислении прогнозных ресурсов низких категорий целесообразна только в случае больших скачков цены металла.

Подготовленные таким образом исходные таблицы трансформируются в формат DBF и открываются в ArcMap.

Определение границ перспективных объектов. В табл. 1 (фрагмент) приведена статистика аналитической выборки из 940 донных проб, отобранных на территории листа м-ба 1:200 000. Она получена с использованием программы ArcMap. Статистика верхних пяти параметров (строк) набиралась в полуавтоматическом режиме по столбцам содержания в пробах соответствующих элементов. Остальные параметры вычислялись непосредственно по этой таблице. Кларк верхней части континентальной коры заимствован у Н.А.Григорьева [3]. Минимально-промышленные содержания в основном получены из справочников [2] и «Минеральные ресурсы».

Итерация данных производилась для элементов, у которых стандарт равен или превышает среднее выборки. Ураганные содержания, превышающие устойчивое максимальное, заменялись на устойчивое максимальное (многократно повторяющийся максимум), но только для вычисления среднего и стандартного отклонения. В остальном данные исходных таблиц не корректировались.

Выделение границ АГХП проводилось по превышению среднего на два стандарта, что соответствует уровню критерия значимости 0,05.

В табл. 1 приведены три показателя уровня накопления элементов: K_c — превышение максимума над средним, K_{cp} — доля максимума в минимально-промышленном содержании и отношение C_a/K , позволяющее выделить элементы, аномалии

которых ниже кларка верхней части континентальной коры.

При сопоставлении ранговых рядов K_c и K_{cp} видно, что между показателями существует устойчивая положительная корреляция. Величина K_c не всегда соответствует промышленной важности элемента как объекта поисков, так как элементы с низким кларком в месторождениях накапливаются в сотни и тысячи раз больше, чем Ti, Mn и др. В то же время, K_c полнее раскрывает состав элементов-спутников главного элемента.

В табл. 1 полужирным шрифтом выделены металлы, уровень накопления которых ($K_{cp} > 0,1$) соответствует рангу РП — Zn, Au и Ti. Уровень накопления их относительно фона (K_c) составляет соответственно 49, 18 и 2,6. Продуктивную ассоциацию дополняют Pb, Cu, Ag, Hg, K_c которых > 10 , а также ряд элементов с $K_c < 10$. Последние по уровню накопления относительно промышленных содержаний (по $K_{cp} < 0,01$) отвечают рангам РУ и РЗ (РР), поэтому аномалии этих элементов самостоятельного значения в качестве объектов для поисков месторождений не имеют, но они важны для металлогенического анализа территории.

Все точки отбора геохимических проб, содержание которых превышает указанные выше пороги, отображаются на геологической основе соответствующими условными знаками и окраской, например: РП ($K_{cp} > 0,1$) — пентагоны, РУ ($K_{cp} > 0,01$) — прямоугольники, РЗ ($K_{cp} > 0,001$) — треугольники. Точками обозначены места отбора неаномальных проб. По скоплению проб с содержанием элементов выше нижнего уровня соответствующего ранга на карте выделяются АГХП РУ, РП.

Аномальные пробы всех элементов, превышающие порог РУ, на отдельных участках опробованной территории образуют скопления, соответствующие рангу РУ. Характерные признаки РУ: приуроченность к определенной геологической структуре; широкий спектр аномальных элементов; наличие отдельных проб с содержанием элементов, соответствующим рангу РП, РМ ($K_{cp} > 0,01$; $K_{cp} > 0,1$), а также известных проявлений и месторождений; ранжированный ряд K_c элементов образует ассоциации, характерные для рудных формаций; содержание элементов продуктивной ассоциации существенно превышает кларки пород, вмещающих АГХП.

На территории листа м-ба 1:200 000 обычно выделяются несколько РУ. Промышленную перспективность каждого из них позволяет оценить геостатистический анализ локальной выборки

2. Статистика выборки 41 пробы Урскульского РУ и прогноз ресурсов категории Р₃ (SPY=108 км², плотность опробования, δS: 1 проба на 3,5 км³)

Параметры	Au	Hg	Pb	Cu	Zn	Ag	Bi	Mo	Be	Li	Sn	Mn
Минимум	0,002	0,005	8	20	30	0	0,5	0,6	1	10	1	400
Максимум	0,06	0,023	200	200	5000	0,5	0,8	3	0,8	30	5	3000
Среднее	0,01511	0,040194	41,1	41,0	390,3	0,1	0,5	1,2	0,5	19,0	2,3	1229,0
Стандартное отклонение	0,01	0,02	29,40	32,06	178,00	0,06	0,17	0,66	0,17	7,23	1,33	763,35
C_a	0,03	0,05	40	60	273	0,13	0,7	2,4	2,3	30,4	2,9	1694
K_c	4,0	0,6	4,9	4,9	12,8	4,2	1,6	2,4	1,6	1,6	2,2	2,4
$C_{мин. пром.}$	1	100	7000	3000	10 000	100	1000	800	1000	1000	2500	80 000
K_{Cp}	0,06	0,002	0,03	0,07	0,5	0,005	0,0008	0,004	0,0008	0,03	0,002	0,04
K_{Sp}	0,07	0,10	0,27	0,10	0,32	0,07	0,02	0,05	0,05	0,07	0,22	0,12
Номера проб	3	4	11	4	13	3	1	2	2	3	9	5
$P_{H=1 м.}$	0,3	0,8	3056,1	1212,0	21 867,3	1,7	1,6	12,4	3,2	205,0	113,2	36 068,4
$P_{3, H=1000 м.}$	1,5	0,1	24 598,1	8277,2	3 466 767,1	0,6	0,0	2,4	0,1	450,0	49,7	175 943,2

Ранговый ряд элементов по K_c : **12,8Zn-4,9Cu-4,9Pb-4,2Ag-4Au-2,5Sn-(4Y-3,6Yb-3,2Zr-2,9Sr-2,4Mo-1,6BiLiBeW)-(2,5Mn-2Co-1,7Ni)/0,5Ti-0,6Hg-1,3P-1,4Cr**. Ранговый ряд элементов по K_{Cp} : **РУ 0,5Zn-0,07Cu-0,06Au-0,03Pb** — (РУ 0,05Ti-0,04MnCo-0,01VNi) — (РУ 0,03LiYb-0,02PBaZrSr)/**РЗ 0,00rHgAgBiWMoCrSnBe**. Коэффициент корреляции K_c и K_{Cp} равен +0,9.

3. Вычисление прогнозных ресурсов РУ с учетом функции $K_{Cp}-K_{Sp}$

Плотность распределения Zn

K_{Cp}	K_{Sp}	n
0,01	0,6	24
0,02	0,16	6
0,03	0,07	3
0,04	0,07	3
0,05	0,06	2
0,06	0,02	1
0,1	0,02	2
Сумма	1	41

$$K_{Sp}=0,0005K_{Cp}$$

Прогнозные ресурсы Zn:

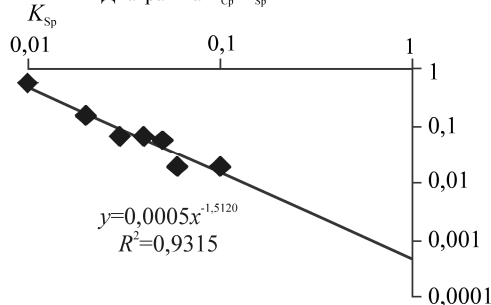
в РУ $QZn=108\,251\,831\text{ м}^2 \cdot 0,0005 \cdot 1000 \cdot 2,7 \cdot 10\text{ кг/т} \cdot 0,5=731\text{ тыс. т.}$

в том числе: в РП1 $QZn=16\,600\,000 \cdot 0,0005 \cdot 700 \cdot 2,7 \cdot 10 \cdot 0,5=78\text{ тыс. т.}$

в РП2 $QZn=17\,100\,000 \cdot 0,0005 \cdot 700 \cdot 2,7 \cdot 10 \cdot 0,5=81\text{ тыс. т.}$

в РП3 $QZn=7\,000\,000 \cdot 0,0005 \cdot 700 \cdot 2,7 \cdot 10 \cdot 0,5=33\text{ тыс. т.}$

Диаграмма $K_{Cp}-K_{Sp}$ Zn



Вычисление прогнозных ресурсов осуществляется двумя способами — приближенным и более точным. Первый способ выполняется в Excel путем перемножения показателей, содержащихся в табл. 2.

Продуктивность ореола РУ вычисляется на основе табличных данных по формуле:

$$P_{(H=1\text{ м, т})}=2,7\text{ т/м}^3 \cdot s \cdot N \cdot \delta S,$$

где s — стандартное отклонение; N — число аномальных проб; δS — плотность опробования.

Ресурсы (Q) каждого элемента определяются по формуле: $Q=P \cdot K_{Cp} \cdot K_{Sp} \cdot H$, т, где K_{Cp} — коэффициент промышленной концентрации; K_{Sp} — коэффициент промышленной рудоносности АГХП РУ, равный отношению числа проб, превышающих

порог ранга, к общему их числу в контуре РУ; H — вертикальный размах оруденения.

В этой формуле K_{Cp} и K_{Sp} приняты как независимые переменные. На самом деле в РУ, РП и РМ между ними существует степенная зависимость, учитываемая при вычислении ресурсов более точным способом, который применяется, если по данным табл. 1 ресурсы элемента представляют промышленный интерес, например, полиметаллов.

Границы РУ выбраны по скоплению аномальных проб, выделенных по данным табл. 1. Площадь РУ замерена на прогнозной карте м-ба 1:200 000. Общее число проб, плотность опробования и число проб с аномальным содержанием элемента получены из таблицы атрибутов шейп-файла (выборки проб) РУ. Прочие параметры вычислены по данным настоящей таблицы.

При сравнении таблиц 2 и 1 видно, что почти вчетверо возрастает среднее содержание Zn. Продуктивная рудная ассоциация, кроме полиметаллов, включает Cu, Ag, Au.

Второй способ вычисления прогнозных ресурсов учитывает функцию связи $K_{Cp}-K_{Sp}$. Его реализация показана в табл. 3 на диаграмме $K_{Cp}-K_{Sp}$. Численное значение функции связи вычисляется путем построения графика плотности распределения $K_{Cp}-K_{Sp}$ в выборке проб РУ. Остальные параметры снимаются с врезки прогнозной карты РУ м-ба 1:50 000, на которой с использованием специальных функций ArcMap (кригинг, сплайн) изо-

4. Оценка рентабельности геологоразведочных работ на цинк

Цена металла в недрах, млн. дол				
Прогнозные ресурсы, $Q_{\text{мет}}, \text{ т}$	1 т Zn, дол	Весь Zn, млн. дол	Доля затрат на ГРР, (млн. дол)	Прибыль, млн. дол, (% рентабельности)
731 000	2800	2047	0,68 (1392)	655 (47)

П р и м е ч а н и е. Коэффициент затрат на геологоразведочные работы принят по [2], табл. 5.

бражаются ореолы главного элемента и его элементов-спутников и определяется контур подсчета прогнозных ресурсов с учетом геохимической зональности РУ. Как правило, в пределах РУ выделяются несколько обособленных скоплений, принимаемых как потенциальные РП. Каждое из них характеризуется всего несколькими аномальными пробами, что не позволяет на этой стадии работ получить достоверную статистику по каждому потенциальному РП в отдельности. Поэтому при вычислении ресурсов используются значения K_{Sp} рудного узла, а геометрические размеры РП снимаются с прогнозной карты РУ. По такой схеме подсчитываются прогнозные ресурсы всех РУ.

Оценка рентабельности геологоразведочных работ на РУ. Оценка рентабельности поисковых работ на аномалиях РУ выполняется с использованием коэффициентов затрат на геологоразведочные работы (по [2], табл. 5). В табл. 4 приведен пример вычисления рентабельности производства поисковых работ в пределах РУ, исходя из вычисленных прогнозных ресурсов цинка. Величина рисков неверной оценки прогнозных ресурсов не учитывалась.

В настоящей статье схематично описывается технология геостатистического метода оценки прогнозных ресурсов по геохимическим данным с использованием ГИС-программ. Метод может быть успешно применен на стадии съемочных и поисковых работ для вычисления прогнозных ресурсов по геохимическим данным, а также на стадии оценочных работ для вычисления запасов низких катего-

рий по результатам количественного анализа проб. Достоинство метода заключается в том, что при его реализации не используются эмпирические коэффициенты, показатели, аналогии и т.д. Качественные результаты анализов, характеризующие перспективный объект, являются достаточной базой для вычисления прогнозных ресурсов. Опыт вычисления прогнозных ресурсов по ретроспективным данным показал хорошую сопоставимость с результатами разведки [4, 5]. Достоверность прогноза в конечном счете определяется качеством геологического картирования, достоверностью аналитических данных, плотностью опробования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абисалов Э.Г. О качестве прогнозных оценок ресурсов полезных ископаемых по геохимическим данным // Разведка и охрана недр. 2010. № 5. С. 58–63.
2. Богатство недр России (минерально-сырьевой и стоимостной анализ). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2008.
3. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
4. Силин И.И. Геолого-промышленная оценка минеральных ресурсов на стадии поисков // Руды и металлы. 2012. № 1. С. 53–61.
5. Силин И.И. Количественная оценка прогнозных ресурсов по геохимическим данным // Разведка и охрана недр. 2013. № 6. С. 15–25.