

Логико-информационный анализ и экспресс-оценка месторождений на базе их параметрических моделей

Чижова И.А.¹, Кузнецов В.В.²

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, tchijova@igem.ru*

² *Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва, okt@tsnigri.ru*

Аннотация. Детальный логико-информационный анализ геологических данных (параметрических моделей) по месторождениям и рудным полям Рудноалтайской минерагенической зоны (колчеданно-полиметаллического и полиметаллического типов) позволил разработать технологию их экспресс-оценки. Алгоритм допускает корректное применение для идентификации минерального типа, частей околорудного пространства, масштабности новых рудопоявлений, образованных в сходных геологических условиях.

Ключевые слова: Рудноалтайская минерагеническая зона, колчеданно-полиметаллические месторождения, полиметаллические месторождения, логико-информационная модель, параметрическая модель, экспресс-оценка.

Logical-information analysis and rapid assessment of deposits based on their parametric models

Chizhova I.A.¹, Kuznetsov V.V.²

¹ *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, tchijova@igem.ru*

² *Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, okt@tsnigri.ru*

Abstract. The detailed logical-information analysis of geological data (parametric models) on deposits and ore fields of the Rudny Altai mineragenic zone (pyrite-polymetallic and polymetallic types) has allowed developing the technology of their rapid assessment. The algorithm supposes correct application for identification of mineral type, parts of surrounding space, scale of new ore occurrence formed in similar geological environment.

Keywords: Rudny Altai mineragenic zone, pyrite-polymetallic deposits, polymetallic deposits, logical-information model, parametric model, rapid assessment.

Введение

Возможности перевода недооцененных месторождений, рудопоявлений и точек минерализации в промышленные месторождения во многом связаны с определением степени их аналогии с эталонными промышленными объектами. Сравнение обычно осуществляется путем анализа совокупности поисковых критериев и признаков, выявляемых геологическими, геохимическими и геофизическими методами исследований.

Применение компьютерной технологии при этом обеспечивает высокую степень оперативности и точность анализа используемых геолого-геохимических, петрофизических, петрохимических и геофизических данных исследуемого объекта, и сравнения этих данных с данными по эталонным объектам, характеризующимся разными масштабами оруденения и специфичными свойствами их минеральных типов и параметров околорудных пространств.

В процессе оценки перспективных площадей большой интерес для геолога представляет собой получение обоснованных заключений по ряду задач:

1. Заключение об ожидаемом формационном (минеральном) типе оруденения;
2. Опознание элементов рудного или околорудного пространства, к которому следует отнести объект оценки;
3. Заключение о масштабе прогнозируемого оруденения.

Необходимые правила для решения поставленных задач могут быть построены как на основе знаний экспертов, так и в результате математической обработки имеющейся базы данных по эталонным объектам (эвристические и расчетно-логические правила). Такие расчетные правила успешно разрабатываются с помощью логико-информационных методов (ЛИМ), разработанных в ИГЕМ РАН (Константинов, 1979; Чиждова, 2010). Эти методы по современной классификации можно отнести к методам искусственного интеллекта и машинного обучения, поскольку модели и решающие правила для решения прогнозных задач формируются на основе компьютерного анализа эталонной выборки объектов исследования из базы данных, описанных в системе геологических, геофизических, минералогических, геохимических характеристик.

В данной работе в качестве описаний эталонных объектов впервые при использовании ЛИМ анализировались их параметрические модели. Технология отработывалась на основе параметрических моделей месторождений и рудных полей Рудноалтайской минерагенической зоны.

Для полного описания представителей данной группы месторождений эталонные объекты были подобраны с учетом проявления различных минеральных типов (колчеданно-полиметаллический и полиметаллический) и различной масштабности (мелкие, средние, крупные). Всего в базе данных содержатся сведения по 20 месторождениям (9 – колчеданно-полиметаллическим и 11 – полиметаллическим).

В качестве эталонных объектов отобраны преимущественно детально разведанные месторождения, что обеспечило получение достаточно полного объема информации. Параметрические модели представляют собой геолого-поисковые модели, в которых геологическое пространство, заключающее месторождение, охарактеризовано системой соподчиненных элементов, признаков и критериев, получивших применительно к различным частям пространства количественные (параметрические) оценки.

Параметрические модели строятся на основе расчленения объема, занимаемого конкретным месторождением, на ряд пространств: рудоносное (РМ), фланговое (РФ), над- (НР) и подрудное (ПР). Соответственно, в базе данных по эталонным месторождениям хранятся сведения, сформированные по аналогии с моделями для рудоносного, флангового, над- и подрудного пространства.

Зоны геологического пространства описаны системой факторов и признаков, в число которых, как следует из генетических построений и опыта прогноза и поисков месторождений колчеданного семейства, включены: стратиграфо-литолого-фациальные, магматические, структурные (в первую очередь, конседиментационные и синвулканические), а также показатели, характеризующие состав, морфологию, зональность и интенсивность гидротермально-метасоматических изменений; морфологию, состав и положение рудных тел в структурах месторождений и разрезах рудовмещающих толщ; геохимические и геофизические аномалии, сопровождающие месторождения.

В структуру описания были включены следующие данные (263 бинарных признака (со значениями 1 и 0, означающих присутствие или отсутствие признака на объекте)):

1. Породы, слагающие рудные поля и месторождения и их формационная принадлежность.
2. Рудоконтролирующие и рудовмещающие структуры.
3. Метаморфические и гидротермально-метасоматические изменения.
4. Морфология и условия залегания рудных тел.
5. Минеральные типы руд (для рудовмещающей части разреза).
6. Зоны проявления сульфидной минерализации (для надрудной, фланговой и подрудной частей разреза)
7. Главные элементы геохимических ореолов.
8. Геофизические поля.

Методика исследований

Для достижения поставленных целей при экспресс-оценке объектов изучения необходимо построить решающие правила, обеспечивающие решение упомянутых выше задач (определение формационного (минерального) типа оруденения; опознание элементов рудного или околорудного про-

странства, к которому следует отнести объект оценки; оценка масштабности оруденения) с достаточной степенью надежности.

Сформулированные задачи в формализованном виде могут быть представлены как задачи распознавания образов (имеется некоторое множество объектов, разбитых на группы (классы) по некоторому свойству и описанных в системе признаков; требуется определить для любого объекта, описанного в этой же системе признаков, к какой группе объектов его можно отнести, то есть идентифицировать его). Для задач данного типа широко зарекомендовал себя логико-информационный анализ, строящий простые, легко интерпретируемые и надежные решающие правила по обучающей выборке объектов (Чижова, 2010). Процесс поиска решающих правил строится на принципе общности свойств, который основан на предположении, что объекты, образующие один класс (группу), обладают свойством подобия, отраженного в их характеристиках.

Логико-информационное моделирование (ЛИМ) предполагает следующую последовательность действий:

1. Выделение информативных признаков, характерных для объектов изучаемых групп месторождений, на основе вычисления функции информативности.
2. Оценка разделяющих способностей информативных признаков (для отделения объектов каждой группы от объектов других групп) на основе вычисления разделяющих весов информативных признаков (по величине этих весов); разделяющие веса представляют собой количественную оценку важности использования конкретного признака для разделения групп на основе изучения вероятностных характеристик распределения значений этого признака в пределах каждой группы.
3. Формирование решающих правил для идентификации объектов исследования на основе вычисления значений функций принадлежности этого объекта группе (информационных весов объекта), равных сумме разделяющих весов признаков, информативных для данной группы и присутствующих на объекте исследования; принимается решение: объект относится к той группе, для которой функция принадлежности принимает максимальное значение.
4. Проверка надежности решающих правил на основе расчета качества распознавания эталонной и контрольной выборок; качество распознавания определяется по количеству правильно распознанных эталонных проб; решающее правило считается удовлетворительным (с высокой степенью работоспособности), если правильно распознано не менее 70 %; тогда его можно использовать для идентификации проб из контрольной выборки и объектов экзамена.

Алгоритмы расчета функций информативности признаков, разделяющих весов информативных признаков, функций принадлежности объекта исследования группе описаны в работе (Чижова, 2010). Они используются для построения решающего правила для идентификации объектов (см. пункт 4). В результате мы имеем вектор значений функций принадлежности $\varphi_k(X)$ анализируемого объекта $X (X=(x_1, x_2, \dots, x_N), N - \text{число элементов})$ для каждой группы A_k , который характеризует степень сходства этого объекта с анализируемыми группами.

В случае разделения объектов на группы по некоторому монотонно-изменяющемуся целевому свойству (например, масштабности оруденения) возможно выделение единой системы информативных признаков, коррелирующих с изменением целевого свойства, и построение решающего правила для принятия решения по величине значений соответствующей функции информативности (информационного веса, равного сумме разделяющих весов соответствующих информативных признаков) для определения принадлежности объекта к группам (объект относится к той группе, в диапазон изменения значений которой попадает вычисленное для объекта значение функции информативности).

Результаты анализа

В результате анализа (ЛИМ) эталонной выборки по каждой задаче построены системы информативных признаков с оценкой их разделяющих способностей, которые и были использованы далее.

Охарактеризуем полученные системы информативных признаков для каждой из решаемых задач.

1. *Разделение объектов по минеральному типу* – определение типа (колчеданно-полиметаллический или полиметаллический) опирается на 12 наиболее информативных признаков, среди которых наибольшие веса имеют типы геологических формаций и субформаций, магматических пород, рудоконтролирующие и рудовмещающие структурные элементы.
2. *Определение части рудного или околорудного пространства, к которому относится объект оценки* – выделено 8 систем информативных признаков – отдельно для каждого минерального типа (колчеданно-полиметаллического и полиметаллического) и каждой части околорудного пространства (РМ, РФ, РН, ПР). Наибольшее значение имеют признаки, характеризующие литолого-фациальное строение разреза, состав и характер проявления околорудных метасоматитов, состав и морфологию рудной минерализации.
3. *Оценка масштабности объекта* – выделено 8 систем информативных признаков – отдельно для каждого минерального типа (колчеданно-полиметаллического и полиметаллического) и каждой части околорудного пространства (РМ, РФ, РН, ПР). Для колчеданно-полиметаллического типа для всех пространств наиболее значимы формационные, литолого-фациальные и структурные признаки, для полиметаллических объектов, кроме перечисленных выше, информативными являются и геохимические признаки.

На основе оценки значимости информативных признаков проведена идентификация эталонных месторождений. Определены их тип, околорудное пространство и масштабность, проведена оценка качества распознавания. Полученные результаты позволяют использовать их в дальнейшем для экспресс-оценки потенциальных месторождений данного типа.

1. *Разделение объектов по минеральному типу.* При определении минерального типа месторождений в таблицу обучения были включены – 36 параметрических моделей по 9 эталонным колчеданно-полиметаллическим (1 класс) и 44 параметрических моделей по 11 эталонным полиметаллическим (2 класс) месторождениям. Для первого класса из 36 объектов правильно распознаны 31, доля распознавания 86.1 %. Для второго – из 44 объектов правильно распознано 37, соответственно, доля распознавания 84.1 %. Качество распознавания минерального типа – 85 % (12 ошибок).
2. *Распознавание частей околорудного пространства для объектов колчеданно-полиметаллического минерального типа.* Использовано девять эталонных месторождений различного масштаба. Правильно распознано от 77.8 до 88.9 %. Максимальные значения качества распознавания получены для правила, построенного для рудоносной и фланговой частей пространства, а минимальные – для над- и подрудного.
3. *Распознавание частей околорудного пространства для объектов полиметаллического минерального типа.* Использовано одиннадцать эталонных месторождений различного масштаба. Правильно распознано от 72.7 % до 81.8 % объектов. Максимальное значение качества распознавания получено для правила, построенного для рудоносного пространства, а минимальное значение – для над- и подрудного.
4. *Распознавание объектов по масштабам.* Использовано несколько вариантов информативных признаков, полученных для каждого минерального типа и каждой части околорудного пространства. По каждому варианту анализировалось различие эталонных групп месторождений (мелкие, средние, крупные объекты), достигнутое по расчетным показателям. Граница классов определялась через полусумму максимального и минимального значения информационного веса эталона в соседних классах. В трех случаях эта граница не зафиксирована ввиду перекрытия информационных весов соседних классов для подрудного и надрудного пространств.

В качестве примера приведем информационные веса объектов при распознавании масштаба оруденения для объектов полиметаллического типа (табл. 1).

Таблица 1. Информационные веса эталонных месторождений полиметаллического типа для определения масштабности оруденения.

Table 1. Information weights of polymetallic reference deposits for definition of ore scale.

Класс объектов по крупности	Наименование эталонного месторождения	Части рудоносного пространства			
		РМ	РФ	НР	ПР
Мелкие (запасы до 500 тыс. т металла)	Семеновское	0.9	0.892	0.875	0.886
	Змеиногорское	0.694	0.688	1.222	1.014
	Зареченское	0.594	1.016	1.115	0.577
	Захаровское	0.496	0.482	0.227	0.516
Граничные значения		1.01	1.06	?	?
Средние (запасы от 500 до 1000 тыс. т металла)	Рубцовское	1.473	1.545	1.348	1.501
	Таловское	1.125	1.536	1.338	1.361
	Юбилейное	1.329	1.103	1.023	1.173
	Среднее	1.650	1.428	1.195	0.946
Граничные значения		1.86	1.62	1.58	1.55
Крупные (запасы свыше 1000 тыс. т металла)	Греховское	2.553	2.539	2.308	2.214
	Чекмарь	2.076	1.697	1.813	1.605
	Зыряновское	2.522	2.294	2.438	2.368

Для использования логико-информационных моделей для оценки нового объекта необходимо описать его в системе информативных признаков, вычислить информационный вес как сумму разделяющих весов тех признаков, которые проявлены на данном объекте, а затем сравнить полученную величину с оценками эталонных объектов. По разработанной методике была проведена оценка перспективности рудных полей Змеиногорского рудного района Рудного Алтая (Кузнецов, Чижова, 2021).

Заключение

Применение разработанной методики обеспечивает получение надежных результатов, (количество ошибок не превышает 28 %, что следует признать удовлетворительным).

Анализ неправильно распознанных геологических ситуаций показывает, что наибольший процент ошибок связан с объектами, имеющими переходные черты между минеральными типами, или имеющие запасы, близкие к границам классов, а также с над- и подрудным пространством, где геоинформационная база наименее достоверна.

Таким образом, использование систем информативных признаков с оценкой их разделяющих способностей (логико-информационных моделей), созданных в результате компьютерного анализа данных параметрических моделей месторождений и рудных полей Рудноалтайской минералогической зоны, показывает свою высокую эффективность при прогнозе и поисках колчеданно-полиметаллических и полиметаллических месторождений, их применение позволило заново переоценить известные рудные поля и выявить приоритетные направления для постановки поисковых работ в рудном районе.

Работа выполнена в рамках госзадания.

Литература

1. Константинов Р.М. Математические методы количественного прогноза рудоносности. М. Изд-во: Недра. 1979. 127 с.
2. Кузнецов В.В., Чижова И.А. Опыт разработки и применения интеллектуально-графических компьютерных систем // Руды и металлы. 2021. № 1. С. 26–41. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10002.
3. Чижова И.А. Логико-информационное моделирование при прогнозно-металлогенетическом анализе перспективных площадей // Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии М. Изд-во: ИГЕМ РАН. 2010. С. 59–84. ISBN 978-5-88918-019-7.