

И. С. МОДНИКОВ, А. Н. ЕРЕМЕЕВ, В. М. ПИСАРЕВСКИЙ, Г. И. РОССМАН,  
А. Н. ДМИТРИЕВ, Ф. П. КРЕНДЕЛЕВ, Т. И. РЕЗНИК

## **Оценка масштаба редкометального оруденения, локализованного в вулканических аппаратах (с помощью ЭВМ)**

В настоящее время одной из важнейших проблем геологии при поисках рудных месторождений является выбор и оценка перспектив локальных участков в пределах крупных металлогенических провинций. Эта проблема осложняется недостатком необходимой информации или наличием крайне неупорядоченных сведений по каждому конкретному участку или рудопроявлению, на котором проводятся поисково-оценочные работы. По мнению авторов, такое положение объясняется тем, что, как правило, неизвестно, достаточна ли информация, имеющаяся по какому-либо конкретному участку или объекту для оценки его промышленной значимости, а если нет, то какие дополнительные геологические факторы должны быть выявлены для определения масштаба оруденения. Ниже приводятся основные геологические результаты исследований, проведенных с целью определения возможностей применения ЭВМ для прогнозирования масштаба редкометального оруденения.

Исследования были проведены в одном из районов СССР, где редкометальное оруденение локализовано в палеовулканических аппаратах (обозначим этот район буквой *A*). В пределах этого района разведано несколько месторождений и рудопроявлений, различных по своим масштабам. Наиболее крупное из них обозначим  $M_1$ , наиболее мелкое —  $M_6$ . Различия в масштабах разведанного оруденения на объектах  $M_7$  —  $M_{10}$  и  $P_1$  —  $P_6$  менее существенны. Резкой разницы между наиболее крупным проявлением и мелким месторождением тоже нет; граница между ними условная. Отсутствие полных, а иногда и точных сведений об этих объектах вынуждает нас провести поиск геологических критериев, достаточных для выяснения масштабов оруденений, приуроченных к вулканическим аппаратам, в рамках имеющейся информации о них.

В процессе полевых исследований по региону в целом и по каждому рудному объекту в отдельности собиралась логическая информация, предусматривающая обычные геологические описания. Количественная информация (расстояния между рудопроявлениями и разломами, плотностные характеристики пород и т. п.) занимала относительно небольшой объем. Логическая информация сводится к сбору сведений об особенностях геологического строения района *A* в региональном плане (позиция рудных полей, положение вулканических аппаратов на площади, в структурах и в стратиграфическом разрезе) и локальных структур (строение вулканических аппаратов, их особенности, гидротермальные изменения и т. п.). При этом предусматривается выделение признаков, характеризующих объект. Под термином «признаки» здесь обозначаются некоторые свойства объекта, определенные по данным наблюдений или измерений, имеющимся в описаниях, раз-

резах, колонках, картах, графиках и т. п. Такое понятие «признака» принято в кибернетической литературе [3] и несколько отличается от понятия термина, используемого обычно геологами.

Ниже приводится краткое описание геологического строения района А и рудовмещающих структур.

**Основные черты геологического строения района и рудовмещающих вулканических аппаратов.** Рудный район расположен в пределах интра-геоантиклинального поднятия, приуроченного к сложно построенному каледонскому складчатому поясу. Интрагеоантиклиналь граничит по зонам краевых глубинных разломов первого порядка с узкими протяженными грабен-синклинорными структурами. Наряду с краевыми, здесь отмечаются внутренние глубинные разломы первого порядка.

Начало орогенного периода в развитии района сопровождается инверсией тектонических движений, обусловивших образование прогибов вблизи разломов первого порядка и заложение поперечных разрывных нарушений второго порядка. Приразломные прогибы характеризуются трехъярусным строением: нижний структурный ярус, развитый в пределах всей интрагеоантиклинали, сложен метаморфизованными песчано-сланцевыми отложениями; средний — вулканогенно-осадочными образованиями андезит-молассовой формации; верхний — характеризуется мелкоблоковым строением и сложен вулканогенно-осадочными породами с преимущественным развитием кислых эффузивов, их пирокластов, экструзивов и субвулканических тел. Породы всех трех структурных ярусов смяты в брахиформные складки, выполняющиеся к верхнему структурному ярусу, так что породы последнего залегают практически горизонтально.

В конце орогенного периода развития произошло становление многофазных массивов лейкократовых гранитов и аляскитов, внедрение которых контролировалось краевыми и внутренними зонами глубинных разломов первого порядка. Орогенный период развития завершается формированием поясов даек, главным образом среднего и основного состава.

Рудные поля приурочены к приразломным прогибам и пространственно совпадают с крупными палеовулканическими центрами, положение которых определяется либо изгибами разломов первого порядка, либо их сочленениями с разломами второго порядка.

Рудовмещающие вулканические аппараты расположены в периферических частях крупных палеовулканических центров, причем находятся на разном расстоянии от структур первого и второго порядков. Их положение контролируется узлами сочленения разломов второго порядка, оперяющими структурами этих разломов и их сближенными зонами.

Становление вулканических аппаратов происходило во время формирования среднего и верхнего структурных ярусов. Вулканические аппараты имеют разную форму, размеры и строение. Замечено, что рудные поля тяготеют к крутопадающим надинтрузивным зонам гранитоидных массивов. Разломы первого и второго порядков на участках рудных полей подверглись неоднократным тектоническим движениям, о чем свидетельствуют разновременные магматические образования разного состава и продукты гидротермального процесса.

Особенности локализации оруденения в вулканических аппаратах обусловлены их внутренним строением. К числу геологических факторов, влияющих на локализацию оруденения, относятся:

— интенсивность развития крутопадающих разломов, являющихся оперяющими по отношению к разломам первого и второго порядков, и сопряженной с ними трещиноватости;

— интенсивность развития крутых и пологих даек различного состава;

— полифазность и полифациальность вулканических образований;

— интенсивность развития крутых и пологих трещин отдельности;

— экстенсивность и интенсивность проявления различных типов метасоматических дорудных гидротермальных изменений и др.

Таким образом, среди геологических факторов выделяются две группы — региональные, отражающие позицию рудных полей и рудовмещающих вулканических аппаратов, и локальные, определяющие размещение оруденения в вулканических аппаратах.

**Постановка задачи и методика исследований.** Для решения поставленной задачи принимается предположение, что геологические факторы, влияющие на локализацию оруденения, содержат информацию относительно масштабов этого оруденения. Выявление этой информации возможно путем производства множества формально-логических операций над совокупностью геологических факторов, заданных в виде характеристических признаков оруденения. При этом можно использовать данные о взаимосвязях между геологическими факторами, проявившимися на объектах разного масштаба.

Задачи настоящего исследования состояли в следующем:

а) в установлении наличия (или отсутствия) связи между геологическими факторами, отражающими локализацию редкометального оруденения в вулканических аппаратах, и масштабом этого оруденения;

б) в выделении минимального (в пределах учтенных сведений) количества геологических факторов, достаточного для прогноза масштаба редкометального оруденения при поисково-оценочных работах.

Подготовка материала для решения поставленной задачи заключалась в выборе объектов исследования и сборе информации о геологических факторах, в кодировании исходных данных и составлении таблицы решения для обработки на ЭВМ.

Как отмечалось выше, в качестве объектов исследования были выбраны эндогенные редкометальные месторождения и рудопроявления одного типа, локализованные в вулканических аппаратах единой металлогенической провинции. Исследованию подверглись все детально разведанные и в одинаковой степени изученные объекты, характеризующиеся проявлением данного типа оруденения, но в различных геологоструктурных обстановках и при различном внутреннем строении рудовмещающих аппаратов. Из 16 объектов десять было выбрано в качестве эталонов (от  $M_1$  до  $M_{10}$ ), а шесть объектов, отвечающих мелким месторождениям и рудопроявлениям ( $P_1$ — $P_6$ ), использовались как контрольные.

Контрольные вулканические аппараты различались геологоструктурной обстановкой, морфологией и размером магматических камер, их внутренним строением, интенсивностью и характером проявления гидротермальных изменений пород.

При описании геологических объектов отбиралась лишь та геологическая информация, которая позволяла судить о масштабе оруденения в вулканических аппаратах.

Сведения о региональных факторах были получены путем анализа геологических карт масштабов 1 : 200 000—1 : 25 000. Причем факторы, характеризующие особенности строения разломов первого и второго порядков, гранитных массивов и дайковых поясов, отражаются обычно на картах масштаба не менее 1 : 50 000.

Информация о локальных факторах собиралась при анализе геологических карт масштабов 1 : 10 000—1 : 1 000, погоризонтных планов мас-

штабов 1 : 1 000—1 : 500, детальных геологических разрезов, документаций скважин колонкового бурения и горных выработок.

Для учета неоднородности строения рудовмещающих вулканических аппаратов использовались данные определений физико-механических свойств пород (эффективной пористости, упругих свойств).

Таким образом, основная часть исходных геологических данных носит качественный характер.

Обработка данных, имеющих количественный характер (расстояния между объектами и гранитными массивами, разрывными структурами, дайковыми поясами и т. п.), заключалась в построении гистограмм по каждому из таких геологических факторов и выделении ряда интервалов, отражающих особенности распределения объектов.

Исходные геологические данные кодировались по схеме, приведенной в таблице. После выполнения кодирования табличное описание эталонных объектов представляет собой набор из 139 признаков и 10 строк (объектов). Эти признаки в свою очередь подразделяются на семь групп, причем каждая из них объединяет родственные признаки (рис. 1).

Доалгоритмический этап обработки кодовой таблицы заключался в ее свертывании. Свертывание таблицы производилось путем выделения сквозных признаков и устранения признаков с одинаковой конфигурацией столбцов. Таким образом, таблица, подготовленная для обработки на ЭВМ, состоит из 92 различных признаков.

Схема кодовой таблицы, иллюстрирующая распределение признаков по группам региональных и локальных геологических факторов, приведена на рис. 2. Среди сквозных признаков выделяются признаки целеобразующие (их два) и признаки, рассматривающиеся как отождествляющие в данной задаче (их 14).

Целеобразующие признаки определяют сферу использования геологической информации по изучаемому району для сопоставления эндогенной редкометальной минерализации, локализованной только в вулканических аппаратах.

После исключения сквозных признаков в кодовой таблице остаются только различающие признаки, которые характеризуют отличительные черты исследуемых объектов (допустимая таблица). По допустимой таблице, состоящей из набора различающих признаков (где все строки различны), определяется роль каждого признака в разграничении объекта.

Реализация допустимой таблицы выполнена на ЭВМ типа БЭСМ по алгоритму, включающему процедуру построения всех тупиковых тестов [1].

Оценка значимости признаков осуществляется операцией голосования, т. е. определением частоты вхождения  $i$ -ого признака в тупиковые тесты. Признак, вошедший наибольшее число раз в тупиковые тесты, является наиболее существенным в общем наборе различающих признаков, т. е. имеет наибольший информационный вес  $P(i)$ .

Информационный вес строки  $I(s)$  находится как сумма информационных весов признаков, имеющих символ «1» в этой строке. При наличии в строке символа «—» этот признак вводится с условным информационным весом, равным  $0,5 P(i)$ . Информационный вес строки (объекта) является основным показателем, который и рассматривается ниже в связи с прогнозной оценкой масштабов оруденений, локализованных в вулканических аппаратах.

**Основные результаты исследований.** Среди геологических факторов выделяется несколько групп, имеющих важное значение для прогнозирования перспектив локальных участков и оценки возможного масштаба оруденения.

Кодовая таблица признаков (фрагмент)

Группа признаков	M1	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>9</sub>	M <sub>10</sub>	Содержание признака
	Xn											
Целеобразующие	52	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Наличие вулканических аппаратов
	130	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Наличие редкометалльной минерализации в пределах вулканического аппарата
Отождествляющие	138	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Вулканический аппарат расположен в пределах интрагеоантиклинального поднятия
	132	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Наличие нелинейных зон разломов первого порядка
	30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Разрывы первого и второго порядков сочленяются под углами 45—90°
	136	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Удаленность объекта от структур первого порядка более чем на 4 км
Различающие	7	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	Наличие зон дробления в структурах первого порядка
	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	Объект расположен в оперяющих структурах разломов второго порядка
	32	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	Объект удален от крутопадающих структур внедрения на 2—4 км
	40	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	Дайковые пояса ориентированы параллельно структурам второго порядка
	56	0	1	1	1	1	1	—	1	1	1	Породы, вмещающие вулканический аппарат, являются эффузивными образованиями кислого состава
	84	1	0	0	1	1	—	1	1	0	1	Наличие в пределах вулканического аппарата единичных крутопадающих даек кислого состава
	113	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	Предрудные изменения пород развиты слабо

Примечание. 1 — проявление признака, 0 — отсутствие признака, «—» — отсутствие данных вследствие недостаточной изученности объекта.

Отождествляющие признаки характерны для всех исследуемых объектов; они включают геологические факторы, благоприятствующие проявлению гидротермального рудообразования. Отождествляющие признаки в совокупности отражают общность геологических позиций объектов рассматриваемого типа. Эти факторы определяют перспективность участка, но не масштаб локализованного в его пределах оруденения (см. таблицу). Кроме указанных в таблице, отождествляющими являются следующие признаки:

1) зоны разломов первого порядка, залеченные постраничными дайками кислого состава;

2) зоны разломов второго порядка, ориентированные вкрест простириания вмещающих пород и характеризующиеся проявлением по ним интенсивных постдайковых подвижек;

3) широкие экзоконтактовые зоны сложно дифференцированных многофазных гранитоидных массивов заключительных фаз орогенного этапа развития района;

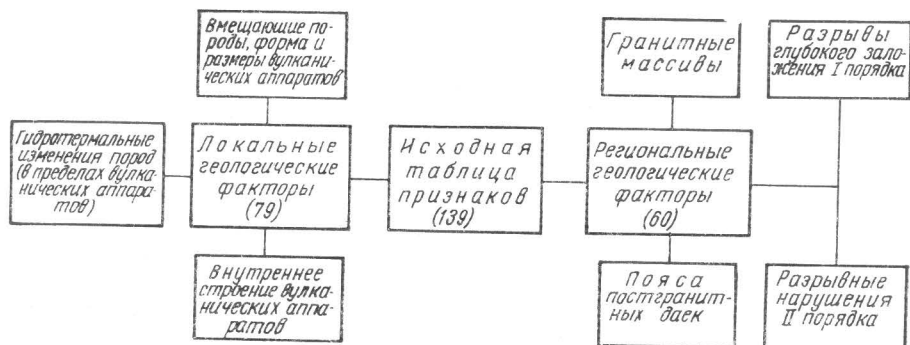


Рис. 1. Схема табличного описания объектов, локализованных в палеовулканических аппаратах (по группам геолого-структурных факторов)

4) дайковые пояса постгранитного комплекса, ориентированные вкрест простириания разломов второго порядка.

Все эти геологические факторы определили пространственное размещение периферических вулканических аппаратов и во время рудообразующего процесса выступали в роли основных рудоконтролирующих структур.

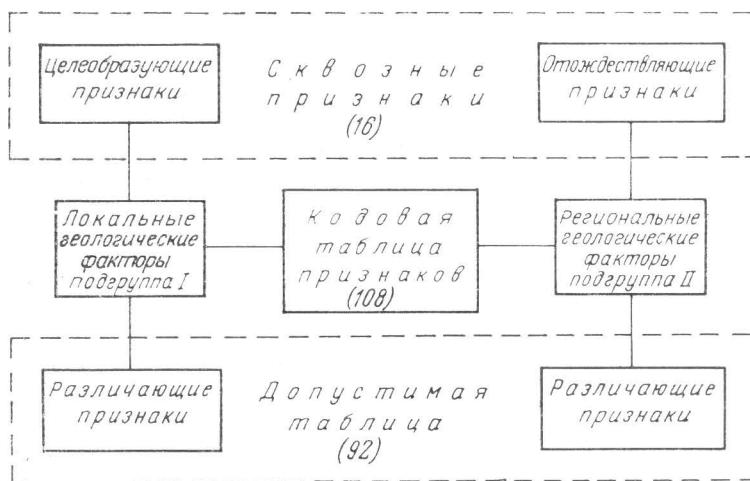


Рис. 2. Схема свертывания кодовой таблицы признаков

Различающие признаки включают геологические факторы, позволяющие различать объекты исследования по масштабу оруденения (см. таблицу). Среди них выделяются более информативные признаки со значениями информационных весов  $P(i) \geq 2P(i)_{\min}$ .

Выявленное ограниченное количество геологических факторов подразделяется на две подгруппы — региональные и локальные. К I подгруппе относятся геологические факторы, определяющие степень тектонической нарушенности и проницаемости блоков вблизи рудоконтроли-



рующих структур во время, непосредственно предшествующее оруденению. Так, например, промышленное оруденение локализовано на тех участках, где разломы первого и второго порядков залечены дайками среднего и основного состава и формирование которых непосредственно предшествовало рудообразующему процессу. Экзоконтактовые зоны крутопадающих структур внедрения гранитных массивов, совпадающие с зонами глубинных разломов, обуславливают резкую неоднородность строения площадей, что также благоприятствует локализации промышленного оруденения в их пределах и т. п.

Ко II подгруппе относятся наиболее важные локальные факторы, отражающие особенности локализации рудных тел в пределах вулканических аппаратов. В частности, многофазные вулканические аппараты, имеющие крупные и средние размеры магматических камер, характеризуются резко гетерогенным строением, что весьма благоприятно для формирования разных по морфологии и размерам рудовмещающих структур. Интенсивное развитие в рудовмещающих вулканических аппаратах крутопадающих нарушений разных порядков определяет их повышенную проницаемость для рудоносных растворов. Широкое проявление кварц-серицитовых с пиритом гидротермальных метасоматических изменений также способствовало повышению проницаемости пород и создало благоприятную среду для рудоотложения и т. д.

Проведенные исследования позволили установить, что геологические факторы несут полезную информацию о масштабе редкометалльного оруденения, локализованного в вулканических аппаратах. Это подтверждается зависимостью между информационными весами объектов и масштабом оруденения.

Ранжирование объектов, проведенное по значениям информационных весов строк, показывает, что наиболее высокой части кривой соответствуют месторождения среднего и переходного к мелким масштаба (рис. 3). Средняя часть кривой отвечает мелким месторождениям. Наконец, в нисходящей части кривой располагаются объекты с низкими значениями информационного веса строк, которые соответствуют рудопроявлениям и точкам минерализации.

Выявление всей совокупности признаков для прогнозной оценки масштаба оруденения объектов сводится фактически к их детальной разведке. Поэтому крайне важно установить минимальное число признаков, подлежащих выявлению, которые могут быть использованы для прогнозирования оруденения на этапе поисково-оценочных работ. С этой целью изучалась информативность признаков, что позволило выделить существенно значимые признаки (ниже рассматриваемые как критерии)\*, определяющие информационные веса объектов (т. е. их масштабы). Генерализованный вид кривой прогноза при этом сохраняется (рис. 4, а).

Наиболее информативные признаки (критерии) можно подразделить на две группы: трудно- и легковыявляемые. К легковыявляемым относятся региональные критерии, устанавливаемые при геологических съемках масштабов 1 : 200 000—1 : 50 000, и часть локальных критериев, которые могут быть установлены в процессе специализированного геологического картирования масштабов 1 : 10 000—1 : 1 000 с проходкой наземных горных выработок и единичных поисково-разведочных скважин. К трудновыявляемым относятся такие локальные критерии, которые выявляются при проведении значительного объема тяжелых горно-буровых работ.

\* Геологический критерий может выражаться отдельными наиболее значимыми признаками или совокупностью родственно близких признаков.

График зависимости масштаба объектов от информационного веса легко выявляемых признаков приведен на рис. 4, б. Видно, что этот график очень близок к графику, построенному по информационному весу всех критериев (см. рис. 3). Он позволяет уверенно выделять средние

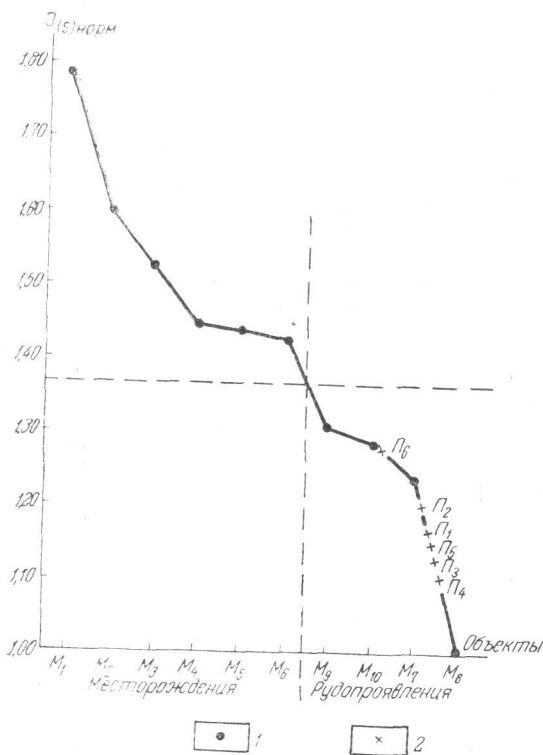


Рис. 3. Упорядочивание объектов, локализованных в палеовулканических аппаратах по величине информационного веса для рудного района А (на этапе «обучение»)

1 — объекты обучения, 2 — объекты контроля

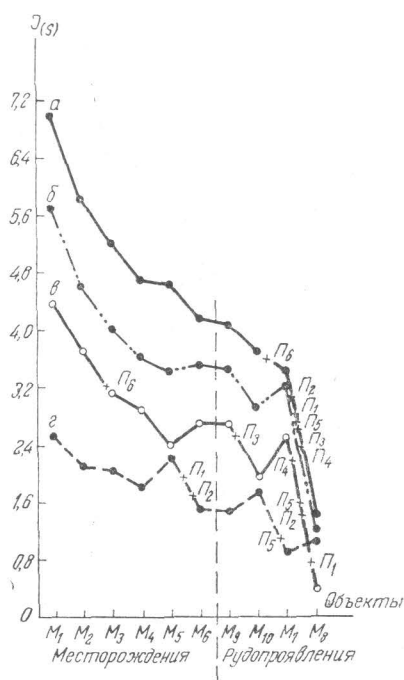


Рис. 4. Упорядочивание объектов, локализованных в палеовулканических аппаратах, по величине информационного веса, существенно значимых признаков (для рудного района А):

а — по совокупности наиболее значимых признаков; б — по значениям легко выявляемых признаков; в — по значениям признаков, отражающих локальные геологические факторы; г — по значениям признаков, отражающих региональные геологические факторы (для объектов  $\Pi_3, \Pi_4, \Pi_6$  величины  $1(s) < 0,9$ )

и мелкие объекты. При этом отдельные рудопроявления могут быть классифицированы как мелкие месторождения.

Исследованиями также установлено, что информационные веса строк (объектов), определенные по региональным критериям, характеризуются повышенными значениями для месторождений и пониженными для рудопроявлений, хотя на отдельных рудопроявлениях информационные веса критериев соизмеримы с таковыми для месторождений (см. рис. 4, г). Это не позволяет использовать только одни региональные критерии для определения масштабов оруденения.

Локальные критерии определяют масштаб оруденения в том случае, если на объектах выделены благоприятные региональные критерии (см. рис. 4, в). Учет лишь одних локальных критериев (без региональных) также не позволяет дать уверенную оценку перспективности объектов. Так, например, объекты  $M_9$  и  $\Pi_3$ , относящиеся к группе рудопроявлений, по локальным критериям оцениваются как мелкие месторождения. Это обусловлено либо значительным удалением объекта от рудоподводящих структур первого и второго порядков ( $\Pi_9$ ), либо их



слабой предрудной активизацией ( $M_9$ ). Эти же объекты находятся далеко за пределами крутопадающих структур внедрения гранитоидных массивов.

Таким образом, при прогнозе масштабов оруденения, локализованного в вулканических аппаратах, необходимо рассматривать сочетание региональных и локальных критериев. Это значит, что в процессе поисково-разведочных работ надо правильно сочетать постановку горно-буровых работ непосредственно на объектах с геологосъемочными работами на площади рудного поля, причем соотношение этих видов работ можно подсчитать, используя развиваемый в данной работе метод.

Важность выделенных критериев прогноза масштаба оруденения подтверждается проверкой, проведенной на объектах контроля ( $P_1-P_6$ ). Вулканические аппараты, выбранные в качестве контрольных, по данным детальных разведочных работ оцениваются как рудопроявления. Положение этих объектов на графике, характеризующем изменение информационного веса объектов, приведено на рис. 3 и 4. Контрольные объекты располагаются в нисходящей ветви кривой, что вполне согласуется с масштабом этих объектов и, следовательно, подтверждается надежность их классификации.

Таким образом, приведенные кривые прогноза (см. рис. 3 и 4), полученные на основании исследования объектов обучения и контроля, позволяют оценивать масштаб оруденения, локализованного в вулканических аппаратах, по выделенному из общей совокупности минимальному количеству геологических признаков.

Важно отметить, что выявление этих признаков, а, следовательно, и прогнозная оценка масштаба этого типа оруденения в рассматриваемом рудном районе, возможна уже на начальной стадии поисково-разведочных работ.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Проведенное исследование показывает, что существует зависимость между геологическими факторами, определяющими условия локализации оруденения в вулканических аппаратах, и его масштабом. Эта зависимость обнаруживается при вычислении информационного веса объектов.

2. Анализ логически связанных признаков позволяет выделить среди них наиболее информативные, определяющие в основном масштаб оруденения. Наиболее информативные признаки (геологические критерии) делятся на региональные и локальные. Положение вулканического аппарата на площадях с выявленными благоприятными региональными критериями является необходимым, но недостаточным условием локализации в его пределах промышленного оруденения. Сочетание локальных и региональных критериев позволяет производить в пределах определенного региона прогнозную оценку масштаба оруденения в вулканических аппаратах.

3. Прогнозирование масштаба оруденения в вулканических аппаратах может основываться на комплексе региональных и легко выявляемых локальных критериев. При этом возможно, что часть рудопоявлений будет классифицирована как мелкие месторождения.

Информация о региональных и легко выявляемых локальных критериях может быть получена на начальном этапе поисково-разведочных работ путем анализа геологических карт масштаба 1 : 200 000—1 : 25 000 и специализированных геологических карт масштаба 1 : 10 000—1 : 2 000. При составлении крупномасштабных карт особое внимание следует обращать на расшифровку внутреннего строения вулканических аппаратов.

4. Результаты проведенных исследований указывают на эффективность примененного метода дискретного анализа. Это позволяет рассчитывать на успех данного метода при использовании его для обработки обширной геологической информации с целью прогнозирования возможных масштабов гипогенного оруденения различных типов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А. Н., Журавлев Ю. И., Кренделев Ф. П. О математических принципах классификации предметов и явлений. «Дискретный анализ», вып. 7, 1966.
2. Кренделев Ф. П., Дмитриев А. Н., Журавлев Ю. И. Сравнение геологического строения зарубежных месторождений докембрийских конгломератов с помощью дискретной математики. Докл. АН СССР, т. 173, № 5, 1967.
3. Харкевич А. А. О выборе признаков при машинном опознавании. Изв. АН СССР, ОТН, № 2, 1963.
4. Яковлев П. Д. Структурные типы рудных полей и месторождений, связанных с вулканогенными формациями. Изв. АН СССР, серия геол., 1967, № 9.

Всесоюзный институт минерального сырья  
Институт геологии и геофизики  
СО АН СССР,  
Институт математики СО АН СССР

УДК 553.46:681.142:001.41