

минералообразования имеет место прямая зональность, объясненная Д. С. Коржинским (1948) на примере Турьинского месторождения как геотермическая. Ее возможность для норильских месторождений подтверждается и М. Н. Годлевским (Годлевский и др., 1962), который добавляет, что при прогреве вмещающих пород влияние их состава имеет большее значение, чем мощность интрузии.

Исключительно важное значение при рудообразовании играл режим серы и кислорода, изменяющийся по мере остывания растворов. По мнению Д. С. Коржинского (1957), отложение титаномagnetитового и сульфидного оруденения — это проявление кислотной стадии послемагматических растворов в среде пород основного состава, причем высокотемпературный метасоматоз начинался в условиях относительно высокого кислородного потенциала и невысоких потенциалов серы, что привело к образованию титаномagnetита и крупных зерен magnetита во вкрапленных рудах и большого количества этих минералов на контактах сульфидных жил. Дальнейшее возникновение сульфидов иллюстрируется диаграммами парагенезисов минералов в системах $Fe-S-O$, $Cu-Fe-S-O$, $Fe-Ni-S$, $Fe-Ni-S-O$, построенными А. Г. Бетехтиным и А. Д. Гепкиным (Бетехтин, 1950, 1951).

Как показано в последнее время (Дистлер и др., 1975), в сплошных медно-никелевых рудах Талнахского и Октябрьского месторождений имеют место два типа зональности, а именно: 1) простая со сменой преобладающей пирротиновой ассоциации преобладающей халькопиритовой ассоциацией; 2) сложная, в которой помимо пирротиновой ассоциации наблюдается парагенезис кубанита с железистым пирротинном, троилитом и минералами группы халькопирита. Интересно, что каждому типу зональности, как установлено этими авторами, присущи свои особенности распределения рудных и редких элементов. В случае простой зональности характерно монотонное изменение элементов, в то время как для сложной проявляются экстремумы. Различия в накоплении элементов в этих двух типах зональности они склонны связывать «с особенностями поведения серы при дифференциации сульфидных расплавов в зависимости от условий их остывания» (Дистлер и др., 1975, с. 27), причем первый тип зональности возникает, по их мнению, при относительно высокой концентрации серы, а второй — при ее нехватке. Точнее, даже делается предположение о высоком и низком потенциале серы в этих двух случаях возникновения зональности, что явно не согласуется с допускаемой ими субстанцией сульфидного расплава, а скорее указывает на воздействие соответствующих по составу рудоносных растворов.

Глава 7

ПЕРСПЕКТИВЫ РУДОНОСНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ИНТРУЗИЙ СЕВЕРА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ)

Несмотря на открытие Талнахского рудного узла, на севере Сибирской платформы, в том числе в Норильском районе, интенсивные поиски новых месторождений медно-никелевых руд продолжают. Вполне очевидно, что пора успешного прироста запасов за счет легко открываемых месторождений в этом районе прошла, и поэтому особую роль сейчас приобретают геофизические, геохимические, гидрогеологические, минералого-

петрографические и другие виды исследований, основанные на использовании косвенных признаков оруденения, характеризующих в целом ту обстановку, которая наиболее благоприятна для появления промышленных концентраций минерального сырья. Большой диапазон косвенных признаков, фиксируемых при геологических исследованиях (геохимических, петрохимических, минералого-петрографических и т. д.), обуславливает появление обширной разнообразной информации, оперативная и качественная переработка которой возможна только с помощью современных электронно-вычислительных машин и специально разработанных математических методов.

Учитывая, что основной объем геологической информации имеет главным образом логико-описательный характер, для ее обработки применимы логико-математические методы, развиваемые в последнее время для решения широкого круга геологических задач. В основе этих методов лежит как детерминистский подход, заключающийся в том, что заранее установлена или предполагается (по единичным наблюдениям и указаниям) причинно-следственная связь между явлениями, так и вероятностный, учитывающий неполноту информации о характере установленных связей между исследуемыми геологическими событиями. Разработка логико-математических методов применительно к решению геологических задач в настоящее время находится в стадии своего последовательного развития, но уже первые результаты, полученные с использованием этих методов, обнадеживают. Так, в Московском институте нефтяной и газовой промышленности они успешно применялись для разделения нефтеносных и водонасыщенных пластов, а также для разбраковки газоносных и пустых структур (Волков, 1968). Среднеазиатским институтом геологии и минерального сырья сделана попытка выделения перспективных участков в пределах месторождений гидротермальных руд (Мацак, 1969); Московским университетом выделение перспективных участков производилось на основе геохимических признаков (Иванов, Кошогоров, 1971). Обширные работы ведутся в ИГЕМе по выявлению поисковых критериев и разработки месторождений касситерит-сульфидных руд Забайкалья (Константинов, Дмитриев, 1970). Перечисленные примеры достаточно убедительно говорят о серьезном внимании специалистов, занимающихся сравнительным изучением месторождений полезных ископаемых, к возможностям математических исследований с целью прогнозирования перспективных площадей и потенциально рудоносных объектов.

7.1. ПОСТАНОВКА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Под постановкой геологической задачи в данной работе понимается такой процесс формулирования задачи, в котором учитываются следующие основные моменты: 1) определение целей исследования; 2) выделение объектов исследования; 3) организация пространства признаков; 4) указание возможных средств решения задачи. Все эти моменты тесно взаимосвязаны, и в каждом конкретном случае в процессе постановки задачи может быть разная последовательность в их взаимодействии.

Общезвестно, что с дифференцированными трапповыми интрузиями Сибирской платформы связано медно-никелевое оруденение, масштабы проявления которого различны — от промышленных концентраций до исчезающе малых количеств полезных компонентов. Основная масса дифференцированных трапповых интрузий сосредоточена в северной, точнее в северо-западной части Сибирской платформы, где их пространственное положение контролируется зонами крупных тектонических нарушений и, главным образом, верхними горизонтами платформенного чехла. Вопросам геолого-структурного положения дифференцированных трапповых интрузий

зий посвящена обширная литература (Урванцев, 1973; Люлько и др., 1973; Виленский, 1973; и др.).

К настоящему времени на севере Сибирской платформы обнаружено несколько десятков дифференцированных интрузий, имеющих как черты сходства, так и определенные различия в строении, минеральном и петрохимическом составе и т. д. Большинство из них представляет собой полого-залегающие пластинообразные (хонолитоподобные) тела, имеющие раздувы и пережимы и выклинивающиеся в бортовых и головных частях. Средняя мощность интрузий не превышает 150—170 м при ширине тел до 1,5 км. По падению некоторые массивы прослежены на 10—15 км, причем угол падения тел увеличивается по мере погружения. Для внутреннего строения интрузий, как правило, характерно трехчленное деление (сверху вниз) на безоливиновые, оливинсодержащие и обогащенные оливином троктолитовые или пикритовые габбро-долериты, связанные друг с другом постепенными переходами. В том же направлении происходит закономерное изменение химических составов пород и минералов; уменьшается общая железистость пород, повышается магnezиальность оливина, основность плагиоклаза и т. д.

Строение многих интрузий осложняется присутствием грубозернистых такситовых (пегматоидных) тел габбро-долеритов, располагающихся, как правило, в эндоконтактовых зонах массивов параллельно контактам. Мощность тел такситовых габбро-долеритов колеблется в очень широких пределах, редко превышая первые метры. Проявление сульфидных руд, если они есть, в своей основной массе приурочено к нижним горизонтам интрузий — к пикритовым (троктолитовым) и нижним такситовым габбро-долеритам, изредка они встречаются в верхних горизонтах и в зонах экзоконтакта. Воздействие интрузий на вмещающие породы проявляется в их ороговиковании и метасоматическом преобразовании, иногда значительном. Вопросы петрологии и рудоносности дифференцированных трапшových интрузий рассматриваются в многочисленных статьях и монографиях (Виленский, 1967; Годлевский, 1959, 1968; Золотухин, 1964; Золотухин, Васильев, 1967; Коровяков и др., 1963; Смирнов, 1966; и др.).

Степень изученности массивов далеко не одинакова и зависит от целого ряда факторов, прежде всего от их потенциальной рудоносности. В процессе поисков, разведки и эксплуатации наиболее разнообразная и обширная информация накапливается, вполне естественно, по промышленным месторождениям, последовательно убывая для объектов, рудоносность которых считается менее перспективной или не представляет практического интереса.

Эмпирически уже давно установлена связь сульфидного медно-никелевого оруденения с дифференцированными трапшowymi интрузиями, обладающими определенным набором признаков: высокой степенью дифференцированности, присутствием в строении тел пикритовых и такситовых габбро-долеритов и т. д. Но эти же признаки нередко характерны и для нерудных интрузий. Поэтому определяющим прямым поисковым признаком всегда служило наличие в породах сульфидного оруденения (вкрапленного или прожилково-вкрапленного), что было решающим фактором для постановки дальнейших поисково-разведочных работ.

Исследователи неоднократно пытались выявить косвенные поисковые признаки (геохимические, минералого-петрографические, петрохимические, геолого-структурные и т. д.) рудоносных интрузий и тем самым найти признаки их отличия от подобных нерудоносных тел. Но поскольку в этом случае многие поисковые признаки устанавливались на наиболее полно изученных объектах, они оказались неприемлемыми для менее изученных массивов из-за отсутствия необходимой информации, т. е. число сравниваемых объектов ограничивалось только наиболее хорошо изученными интрузиями. Кроме того, степень существенности (важности) любого из предполагаемых критериев оставалась неопределенной.

В связи с этим поставленная нами задача оценки рудоносности и разбраковки дифференцированных интрузий методом логико-математической обработки информации сводилась на первом этапе исследования к отбору таких признаков, которые были бы общими для всех исследованных объектов. Это существенно ограничивает количество признаков, участвующих в решении задач, но не исключает их увеличения при получении информации одного уровня для всех или большинства объектов.

На первом этапе исследований нами (Дмитриев и др., 1968; Васильев и др., 1973) была собрана исходная информация одного признакового пространства по 27 дифференцированным интрузиям севера Сибирской платформы. Перечень признаков (31 признак), характеризующих объекты, контролировался как требованиями методов их обработки, так и профессиональным опытом в работе с объектами. Согласно требованиям метода и способам кодирования, всем признакам были приданы значения: 1 — признак выполнен, 0 — признак не выполнен, прочерк — информация отсутствует. Все признаки были разделены на четыре группы (I — петрохимические, II — минералогические, III — признаки строения интрузий, IV — геолого-тектонические), каждая из которых обладает содержательной общностью в рамках геологического описания. Вся отобранная информация была сгруппирована в виде основной и вспомогательных таблиц решения, обработка которых производилась по методу тестов (на тестовом и тесторном комплексе программ для машин М-222, БСЭМ-6).

Профессионально выделенные группы объектов, именуемые «рудопроявления» и «пробы», сравнивались с наиболее хорошо изученными эталонными объектами группы «месторождения». Было проведено упорядочивание объектов по информационным весам, выявлена последовательность значимости групп признаков, установлены комплексы признаков для типа в целом и для каждой группы объектов и т. д.

Не останавливаясь подробно на полученных результатах, изложенных в опубликованных работах (Дмитриев и др., 1968; Васильев и др., 1973), подчеркнем, что первый опыт логико-математической обработки информации по дифференцированным трапповым интрузиям подтвердил существенность многих поисковых признаков, выявленных ранее геологами эмпирическим путем. Множественность учитываемых признаков обуславливается тем, что оценка перспективности дифференцированных трапповых интрузий на сульфидное медно-никелевое оруденение проводится по совокупности косвенных признаков, не имеющих прямого отношения к оруденению. В этом, собственно, главное и наиболее существенное отличие данного метода от прямых поисковых методов. Естественно, что если имеется прямая информация по оруденению, допускающая иные методы оценки перспективности интрузий, то во внимание должна приниматься их комплексная оценка этими поисковыми методами, в значительной мере дополняющими друг друга.

Полученные результаты и дальнейшие методические разработки позволили перейти к решению задачи оценки перспектив рудоносности дифференцированных трапповых интрузий севера Сибирской платформы на качественно более высоком уровне.

По сравнению с предыдущим этапом были увеличены пространство признаков с 31 до 40 (главным образом за счет петрохимических и минералогических) и количество объектов с 27 до 68. Решение задачи также усложнилось. Развитие методов в их разветвленном комплексе алгоритмов и программ позволило учитывать информацию не только качественного («да» и «нет»), но и количественного характера, а также отрабатывать совместно или связанно-параллельно геологические сведения различной природы.

Для оценки рудоносности и разбраковки дифференцированных интрузий логико-математическими методами обработки информации было проведено целевое разбиение всех исходных интрузий на группы в соответст-

Список признаков, характеризующих дифференцированные трапповые интрузии

Номер объекта	Название признака
1	2
<i>I. Геолого-тектоническая обстановка</i>	
1	Связь интрузий с глубинными разломами
2	Наличие метасоматитов в экзо- и эндоконтактных зонах
3	Наличие скарнов
4	Присутствие дифференциальных серий лав во вмещающих толщах
5	Наличие пикритовых базальтов во вмещающих вулканогенных образованиях
6	Наличие субщелочных траппов во вмещающих вулканогенных образованиях
7	Туфогенно-лаваовая толща и интрузивные породы базальтоидного состава в нижнем экзоконтакте
8	Конгломераты, песчаники, сланцы в нижнем экзоконтакте
9	Карбонатно-глинистые породы, ангидрит, гипс в нижнем экзоконтакте
10	Туфогенно-лаваовая толща и интрузивные породы базальтоидного состава в верхнем экзоконтакте
11	Конгломераты, песчаники, сланцы в верхнем экзоконтакте
12	Карбонатно-глинистые породы, ангидрит, гипс в верхнем экзоконтакте
<i>II. Внутреннее строение интрузивных тел</i>	
13	Характер дифференцированности (трех- и двучленное строение)
14	Наличие нижних такситовых габбро-долеритов
15	Наличие верхних такситовых габбро-долеритов
16	Наличие пикритовых габбро-долеритов
17	Присутствие кислых гибридных пород в кровле интрузий
18	Форма интрузий (хонолит или другая)
19	Наличие «эрузивных брекчий» в периферических частях интрузий
<i>III. Минералогические признаки</i>	
20	Железистость оливинов нижних горизонтов
21	Железистость оливинов верхних горизонтов
22	Присутствие ортопироксена в нижних дифференциатах интрузий
23	Основность плагиоклаза нижних горизонтов
24	Наличие биотита
25	Присутствие неправильных выделений титаномагнетита
26	Наличие сульфидной вкрапленности в нижних горизонтах
27	Наличие сульфидной вкрапленности в верхних горизонтах
28	Проявление жильного сульфидного оруденения
29	Наличие скаполита
<i>IV. Петрохимические признаки</i>	
30	Магнезиальность предполагаемого исходного расплава (по средневзвешенным или средним величинам, вес. %)
31	Железистость предполагаемого исходного расплава: $\frac{(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3) \times 100}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}$ (мол.%)
32	Содержание щелочей в предполагаемом исходном расплаве (вес.%)
33	Калиевость предполагаемого исходного расплава: $\frac{\text{K}_2\text{O}}{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}} \times 100$ (мол.%)
34	Кремнекислотность (SiO_2 — в атомных количествах) предполагаемого исходного расплава
35	Щелочность — кислотность предполагаемого исходного расплава: $\frac{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \cdot 1000}{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$ (ат.%)
36	Условный полный потенциал для предполагаемого исходного расплава
37	Магнезиальность наиболее богатых оливином горизонтов (вес.%)
38	Степень магнезиальности наиболее богатых оливином горизонтов: $\frac{\text{MgO}}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}} \times 100$ (вес.%)

1	2
39	Содержание щелочей в наиболее богатых оливином горизонтах (вс. %)
40	Степень дифференциации интрузий: АК. Ф. = $\frac{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}} \times 100$ (верхний дифференциат) — $\frac{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}} \times 100$ (нижний дифференциат)

вии с масштабами проявления сульфидного медно-никелевого оруденения и уровнями детальности (подробности) этого разбиения. Подобное разбиение интрузий на группы и уровни детальности было использовано нами несколько ранее, где задача оценки перспектив трапловых интрузий севера Сибирской платформы решалась логико-дискретным методом (по 62 интрузиям) с учетом длин тесторов и К-тесторов. Основные результаты, полученные при этом, освещены в печати (Бишаев, Карбышев, 1974; Васильев и др., 1974). Ниже более подробно излагаются только результаты, полученные с помощью нового метода «Целевой итерационной классификации» (Бишаев, 1973, 1974).

Первому уровню детальности соответствует наиболее общее целевое разделение всех имеющихся интрузий на две группы: с проявленным оруденением — «продуктивные» (соответственно номера объектов из табл. 7.2 — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 42, 44, 45, 46, 50, 52, 54, 55, 57, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68) и непроявленным оруденением — «пустые» (38, 39, 40, 43, 47, 48, 49, 51, 53, 56, 58, 59, 60).

Второму уровню детальности соответствует целевое разделение всех интрузий с проявленным оруденением (продуктивные) на группы: с промышленными масштабами оруденения — «месторождения» (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 33), с непромышленными масштабами оруденения — «рудопоявления» (21, 23, 25, 26, 32, 34, 35, 36, 37) и на группу «неизвестных» объектов относительно их сортировки на месторождения и рудопоявления (13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 41, 44, 45, 46, 50, 52, 61, 62).

Третьему уровню детальности соответствует целевое разделение всех месторождений на группы: «более значимые» — крупные (1, 2, 3, 4, 5), «менее значимые» — мелкие (7, 8, 9, 10) и «неизвестные» относительно этого разделения (6, 11, 12, 33).

Количество исследованных интрузий было значительно увеличено главным образом за счет массивов северного и восточного бортов Тунгусской синеклизы, по которым была собрана необходимая информация одного уровня. Распределение этих интрузий на обширной территории Сибирской платформы можно видеть на приводимой схеме (рис. 7.4). Основная масса изученных интрузий сосредоточена в северо-западной части Сибирской платформы, где располагаются наиболее крупные и хорошо изученные месторождения данного типа. В других районах количество интрузий, взятых для исследований, меньше, и распределены они крайне неравномерно, что обусловлено геологической обстановкой, более слабой изученностью этих районов и неполнотой информации по другим массивам, имеющимся здесь, но не отмеченным на схеме.

Все выбранные для исследований объекты охарактеризованы одним и тем же пространством признаков, разделенным на четыре группы: I — геолого-тектоническая обстановка, II — признаки строения интрузий, III — минералогические, IV — петрохимические.

Выбор признаков, характеризующих объекты, оценка их важности и необходимости определяется уровнем имеющейся информации по этим



Рис. 7.1. Локализация сопоставляемых дифференцированных интрузий (см. табл. 7.2) на территории Сибирской платформы.

объектам и целевым заданием. В принципе любой объект может быть всесторонне охарактеризован многими десятками и даже сотнями признаков. Однако для целей диагностики, классификации или распознавания выбирается необходимое количество признаков, обусловленное четко сформулированным целевым заданием. Выбор признаков осуществляется на профессиональном уровне, на основании логических принципов и представлений о взаимосвязи признаков, наиболее полно и глубоко характеризующих объекты для достижения указанной цели. Вполне понятно, что

при этом выбираются те признаки, значения которых известны и имеют реальный смысл для всех рассматриваемых объектов. Необходимо, чтобы признаки отражали реально существующую обстановку, а не субъективные мнения или недостоверные наблюдения.

Руководствуясь этими положениями, после коллективного обсуждения со всеми заинтересованными лицами из Норильской экспедиции КТГУ пространство признаков было ограничено цифрой 40 при почти равном их распределении по группам (см. табл. 7.1). Так, в группу признаков геолого-тектонической обстановки были включены признаки, характеризующие состав пород вмещающих интрузий и главные тектонические элементы локализации интрузивных тел (приуроченность массивов к зонам крупных тектонических нарушений, их локализация во вмещающих породах и т. д.).

Вторая группа признаков характеризует особенности внутреннего строения интрузивных тел: характер дифференцированности, наличие в строении массивов таких горизонтов, как пикритовые (троктолитовые) и такситовые габбро-долериты, форма интрузий и т. д. Все эти признаки тесно взаимосвязаны друг с другом и отражают главные специфические особенности внутреннего строения интрузивных тел.

Третья группа объединяет минералогические признаки. Из обширной минералогической информации были выбраны и внесены в таблицу десять признаков, характеризующих, по нашему мнению, главные минеральные особенности интрузивных тел согласно заданной цели. К таким признакам относятся железистость оливинов нижних и верхних горизонтов интрузий; присутствие в нижних горизонтах ортопироксена, хромита, биотита и сульфидной вкрапленности; основность плагиоклаза в нижних горизонтах и ряд других.

Петрохимические признаки, составляющие четвертую группу, разносторонне характеризуют химизм пород дифференцированных интрузий и в целом, и отдельных их горизонтов. Такие параметры, как магнезиальность, железистость, содержание щелочей, калиевость, кремнекислотность, условный ионный потенциал предполагаемого исходного расплава и степень дифференциации, относятся к интрузиям в целом. Ряд других признаков (магнезиальность, щелочность и т. д.) характеризует наиболее богатые оливином (пикритовые и троктолитовые) горизонты интрузий. Естественно, что химизм пород тесно взаимосвязан с особенностями их минерального состава.

После характеристики каждого объекта вся информация была приведена к табличному виду (табл. 7.2), где указаны названия объектов и значения по каждому признаку (названия признаков не приводятся, а берется нумерация соответственно каждому признаку в табл. 7.1). Арылахская интрузия взята в двух вариантах:

1) Арылахская — более ранние данные, учитывающие присутствие в ней пикритовых габбро-долеритов (по материалам НИИГА);

2) Арылахская-I — более поздние данные (О. А. Дюжиков) по материалам бурения, не обнаружившего пикритовых габбро-долеритов в составе интрузии.

Весь материал представлен 68 объектами, охарактеризованными 40 признаками, из которых 26 качественные и 14 количественные. Геологическая задача, подлежащая решению, сформулирована следующим образом: на основе фиксированного массива информации и целевого подразделения всех интрузий на группы, с помощью средств математической обработки оценить по совокупности косвенных признаков перспективность дифференцированных траптовых интрузий (из групп «неизвестные») севера Сибирской платформы на сульфидное медно-никелевое оруденение и выявить среди них признаки рудоносных интрузий.

7.2. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

В настоящей работе формализованное решение геологической задачи проводится как решение задачи автоматической классификации, поэтому сначала кратко охарактеризуем, что в данном случае понимается под задачами автоматической классификации. Под классификацией объектов исследования нами понимается формирование классов объектов (выделение определенных совокупностей объектов исследования), а также установление соподчиненности (например, упорядочение) объектов внутри данного класса или классов в целом. Класс — это множество объектов исследования, объединенное в одно целое и отличающееся от других объектов (множеств объектов) по одному или нескольким существенным признакам, имеющим определенное целевое назначение. Под классифицированием «неизвестных» объектов (проб) понимается их сравнение с заданными образцами, эталонными представителями классов, и последующее принятие решений о принадлежности каждой из проб к тому или иному классу (Якушкин, 1973).

Задачи классификации, поставленные в формализованном виде и решаемые с помощью автоматических средств (например, ЭВМ), назовем задачами автоматической классификации (соответственно для задач классифицирования — задачи автоматического классифицирования). Отметим, что задачу автоматической классификации часто понимают как задачу формирования (выделения) классов (таксонов) в фиксированном пространстве характеристических признаков с последующим классифицированием проб относительно этих классов (Дорофеев, 1972; Загоруйко, 1972; Вапник, Червонинкис, 1974). Между тем в качестве объекта исследования, в зависимости от целей, может выступать либо объект сам по себе (в данном случае дифференцированные трапшевые интрузии), либо его описания (в данном случае 40 характеристических признаков). Когда объектом исследования являются признаки, а классификация (таксономия) самих объектов фиксируется (задается заранее), то возникает другой тип задачи автоматической классификации, именуемой задачей распознавания образов, включающей в себя этап «обучения» (выбор информативной системы признаков) и этап классифицирования проб. Поэтому задачи таксономии и распознавания образов естественно рассматривать, как два разных типа задач автоматической классификации. Принятие же решений относительно «неизвестных» объектов (проб) как в том, так и в другом случае предлагается называть классифицированием, и лишь когда необходимо подчеркнуть, на основе решения какого типа задач проводится классифицирование, называть либо таксономией проб, либо распознаванием проб.

На базе вышеизложенной трактовки вопроса классификации в задачах автоматической классификации различаются два основных типа (Билаев, Карбышев, 1974):

1) задачи таксономии, которые включают в себя «классификацию объектов» — процедурное выделение из множества объектов однородных совокупностей (формирование классов), установление целевой соподчиненности объектов или классов по заданному (фиксированному) пространству признаков, а также классифицирование «неизвестных» объектов (таксономия проб);

2) задачи распознавания, которые включают в себя «классификацию признаков» — процедурное выделение информативной системы признаков из исходной для получения заданной (целевой) классификации и классифицирование «неизвестных» объектов (распознавание проб).

Развитые в данной работе формализованные процедуры решения геологической задачи включают в себя постановку и решение задачи второго типа. Отметим некоторые особенности для этой задачи, решение

которой в основном преследует цель из исходной системы признаков получить информативную систему, с определенной точностью обеспечивающую заданную (целевую) классификацию (именно в этом смысле система признаков и является информативной). Содержательно заданной классификацией или целевой классификацией будем считать классификацию объектов, которая задается на профессиональном уровне геологом-исследователем с помощью целевого признака.

Целевой признак — это оценка свойства, определяемая из суждения (высказывания) относительно практически полезного свойства объекта или количественного выражения этого свойства, в котором и отражена сущность заданной целевой классификации объектов.

В соответствии с видом целевого признака исходное множество объектов подразделяется на классы дискретно или непрерывно (например, целевой признак «запасы месторождений» количественный и разбивает исходное множество месторождений на классы непрерывно; качественный целевой признак «месторождения и рудопроявления» разбивает исходное множество объектов на два класса — дискретно).

В схемах процедур поиска информативной системы признаков направляющим критерием служит «требование цели» (целеуказание), т. е. сравнительное изучение объектов, классов объектов по принципу сходства и различия. Выделим три варианта требования цели: разделять объекты разных классов; отождествлять (объединять) объекты одинаковых классов или внутри одного класса; сочетание первых двух требований (например, одновременно различать объекты разных классов и отождествлять объекты внутри каждого класса).

В результате решения с помощью ЭВМ исследователь получает информативную систему признаков (классификацию признаков), которая обеспечивает с определенной точностью заданную классификацию объектов. Определенность здесь может быть двойкая: содержательная, когда ответ на вопрос, что считать за лучшее обеспечение целевой классификации, имеет естественно-логическую (интуитивную) основу, и формализованная, когда оказывается возможным это понятие формализовать (т. е. когда введен функционал, зависящий от разделения точек на группы, и значимость приближения к цели определяется количественно).

Остановимся подробно на понятии «существенность (информативность) признаков», употребляющемся при решении задачи второго типа. Воспользуемся этим понятием в несколько отличающемся от общепринятого толковании. В обычном смысле существенными считаются признаки, отражающие свойства, стороны и связи объекта, без которых он существовать не может (Кондаков, 1974). В предлагаемой трактовке существенными считаются признаки, которые вносят значимый вклад в достижение целевой классификации в системе взаимного функционирования с остальными признаками. В данном случае, во-первых, математические методы, используемые для решения задачи второго типа, позволяют ввести количественную оценку существенности признака, во-вторых, существенность может определяться с учетом взаимосвязи этого признака со всеми остальными в исходной системе. Все это расширяет и углубляет возможности разносторонней оценки информативности характеристических признаков при решении задачи второго типа.

Формализованная оценка существенности (информативности) признака зависит от следующих основных факторов: выбора цели, подбора признаков относительно цели, степени строгости в постановке задачи, использования доброкачественного и представительного материала и подбора соответствующих математических средств. Эта оценка может отличаться от существенности признака в генетическом смысле. Кроме того, при формализованной оценке существенности признака могут выявиться новые связи и закономерности в его поведении и это может послужить основой для уточнения геологической существенности признака.

Неотъемлемой частью решения задачи второго типа является также минимизация пространства признаков при условии, что из исходной системы признаков может быть найдена подсистема признаков, обеспечивающая целевую классификацию. Под минимизацией понимается процесс сокращения исходного числа признаков за счет признаков, несущественных относительно цели.

Остановимся на двух основных причинах, обуславливающих необходимость минимизации исходного пространства признаков. При решении задачи второго типа исходная система признаков задается на профессиональном уровне и, несмотря на то, что признаковое пространство выбирается строго в соответствии с поставленной целью (по целевому признаку), не исключена возможность наличия среди них несущественных признаков, создающих «шумовой» фон (помехи), что резко снижает контрастность признаков по их формальной значимости относительно цели. В связи с этим могут (как правило) возрастать ошибки в получении целевой классификации. Необходимость в минимизации пространства признаков довольно часто возникает по чисто техническим причинам. На профессиональном уровне задается большое пространство признаков, и автоматический поиск информативной системы признаков становится невозможным даже на ЭВМ высокого класса. Данное затруднение может быть преодолено либо путем предварительной (доалгоритмической) минимизации, либо с применением более совершенных алгоритмов и программ, которые требуют меньших затрат времени и не снижают качества решения задачи.

После решения задачи «Классификация признаков» производится следующий шаг в работе с мобилизованной информацией: «неизвестные» объекты (пробы) подвергаются сортировке по заданным классам на основе лучшей информативной системы признаков. Отметим, что распознавание проб производится с точностью до материала обучения, представленного при решении задачи второго типа.

7.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Рассмотрим математический метод «Целевая итерационная классификация», используемый в настоящей работе для решения поставленной геологической задачи.

При решении геолого-геофизических, технических, медицинских и некоторых других задач методами автоматической классификации и распознавания образов очень важен выбор информативной системы признаков (и. с. п.), а также решающего правила в соответствии с получаемой системой признаков (Дмитриев, Журавлев, Крещелев, 1968; Загоруйко, 1972; Дорофеев, 1972; Вапник, Червошинкис, 1974). Этот выбор осложняется тем, что в практических задачах прогнозно-поискового профиля исходная информация часто задается значениями разнородных по своей природе признаков (качественных и количественных), имеющих неизвестные значения (прочерки) на некоторых объектах. Следует также отметить, что большое число алгоритмов, особенно статистического характера, осуществляет выбор и. с. п. на основе индивидуальной оценки информативности каждого признака в предположении о его связи, не зависящей от других признаков, со значениями целевого признака¹; во многих задачах (Ворошин и др., 1970) этот подход не дает достаточно хорошего результата. Поэтому естественно полагать, что необходимо построение комплекса процедур для нахождения информативной системы взаимосвязанных в целевом отношении разнородных косвенных признаков и далее для при-

¹ Целевым здесь называется признак, по которому устанавливается исходная классификация эталонных объектов.

нения решений по этим признакам. Необходимость такого комплекса процедур на основе элементов различия и сходства объектов в признаковом пространстве и полезность их использования отчетливо были вскрыты в развитии аппарата тестового подхода и его применений (Журавлев, Никифоров, 1971; Дмитриев и др., 1975).

В рассматриваемом здесь методе «Целевая итерационная классификация» («Цикл») большое внимание уделяется этапу выбора такой и. с. п., которая позволяет добиваться либо разделения эталонных объектов, либо объединения, либо пропорционального совмещения того и другого в соответствии с исходной целевой классификацией этих объектов, устанавливаемой на основе их различий и сходств по целевому признаку (Бишаев, 1973, 1974). Под и. с. п. здесь понимается такое подпространство исходных характеристических признаков, которое на основе простых сравнительных способов принятия решений (по мерам различия и сходства) дает классификацию эталонных объектов, близкую или совпадающую с их целевой классификацией.

Способы выбора информативной системы косвенных признаков, когда по каждому из них невозможно получить классификацию эталонных объектов, близкую к целевой, разнообразны и трудоемки. Чаще всего они связаны с перебором всех возможных вариантов сочетаний признаков и выбором из них лучшего, или с построением приближенных способов поиска информативного сочетания признаков. Применяемые для решения этой задачи методы базируются либо на логико-эвристических, либо на статистических процедурах (Загоруйко, 1972; Бишаев, 1974; Вапник, Червоникис, 1974). В этих случаях информативность отдельного признака оценивается «коллективно», т. е. зависит от «дополнительности» данного признака в сочетании с другими для получения целевой классификации эталонных объектов.

В методе «Цикл» получение и. с. п. проводится: во-первых, при ослаблении ограничений на исходные данные как в информационном (признаки разного вида, «прочерки»), так и в статистическом плане (без требований о независимости признаков, законе распределения, числе объектов и признаков и т. д.); во-вторых, без полного перебора, путем последовательных приближений с помощью итерационных процедур (Коллатц, 1969); в-третьих, с целевым учетом как индивидуальной «силы» признаков, так и «дополнительности» в их сочетании. Рассматриваемый метод при выборе и. с. п. и в правилах принятия решений базируется на вычислении мер различия и сходства между объектами в пространстве целевого и характеристических признаков. Содержательное обоснование метода вытекает из следующих требований к целевой классификации эталонных объектов по и. с. п.

а. Любые два объекта с заданной мерой различия по целевому признаку должны иметь не меньшую² меру различия по информативной системе характеристических признаков. Большая мера различия означает, что объекты одного класса (объекты с одинаковыми или «близкими» значениями целевого признака) в этом случае могут быть существенно неоднородны, т. е. объекты с одинаковыми значениями целевого признака могут существенно различаться по такой и. с. п.

б. Любые два объекта с заданной мерой сходства по целевому признаку должны иметь не меньшую меру сходства по и. с. п. В этом случае объекты разных классов могут быть «похожими», зато не должны существенно различаться объекты одного и того же класса.

в. Совмещение требований «а» и «б».

Значения информационных весов признаков, которые нужно найти для максимального приближения к каждому из перечисленных требова-

² Отклонение меры в большую сторону в этом случае считается несущественным для целевой классификации.

ний в целевой классификации эталонных объектов, будем называть: а) разделяющими — $(R_j)_n$, б) объединяющими — $(Q_j)_n$; в) совмещенными — $(P_j)_n$. Для количественной оценки этих требований в методе «Цикл» вначале при условии равноправия характеристических признаков вычисляются меры различия и сходства для всех пар объектов по отдельным признакам, а затем по их общему списку. В дальнейшем на основании этих мер и мер различия и сходства по целевому признаку задаются начальные значения целевых требований и производится количественная оценка информативности каждого признака, характеризующая его индивидуальную и коллективную существование относительно исходной целевой классификации объектов в первом приближении. Затем полученная в первом приближении система признаков используется для нахождения системы признаков в следующем приближении и так далее, т. е. строится итерационная последовательность. В соответствии с разными (а, б, в) требованиями к целевой классификации объектов возможен выбор п. с. п. трех видов, согласно которым в методе формулируются три правила принятия решений на основе функций, зависящих от расстояний между объектами.

Задание исходной информации и вычисление мер различия и сходства

Исходная информация представляется в виде числовой $m \times (n + 1)$ матрицы значений $T = (t_{ij})$, $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n + 1$, множества признаков (столбцов) $X = x_1, \dots, x_{n+1}$ на множестве объектов (строк) $S = s_1, \dots, s_m$, где x_{n+1} обозначает целевой признак. Задаются начальные значения (нулевое приближение) информационных весов характеристических признаков³, например $P_1^{(0)} = P_2^{(0)} = \dots = P_n^{(0)}$, где $\sum_{j=1}^n P_j^{(0)} = 1$ —

условие нормировки. Совместное рассмотрение информации различной природы в соответствии с разными видами шкал признаков (Суплес, Зинес, 1967), а также признаков, содержащих «прочерки», является существенной особенностью метода. В исходной информации могут быть представлены одновременно признаки трех видов.

1. Качественные, значения которых соответствуют качественным шкалам (высказывания или наименования).

2. «Относительно количественные», значения которых соответствуют относительно количественной шкале (относительная температура по Цельсию и т. п.). К этому же виду условно относятся «порядковые признаки», значения которых заданы на шкале порядка, например твердость минералов по шкале Мооса. Если есть дополнительные сведения об относительных разрывах между последовательными номерами на этой шкале, то разность между ними должна быть пропорциональна этим разрывам. В других случаях эти разрывы в начале полагаются равными и при специальном кодировании признака (Дмитриев и др., 1975) могут в процессе работы метода устанавливаться автоматически в соответствии с целевым признаком.

3. «Абсолютно количественные», значения которых соответствуют абсолютно количественной шкале (абсолютный возраст и т. п.).

Для таблицы $[m \times (n + 1)]$ в соответствии с разными видами признаков на каждом из них (x_j) , $j = 1, \dots, n + 1$, и для каждой пары эталонных объектов $(s_{i'}, s_{i'')}$, $i' = 1, \dots, m - 1$; $i'' = 1, \dots, m$; $i'' > i'$; $k = 1, \dots, M$ — номера пар, где $M = C_m^2$, вводятся способы вычисления мер различия (d_{kj}) и дополнительных к ним мер сходства (g_{kj}) , например

³ Для целевого признака считается, что $P_{n+1} = 1$.

для качественных признаков: $d_{kj}(1) = \{0 \text{ при } t_{ij} = t_{i'j}; 1 \text{ при } t_{ij} \neq t_{i'j}\}$; (1)

для «относительно количественных» признаков:

$$d_{kj}(2) = \left\{ |t_{ij} - t_{i'j}| / \left(\max_{i=1, \dots, m} t_{ij} - \min_{i=1, \dots, m} t_{ij} \right) \right\}, \quad (2)$$

где t_{ij} и $t_{i'j}$ — действительные числа любого знака. Подобные способы вычисления мер различия или сходства можно найти у разных авторов (Воронин и др., 1970);

и, наконец, для «абсолютно количественных» признаков вычислим величину

$$\delta_{kj} = \max_{i=1, \dots, m} t_{ij} / \max(t_{ij}, t_{i'j}), \text{ тогда}$$

$$d_{kj}(3) = \{0 \text{ при } t_{ij} = t_{i'j} = 0; d_{kj}(2) \times \delta_{kj}\}, \quad (3)$$

где t_{ij} и $t_{i'j}$ — действительные числа одного знака. Таким образом, эта мера построена на отношении между значениями признака, в то время как предыдущие зависят от разности.

Если по какому-либо признаку значение одного или обоих из сравниваемых объектов неизвестно («прочерк»), то во всех рассмотренных способах вычисления мер различия (d_{kj}) и сходства (g_{kj}) принимаются $d_{kj} = 0$, $g_{kj} = 0$.

С учетом начальных значений информационных весов $(P_j^{(0)})_n$ для мер различия и сходства по каждому признаку будем иметь значения $(P_j^{(0)} \cdot d_{kj})$ и $(P_j^{(0)} \cdot g_{kj})$, откуда вычисляются начальная мера различия (нормированное расстояние) $\rho_k^{(0)}$ и начальная мера сходства $\lambda_k^{(0)}$ для каждой пары эталонных объектов по всей системе характеристических признаков:

$$\rho_k^{(0)} = \sum_{j=1}^n P_j^{(0)} \cdot d_{kj}; \quad \lambda_k^{(0)} = \sum_{j=1}^n P_j^{(0)} \cdot g_{kj} = 1 - \rho_k^{(0)}, \text{ где } 0 \leq (\rho_k^{(0)}, \lambda_k^{(0)}) \leq 1. \quad (4)$$

Постановка задачи выбора и. с. п.

Вычислив по формулам (1)—(4) целевые ($d_{k, n+1}$) и характеристические ($\rho_k^{(0)}$) меры различия, а также дополнительные к ним меры сходства ($g_{k, n+1}$, $\lambda_k^{(0)}$), сформулируем в виде отношений два целевых требования ($D_k^{(0)}$, $G_k^{(0)}$) к начальной системе признаков соответственно для разделения и объединения каждой пары эталонных объектов:

$$D_k^{(0)} = d_{k, n+1} / \rho_k^{(0)}; \quad G_k^{(0)} = g_{k, n+1} / \lambda_k^{(0)}. \quad (5)$$

Численно эти целевые требования выражают «степень неинформативности» заданной системы признаков для целевого разделения или объединения одной пары эталонных объектов. Так как отношения (5) могут быть сколь угодно велики при $\rho_k^{(0)} \ll d_{k, n+1}$ или $\lambda_k^{(0)} \ll g_{k, n+1}$

(например, $d_{k, n+1} \neq 0$, $\rho_k^{(0)} \rightarrow 0$ или $g_{k, n+1} \neq 0$, $\lambda_k^{(0)} \rightarrow 0$), то в таких случаях заданная система признаков считается полностью неинформативной для целевого разделения или объединения двух объектов и необходимо изменить либо эталонную выборку (удалением одного из этих объектов или обоих одновременно), либо исходную систему признаков (путем включения новых признаков, а также частичной или полной замены старых). Поэтому область определения начальных целевых требований задается неравенством: $0 \leq (D_k^{(0)}, G_k^{(0)}) \leq C$, где $C \neq \infty$ (ограничительное условие). Поскольку $g_{k, n+1} = 1 - d_{k, n+1}$; $\lambda_k^{(0)} = 1 - \rho_k^{(0)}$, для любого $k =$

$= 1, \dots, M$ между $D_k^{(0)}$ и $G_k^{(0)}$ (5) в зависимости от значений информационных весов $(P_j^{(0)})_n$ всегда имеет место одно из следующих соотношений⁴:

$$\text{а) } D_k^{(0)} < 1 \Leftrightarrow G_k^{(0)} > 1; \quad \text{б) } D_k^{(0)} > 1 \Leftrightarrow G_k^{(0)} < 1; \quad \text{в) } D_k^{(0)} = 1 \Leftrightarrow G_k^{(0)} = 1. \quad (6)$$

Рассмотрим три варианта комбинаций из этих соотношений на всем множестве пар целевых требований ($k = 1, \dots, M$), при которых будем считать систему признаков полностью информативной: 1) для целевого разделения эталонных объектов, если выполнены только «а» и «в» (т.е. $D_k^{(0)} \leq 1$); 2) для целевого объединения этих объектов при выполнении только «б» и «в» (т.е. $G_k^{(0)} \leq 1$); 3) для целевого пропорционального совмещения, разделения и объединения эталонных объектов при выполнении только «в» (т.е. $D_k^{(0)} = G_k^{(0)} = 1$). Поэтому зададим три варианта мер $(I_1^{(0)}, I_2^{(0)}, I_3^{(0)})$ для оценки информативности начальной системы признаков соответственно с разделяющими $(R_j^{(0)})_n$, объединяющими $(Q_j^{(0)})_n$ и совмещенными $(P_j^{(0)})_n$ весами:

$$1) I_1^{(0)} = M / \sum A_k^{(0)}; \quad 2) I_2^{(0)} = M / \sum B_k^{(0)}; \quad 3) I_3^{(0)} = (I_1^{(0)} + I_2^{(0)}) / 2, \quad (7)$$

где $A_k^{(0)} = \{1 \text{ при } D_k^{(0)} \leq 1, D_k^{(0)}\}$; $B_k^{(0)} = \{1 \text{ при } G_k^{(0)} \leq 1, G_k^{(0)}\}$. Оче-

видно, что область определения данных мер информативности — это $0 \leq (I_1^{(0)}, I_2^{(0)}, I_3^{(0)}) \leq 1$, где $I = 1$ — полностью информативная система признаков. Задача выбора и. с. п. состоит в том, чтобы для каждой меры $I_1^{(0)}, I_2^{(0)}, I_3^{(0)}$ построить правило нахождения значений $(R_j^{(1)}, Q_j^{(1)}, P_j^{(1)})$, дающих ее максимум. Это значит найти систему признаков, называемую информативной, с таким набором значений информативных весов $(R_j^{(1)}, Q_j^{(1)}, P_j^{(1)})_n$, при котором целевые требования к этой системе максимально приближаются к таковым для полностью информативной системы признаков. Это приближение оценивается в среднем по всем парам эталонных объектов в соответствии со значениями мер $I_1^{(1)}, I_2^{(1)}, I_3^{(1)}$.

Нахождение первого приближения к и. с. п.

Рассмотрим правило нахождения информационных весов $(P_j^{(1)})_n$, дающих первое приближение к полностью информативной системе признаков в третьем варианте пропорционального совмещения целевых требований разделять и объединять объекты.

Согласно (5) и (6), целевое требование $D_k^{(0)} > 1$ показывает, во сколько раз $\rho_k^{(0)}$ должна быть больше, чтобы система признаков стала полностью информативной для целевого разделения данной пары эталонных объектов; $D_k^{(0)} < 1$ означает, во сколько раз $\rho_k^{(0)}$ может быть меньше, чтобы система признаков все еще оставалась полностью информативной для целевого разделения двух объектов. То же самое можно сказать относительно $G_k^{(0)}$ в смысле целевого объединения пары эталонных объектов. В связи с этим будем использовать оба значения целевых требований $D_k^{(0)}, G_k^{(0)}$ в качестве коэффициентов «поощрения» или «наказания» признаков при поиске более информативной системы. С учетом значений целевых требований $D_k^{(0)}, G_k^{(0)}$ введены разделяющие $r_{kj}^{(1)}$ и объединяющие $q_{kj}^{(1)}$ целевые нагрузки каждого признака в каждой паре

⁴ Знак \Leftrightarrow употребляется вместо слов «тогда и только тогда, когда...».

эталонных объектов для нахождения новой системы признаков (в первом приближении к искомой и. с. п.):

$$r_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} \cdot d_{kj} \cdot D_k^{(0)}; q_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} \cdot g_{kj} \cdot G_k^{(0)}. \quad (8)$$

Если находить суммарные целевые нагрузки каждого признака отдельно для разделения и объединения всего множества пар эталонных объектов

$$r_j^{(1)} = \sum_{k=1}^M r_{kj}; q_j^{(1)} = \sum_{k=1}^M q_{kj}, \quad (9)$$

то из них после нормировки получим разделяющие $(R_j^{(1)})_n$ или объединяющие $(Q_j^{(1)})_n$ целевые веса признаков, дающие первое приближение целевых требований к соотношениям (6а и 6в) или (6б и 6в):

$$R_j^{(1)} = r_j^{(1)} \left| \sum_{j=1}^n r_j^{(1)} \right|; Q_j^{(1)} = q_j^{(1)} \left| \sum_{j=1}^n q_j^{(1)} \right|. \quad (10)$$

Найдем совместную разделяющую и объединяющую целевую нагрузку признака для k -й пары объектов:

$$\sigma_{kj}^{(1)} = r_{kj}^{(1)} + q_{kj}. \quad (11)$$

Такая целевая нагрузка признака выражает его «весомость» для совместного разделения и объединения данной пары объектов. Логически она показывает, что в получении нового информационного веса значимость признака должна быть увеличена или уменьшена при поощрении и наказании его целевыми требованиями $D_k^{(0)}, G_k^{(0)}$ пропорционально мерам различия d_{kj} и сходства g_{kj} . При этом d_{kj}, g_{kj} учитывают индивидуальную «силу» признака, а вместе с $D_k^{(0)}, G_k^{(0)}$ учитывается целевая «дополнительность» признака для совместного разделения и объединения каждой пары объектов в сочетании с другими признаками. Ясно, что из совместной нагрузки признака $\sigma_{kj}^{(1)}$ может быть определена индивидуально-коллективная оценка его информативности для k -й пары объектов:

$$P_{kj}^{(1)} = \sigma_{kj}^{(1)} \left| \sum_{j=1}^n \sigma_{kj}^{(1)} \right|. \quad (12)$$

Вычислим суммарную целевую нагрузку каждого признака для совместного разделения и объединения всех пар эталонных объектов:

$$\sigma_{kj}^{(1)} = \sum_{k=1}^M \sigma_{kj}^{(1)}. \quad (13)$$

После нормировки получим целевой информационный вес каждого признака в первом приближении:

$$P_j^{(1)} = \sigma_j^{(1)} \left| \sum_{j=1}^n \sigma_j^{(1)} \right|. \quad (14)$$

Очевидно, что $\sum_{j=1}^n P_j^{(1)} = 1$. Эти информационные веса задают новую систему признаков, в среднем приближающую целевые требования $D_{kj}^{(1)}; G_{kj}^{(1)}$ ($k = 1, \dots, M$) к полностью информативной системе, т. е. к соотношению (6в), а интерпретация этих весов такая же, как и описанных выше целевых нагрузок признаков для отдельных пар эталонных объектов. Случай $P_j^{(1)} < \beta$ (β — порог значимого веса) показывает, что данный признак можно минимизировать (считать отсутствующим) в новой системе.

Классифицирующий оператор K и его основные свойства

Подставляя $(P_j^{(1)})_n$ вместо $(P_j^{(0)})_n$ в формулы (4), (5), (7), найдем меры различия $\rho_k^{(1)}$, сходства $\lambda_k^{(1)}$ и соответствующие им целевые требования $D_k^{(1)}, G_k^{(1)}$ к системе признаков с информационными весами в первом приближении к выбираемой и. с. п. Другими словами, имеет место последовательность операций, которая каждой паре целевых требований $(D_k^{(0)}, G_k^{(0)})$ к начальной системе признаков $(P_j^{(0)})_n$ однозначно ставит в соответствие другую пару целевых требований $(D_k^{(1)}, G_k^{(1)})$ к новой системе признаков $(P_j^{(1)})_n$. Эту последовательность операций будем называть классифицирующим оператором K .

Рассмотрим основные свойства этого оператора.

1. Возьмем одну пару эталонных объектов, для которой выполнено соотношение (6в), т. е. $D_k^{(0)} = G_k^{(0)} = 1$, и выясним действие оператора K . При нахождении новых информационных весов признаков в операции (8) имеем: $r_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} \cdot d_{kj} \cdot 1$; $q_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} \cdot g_{kj} \cdot 1$. Если для каждого признака, согласно (11), найти совместные нагрузки

$$\sigma_{kj}^{(1)} = r_{kj}^{(1)} + q_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} \cdot [d_{kj} + (1 - d_{kj})] = P_j^{(0)}$$

и по (12) определить новый информационный вес $P_{kj}^{(1)}$, то получим

$$P_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} \left| \sum_{j=1}^n P_j^{(0)} = P_j^{(0)} \right.$$

Это значит, что при условии (6в) начальные информационные веса не меняются. Поэтому результатом действия оператора в этом случае будет пара $D_k^{(1)}, G_k^{(1)}$, где $D_k^{(1)} = D_k^{(0)} = 1$ и $G_k^{(1)} = G_k^{(0)} = 1$. Это означает, что

$$D_k^{(0)} = D_k^{(1)} = 1 = G_k^{(0)} = G_k^{(1)} \quad (15)$$

при $(P_j^{(0)})_n = (P_{kj}^{(1)})_n$.

Таким образом, мы доказали, что, согласно (6в), полностью информативная система признаков для совместного целевого разделения и объединения пары объектов в результате действия оператора K не изменяется, так же как не меняются целевые требования к ней.

2. Пусть для k -й пары объектов выполнено соотношение (6б), т. е. $D_k^{(0)} > 1$ и $G_k^{(0)} < 1$. Тогда при нахождении информационных весов признаков $P_{kj}^{(1)}$ в операции (8) $D_k^{(0)}$ пропорционально поощряет различающие, а $G_k^{(0)}$ наказывает объединяющие целевые нагрузки каждого признака. Поэтому, согласно (11), для совместной целевой нагрузки любого признака

$$\sigma_{kj}^{(1)} = r_{kj}^{(1)} + q_{kj}^{(1)} = P_j^{(0)} [d_{kj} \cdot D_k^{(0)} + g_{kj} \cdot G_k^{(0)}]. \quad (16)$$

Отсюда получим информационный вес признака для случая двух объектов:

$$P_{kj}^{(1)} = \sigma_{kj}^{(1)} \left| \sum_{j=1}^n \sigma_{kj}^{(1)} \right.$$

При сравнении по (16) выражений в скобках у любых двух признаков $x_{j'}$, $x_{j''}$, для которых $d_{kj'} > d_{kj''}$, всегда будет выполнено неравенство

$$[d_{kj'} \cdot D_k^{(0)} + g_{kj'} \cdot G_k^{(0)}] > [d_{kj''} \cdot D_k^{(0)} + g_{kj''} \cdot G_k^{(0)}], \quad (17)$$

поскольку $D_k^{(0)} > 1 > G_k^{(0)}$. Так как эти выражения являются множителями к начальным весам $P_{j'}^{(0)}, P_{j''}^{(0)}$ при вычислении совместных целевых нагрузок, а также информационных весов $P_{kj'}^{(1)}, P_{kj''}^{(1)}$, то верно следующее. Новый информационный вес каждого признака $P_{kj'}^{(1)}, P_{kj''}^{(1)}$ будет иметь

изменение (множитель) по отношению к начальному весу в прямой зависимости от значения $d_{kj}, D_k^{(0)}$. Этот факт показывает, что при любом начальном наборе $(P_j^{(0)})_n$, удовлетворяющем соотношению (6б), и при наличии дифференциации в значениях $(d_{kj}, D_k^{(0)})$ выполняется неравенство

$$\rho_k^{(1)} = \sum_{j=1}^n P_{kj}^{(0)} \cdot d_{kj} > \sum_{j=1}^n P_j^{(0)} \cdot d_{kj} = \rho_k^{(0)}. \quad (18)$$

Из чего в соответствии с (5), (6б) следует

$$d_{k,n+1}/\rho_k^{(0)} > d_{k,n+1}/\rho_k^{(1)}; D_k^{(0)} > D_k^{(1)}; G_k^{(0)} < G_k^{(1)}. \quad (19)$$

Таким образом, соотношения (19) показывают, что в результате действия оператора K при условии неполной информативности начальной системы признаков для целевого разделения двух эталонных объектов новая система признаков приближается к полностью информативной для целевого разделения этих объектов⁵, т. е. к выполнению условий (6в) или (6а).

3. Пусть для k -й пары объектов выполнены соотношения $D_k^{(0)} < 1$ и $G_k^{(0)} > 1$. Тогда все предыдущие выводы, сделанные относительно $D_k^{(0)}$ и $D_k^{(1)}$, будут верны для $G_k^{(0)}$ и $G_k^{(1)}$ в силу симметричности как самих величин D_k и G_k , так и действия над ними оператора K . Поэтому, исходя из (6а) аналогично (19), получим

$$G_k^{(0)} > G_k^{(1)} \text{ и } D_k^{(0)} < D_k^{(1)}. \quad (20)$$

Таким образом, в результате действия оператора K при условии неполной информативности начальной системы признаков для целевого объединения двух эталонных объектов новая система признаков приближается к полностью информативной для целевого объединения этих объектов⁶, т. е. к выполнению соотношений (6в) или (6б).

Из учета трех рассмотренных свойств оператора K видно, что при выборе и. с. п. в первом приближении $(P_{kj}^{(1)})_n$ для одновременного разделения и объединения отдельной пары эталонных объектов в соответствии с целевыми требованиями $D_k^{(0)}$ и $G_k^{(0)}$ в определенных условиях этот оператор всегда уменьшает целевое требование, большее единицы, и увеличивает — меньшее единицы. Поскольку в разбираемом нами случае оба целевых требования, контролируя выбор и. с. п. действуют совместно, а «поощрение» и «наказание» признаков этими требованиями можно сделать сколько угодно осторожным (например, путем извлечения корня h -й степени из значения суммарной целевой нагрузки (11) каждого признака, что приводит к менее резкому изменению новых информационных весов (12) в сравнении с начальными $(P_j^{(0)})_n$), поэтому каждое из новых целевых требований $(D_k^{(1)}, G_k^{(1)})$, согласно (19) и (20), уменьшаясь и увеличиваясь будет приближаться к значению 1. Средняя величина $(D_k^{(1)} + G_k^{(1)})/2$ вследствие (4) и (5) также будет уменьшаться, приближаясь к значению 1, а в случае $D_k^{(0)} = 1 = G_k^{(0)}$ выполняется (15) — первое свойство оператора K .

Распространим наше рассуждение на все множество пар эталонных объектов, для которых в соответствии с (6а), (6б), (6в) возможны все случаи сочетания трех соотношений из двух целевых требований. В сравнении с весами $(P_{kj}^{(1)})$ для двух объектов (12) при поиске целевых информационных весов признаков $(P_j^{(1)})_n$ в этом случае добавляется лишь операция суммирования (13) совместных целевых нагрузок по всем парам объек-

⁵ При дифференциации в значениях $d_{kj} \cdot D_k^{(0)}$ ($j = 1, \dots, n$).

⁶ При дифференциации в значениях $g_{kj} \cdot G_k^{(0)}$ ($j = 1, \dots, n$).

тов. Поэтому условие полной информативности системы признаков для двух объектов (6в) распространится на все множество их пар и, согласно (19), (20), в определенных условиях выполняется:

$$I_3^{(0)} < I_3^{(1)} \leq 1. \quad (21)$$

Построение итерационной процедуры выбора и. с. п.

Поскольку область значений $(D_k^{(1)}, G_k^{(1)})$ оператора совпадает с областью его определения $(D_k^{(0)}, G_k^{(0)})$, естественным способом нахождения окончательной информативной системы признаков для целевой классификации объектов является итерационный процесс $K(D_k^{(\tau)}, G_k^{(\tau)}) = (D_k^{(\tau+1)}, G_k^{(\tau+1)})$, $\tau = 1, \dots, l, l+1$ и т. д. Сходимость этого процесса подтвержде-

на на множестве численных машинных экспериментов (по программам для ЭВМ М-222 и БЭСМ-6) с числовыми матрицами, как с модельными, так и содержащими реальную геологическую информацию. Отметим, что строгое доказательство сходимости несколько затруднено в связи с нелинейным преобразованием в этом процессе (5) и может следовать из того, что значения целевых требований, во-первых, ограничены и, во-вторых, уменьшаются при действии оператора K на каждую отдельно взятую пару эталонных объектов (19), (20), а на множестве пар это уменьшение оценивается в среднем мерой информативности $I_3^{(\tau)}$ (7).

На каждой итерации фиксируется новая система признаков и при соответствующих условиях происходит некоторое увеличение меры общей целевой информативности этой системы в сравнении с начальной системой признаков. Последовательность таких итераций заканчивается на l -м приближении, когда с заданной точностью $P_j^{(l)} = P_j^{(l+1)} \pm \varepsilon$, $j = 1, \dots, n$, и, следовательно, $I_k^{(l)} \approx I_k^{(l+1)}$. При этом происходит минимизация пространства признаков (защелкивание признаков с весом $P_j < \beta$, где, например, $\beta = 0,05 \cdot 1/n'$ (n' — число ненулевых признаков)). Систему признаков с информационными весами $(P_j^{(l)})_n$ будем считать достаточно информативной для совместного целевого разделения и объединения (классификации) эталонных объектов, если мера информативности этой системы $I_3^{(l)} > \kappa$ (κ — порог, выбирается в зависимости от требуемой точности приближения к полностью информативной системе признаков).

Способы принятия решений (распознавание объектов-проб)

В связи с тем, что получение и. с. п. в данном методе базируется на приведении мер различия и мер сходства между объектами по характеристическим признакам в соответствии с таковыми по целевому признаку, здесь, согласно трем вариантам выбора и. с. п. (7), рассматриваются три простых решающих правила на основе функций близости.

Пусть на множестве эталонных объектов S_1, \dots, S_m получена и. с. п. определенного вида $(T_1), (T_2), (T_3)$ и требуется провести распознавание некоторого объекта-пробы S^n .

Правило аналогии или позитивная форма принятия решений. Если получена разделяющая и. с. п. с информационными весами $(R_j)_n$ (10), решение о принадлежности пробы принимается по ближайшему эталонному объекту (по аналогии). Определяется, во-первых (для качественного целевого признака), на какой из объектов в эталонных классах (образах) «похожа» данная проба или, во-вторых (для количественного целевого признака), рядом с каким из объектов в эталонной последовательности

классов⁷ и в каком диапазоне целевых значений можно указать место пробы. Для этого по формулам (1)–(4) у каждой пары эталон — проба вычисляется мера сходства:

$$\lambda_i^n = \sum_{j=1}^n R_j \cdot g_{ij}^n, \quad (i = 1, \dots, m). \quad (22)$$

Рассмотрим решающее правило относительно любых двух классов эталонных объектов $S'_1, \dots, S'_m; S''_1, \dots, S''_{m'} (m' + m'' = m)$. Целевое расстояние между объектами разных классов $d_{n+1} (S', S'')$ будем считать «ценой» принятия решения по аналогии⁸. В каждом из эталонных классов найдем максимальные меры сходства и соответствующие им ближайшие аналоги $S'_{i^*}, S''_{i^{**}}$ пробы S^n

$$\max_{i=1, \dots, m} \lambda_i^n = \lambda_{i^*}^n (S'_{i^*}); \quad \max_{i=m+1, \dots, m} \lambda_i^n = \lambda_{i^{**}}^n (S''_{i^{**}}) \quad (23)$$

и назовем их коэффициентами принадлежности по «анalogии». Эти величины оценивают максимально возможную «похожесть» пробы на соответствующие классы. Для количественного целевого признака они указывают эталоны, относительно которых у пробы возможны минимальные диапазоны нормированных отклонений по цели, равные $\pm (1 - \lambda_{i^*}^n)$; $\pm (1 - \lambda_{i^{**}}^n)$. Наибольший из коэффициентов принадлежности фиксирует для данной пробы S^n ближайший эталонный класс, например S' . Принадлежность пробы к этому классу будем считать «уверенной», если $\lambda_{i^*}^n \geq \xi$ (ξ — порог «уверенной» принадлежности), $\xi = \frac{1}{2} \bar{g}'_{n+1}$ (см. (27)). Сравнительное решение принимается по разности этих максимальных мер сходства (по коэффициенту предпочтения):

$$\Delta^n (S', S'') = \lambda_{i^*}^n - \lambda_{i^{**}}^n. \quad (24)$$

Если проба ближе к классу S' , $\Delta^n > 0$, в противном случае — $\Delta^n < 0$. Значение (Δ^n) оценивает относительную «контрастность» в решении, где $|\Delta^n| \geq \eta$ — область принятия «уверенных» решений, а $|\Delta^n| > \eta$ — область приближенного решения или отказа от решения (η — фиксированный порог; например, выбирается $\eta = \frac{1}{2} d_{n+1} (S', S'')$).

В случае наличия более двух классов эталонных объектов с различной «ценой» (d_{n+1}) сравнительное (попарное) приятие решений рекомендуется начинать с классов, имеющих $(\lambda_{i^*}^n, \lambda_{i^{**}}^n) = \max$. Если $|\Delta^n| \geq \eta$, то получаемая «цена» решения $d_{n+1} (S', S'')$ будет минимальной и соответствовать максимально возможной детальности (точности) этого решения.

Правило исключения или негативная форма принятия решений. Если получена объединяющая и. с. п. с информационными весами $(Q_j)_n$ (10), тогда можно принимать решения о невключении пробы в тот или иной класс (образ). Для этого на основе (1)–(4) по всем парам эталон — проба вычисляются расстояния:

$$\rho_j^n = \sum_{i=1}^n Q_j \cdot d_{ij}^n, \quad (i = 1, \dots, m). \quad (25)$$

На каждом из эталонных классов (S', S'') определяется коэффициент исключения пробы, как среднее расстояние пробы до класса, взятое с

⁷ Класс может быть представлен и одним объектом.

⁸ Например, «цена» сравнительного принятия решения по аналогии относительно принадлежности пробы к какому-либо из двух эталонов одного класса равна $d_{n+1}(S', S'')=0$.

обратным знаком:

$$-\bar{\rho}'^n = -\left(\sum_{j=1}^{m'} \rho_j'^n / m'\right); \quad -\bar{\rho}''^n = -\left(\sum_{i=m'+1}^m \rho_i''^n / m''\right). \quad (26)$$

Пусть $-\xi$ — порог исключения. Тогда, если $-\bar{\rho}'^n \leq -\xi'$ или $-\bar{\rho}''^n \leq -\xi''$, принимается решение о невключении пробы в соответствующие классы, в противном случае ($-\bar{\rho}'^n > -\xi'$ или $-\bar{\rho}''^n > -\xi''$)¹ решение принимается приближенно или делается отказ от решения, т. е. чем больше коэффициент исключения, тем больше возможная определенность негативно-го решения.

Для количественного целевого признака это означает, что диапазон изменения возможных нормированных отклонений по цели между пробой и эталонным классом сужается и лежит в пределах от $\bar{\rho}'^n$ или $\bar{\rho}''^n$ до 1. Среднюю меру схождения эталонов по целевому признаку внутри данного класса S' , в котором $M' = C_{m'}^2$ — число пар сравниваемых объектов, будем считать «ценой» принятия решения по исключению⁹:

$$\bar{g}_{n+1}' = \sum_{k=1}^{M'} g_{k,n+1} / M'. \quad (27)$$

Для нескольких эталонных классов порядок оценки пробы на «исключение» устанавливается по возрастанию: $-\bar{\rho}'^n < -\bar{\rho}''^n < \dots$

Отметим, что порог «уверенного» исключения из класса предлагается брать следующим: $-\xi' = \frac{1}{2} \bar{g}' - 1$.

Правило пропорциональности или совмещенная форма принятия решений. В случае, когда задана и. с. п. для разделения и объединения эталонных объектов пропорционально их целевым различиям и сходствам $g_{k,n+1}$, рассмотренные выше правила принятия решений (23), (24), (26) совмещаются естественным способом:

$$V'^n = \lambda_{i_*}^n(S'_{i_*}) - \bar{\rho}'^n; \quad V''^n = \lambda_{i_{**}}^n(S''_{i_{**}}) - \bar{\rho}''^n; \quad (28)$$

$$W^n(S', S'') = (V'^n - V''^n) / 2. \quad (29)$$

Здесь V'^n и V''^n — совмещенные коэффициенты принадлежности пробы к классам S' и S'' ; $W^n(S', S'')$ — совмещенный коэффициент предпочтения. Область их определения: $-1 \leq (V'^n, V''^n, W'^n) \leq 1$.

Пусть ζ — порог принадлежности, η — порог предпочтения, ξ — порог исключения. Установим пороги приближенного решения, равные $\frac{1}{2} \zeta$; $\frac{1}{2} \eta$; $-\frac{1}{2} \xi$. Рассмотрим последовательность принятия решения, включая приближенные решения, в случае более двух классов эталонных объектов.

Все коэффициенты принадлежности пробы S^n к классам S' , S'' , S''' располагаются в порядке убывания $V'^n \geq V''^n \geq \dots$. Если $-\frac{\xi}{2} \geq V'^n = \max$, это означает, что проба исключается из рассматриваемых классов. Если $-\frac{\xi}{2} < V'^n < \frac{\xi}{2}$, то принятие решения относительно принадлежности пробы к классу S' считается неопределенным. И, наконец, для всех $V'^n \geq V''^n \geq \dots \geq \frac{\xi}{2}$ найдем последовательно $W^n(S', S'')$, $W^n(S', S''')$, ... Если $|W^n| < \frac{1}{2} \eta$, считается, что проба занимает промежуточное

⁹ Например, «цена» принятия решения об исключении пробы относительно класса S' , состоящего из двух противоположных по целевому признаку эталонов (S'_1, S'_2), будет равна: $g_{n+1}(S'_1, S'_2) = 0$.

положение между этими классами, а при $|W^n| > \frac{1}{2} \eta$ она классифицируется в S' .

В заключение отметим, что прежде чем проводить распознавание «неизвестных» объектов (проб) с помощью предлагаемых правил принятия решений, рекомендуется провести распознавание по заданной системе признаков самих эталонных объектов и тем самым, проверив правильность или неправильность их распознавания, оценить систему признаков. Процедуру распознавания, когда в качестве проб взяты эталонные объекты, а сравнение каждого объекта на себя не учитывается в принятии решений, мы называем «внутренним экзаменом». Ошибка в случае неправильного распознавания любого эталона будет равна «цене принятия решения по нему относительно своего класса». Неопределенное решение (отказ) считается равным половине соответствующей ошибки.

7.4. ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ ПОСТАНОВКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ И СПОСОБЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Кратко напомним, что под формализованной постановкой геологической задачи, как задачи автоматической классификации, понимается процесс формирования задачи, в котором учитываются во взаимосвязи следующие основные моменты: содержание геологической задачи, тип требования цели, вид целевого признака, вид исходной информации и особенности используемых математических методов. Выбор математического аппарата для решения задачи определяется на основе знания особенностей математических методов, типа требования цели, вида целевого признака и исходной информации. Решение данной геологической задачи проводилось в двух формализованных постановках (рис. 7.2).

В первой постановке выделенные в соответствии с первым уровнем детальности при формировании геологической задачи две группы интрузий были представлены как два класса эталонных объектов: «продуктивные» (первый класс) и «пустые» (второй класс). В первый класс вошли 55 объектов, во второй — 13 (см. табл. 7.2). Целевое требование (целеуказание) в этой постановке: разделять эталонные объекты разных классов («продуктивные» от «пустых») в пространстве характеристических признаков. Это требование выбрано в связи с двумя исходными положениями. Во-первых, эталонные объекты разных классов, различаясь по интенсивности проявления сульфидного медно-никелевого оруденения, должны различаться и по информативному набору характеристических признаков. Во-вторых, класс «продуктивные» неоднороден, так как внутри класса

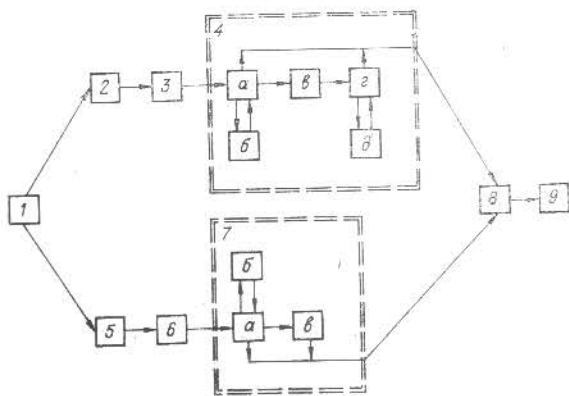


Рис. 7.2. Блок-схема решения задачи.

1 — геологическая постановка задачи; 2 — формулирование задачи в первой формализованной постановке; 3 — подготовка исходной информации к решению; 4 — решение задачи в первой формализованной постановке (а — вычисление информативной системы признаков на первом этапе; б — внутренний экзамен на первом этапе; в — кодирование количественной информации и подготовка ее к решению на втором этапе, г — вычисление информационных весов и получение информативной системы признаков на втором этапе, д — внутренний экзамен на втором этапе); 5 — формулирование задачи во второй формализованной постановке; 6 — подготовка исходной информации к решению; 7 — решение задачи во второй формализованной постановке (а — вычисление информационных весов и получение информативной системы признаков, б — внутренний экзамен, в — распознавание проб); 8 — обсуждение результатов решения; 9 — выводы и рекомендации.

есть объекты (например, более значимые месторождения и рудопроявления), отличающиеся по значениям целевого признака не в меньшей степени, чем объекты из разных классов. Поэтому нельзя требовать объединения внутри каждого класса, а возможно только разделение между классами. Вид целевого признака качественный, т. е. известно только, какие объекты из первого класса, а какие из второго. Такой целевой признак не несет в себе информации о неоднородности внутри первого класса и о расстоянии между классами. Можно только предполагать, что это расстояние (различие) незначительно. Поэтому вопрос, что считать за лучшее разделение объектов разных классов, решался на качественном уровне.

Выбор информативной системы признаков из исходной («классификация признаков») для разделения эталонных объектов класса «продуктивные» и класса «пустые» осуществлялся с помощью математического метода, описанного выше. Учитывая особенности этого метода, вид исходной информации и целевого признака, а также целеуказание, задача «классификации признаков» в первой формализованной постановке решалась в два последовательных этапа (см. рис. 7.2). Прежде чем перейти к изложению способа решения этой задачи на каждом из этапов, несколько слов о подготовке исходной информации к решению.

Подготовка исходной информации к решению включает в себя следующие моменты.

1. Приведение исходной информации к табличному виду (см. табл. 7.2).

2. Выделение группы «отождествляющих» и «различающих» признаков. «Отождествляющие» признаки — признаки, которые принимают одинаковые значения на эталонных объектах разных классов, «различающие» — признаки, принимающие разные значения на эталонных объектах разных классов. В первой постановке отождествляющим признаком служит первый признак — связь интрузий с глубинными разломами (см. табл. 7.1, 7.2). Отождествляющий признак является критерием общности для эталонных объектов разных классов и поэтому не может быть использован для разделения этих классов.

3. Подготовка «различающих» признаков для ввода на ЭВМ — перфорация на 80-колошых перфокартах.

На первом этапе информативная система признаков устанавливалась из общего числа (39) исходных признаков (см. табл. 7.2) методом «целевой итерационной классификации». В число исходных признаков вошли 25 качественных, которые принимают значения: 1 — признак выполнен, 0 — признак не выполнен, прочерк — информация отсутствует, и 14 количественных (минералогических и петрохимических) признаков.

Полученная информативная система признаков приведена на рис. 7.3, где наиболее существенным¹⁰ признакам соответствуют максимальные значения информационных весов (P_j), несущественным — минимальные значения, вплоть до нулевых. Информативность полученной системы признаков (оценка значимости приближения к заданной классификации) оценивается в методе «целевой итерационной классификации» величиной I , которая изменяется в пределах $0 \leq I \leq 1$. Если $I = 1$, то полученная в этом случае система признаков максимально информативна и дает классификацию эталонных объектов, совпадающую с целевой. В данном случае качественный целевой признак не несет в себе информации о величине границы между разными классами. Предполагается, что величина границы незначительна и при оценке информативности ($I = 0,35 < 1$) мы не можем уверенно судить о том, какие из эталонных объектов ухудшают разделение разных классов. Поэтому окончательная оценка инфор-

¹⁰ Употребляется в смысле формальной важности данного признака вместе с другими в достижении заданной целевой классификации.

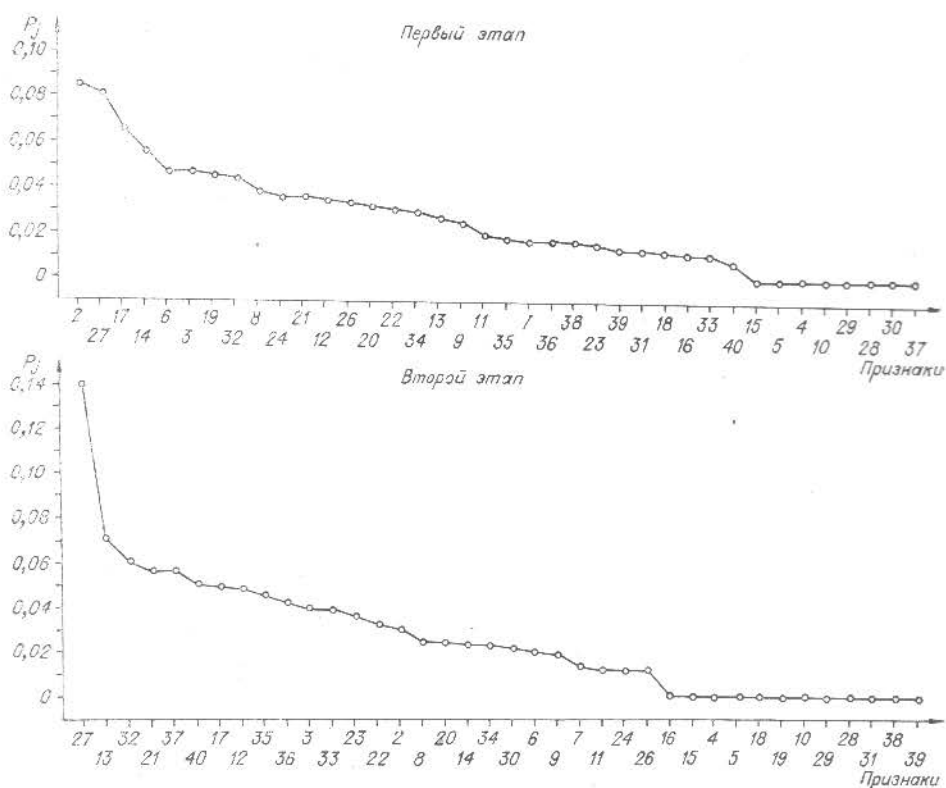


Рис. 7.3. Распределение признаков по информативности в первой формализованной постановке на первом и втором этапах решения задачи (P_j — информационный вес признака; I — оценка информативности полученной системы признаков).

мативности полученной системы признаков производилась по результатам внутреннего экзамена в соответствии с правилами принятия решений, изложенными в методе «целевой итерационной классификации». Внутренний экзамен — это процедура распознавания самих эталонных объектов относительно друг друга (кроме самого на себя). Распознавание каждого эталонного объекта проводилось последовательно по значениям коэффициента его принадлежности (V) к каждому из классов и по коэффициенту предпочтения (W) этим объектом одного класса другому (V_I — расстояние распознаваемого объекта до ближайшего объекта в первом классе, V_{II} — соответственно до ближайшего объекта во втором классе, W — разность величин принадлежности этого объекта к сравниваемым классам). Результаты внутреннего экзамена приведены на рис. 7.4.

В связи с тем, что на первом этапе решения задачи не удалось достичь полного разделения эталонных объектов, на втором этапе была сделана попытка улучшить разделение эталонных объектов класса «продуктивные» и класса «пустые». Информация об объектах была приведена к единому уровню — бинарному виду (1 — признак выполнен, 0 — признак не выполнен, прочерк — информация отсутствует), т. е. для количественных данных был выработан код — разделяющая граница значений для каждого количественного признака, на основании которой значения, находящиеся по одну сторону границы, принимались за 1, а по другую за 0. Общий код количественных признаков приведен в табл. 7.3, где a — условие нахождения значения признака по ту или другую сторону границы, b — соответствующее значение 1 или 0.

Для кодирования количественных данных использовался метод целевого кодирования, основанный на принципе получения максимального

Таблица 7.3

Общий код для количественных признаков

Номер признака	a	b	Номер признака	a	b
20	<29	1	34	<791	1
	>29	0		≥791	0
21	<59	1	35	>926	1
	≥59	0		<926	0
23	>67	1	36	<196,7	1
	≤67	0		>196,7	0
30	>6,9	1	37	>8,31	1
	<6,9	0		≤8,31	0
31	<46,2	1	38	>59,3	1
	>46,2	0		≤59,3	0
32	<2,76	1	39	≤2,38	1
	≥2,76	0		>2,38	0
33	>14,4	1	40	>13	1
	<14,4	0		<13	0

числа различий для объектов разных классов (Дмитриев и др., 1975). Целевое кодирование, по существу, является началом в решении задачи разделения классов и часто позволяет усилить это разделение за счет увеличения мер различия для ряда объектов разных классов при переводе количественных признаков в бинарные. Отметим, что используемые математические процедуры на втором этапе не зависят от направленности кодирования, т. е. на результат решения не влияет, какая градация признака обозначена 1 и какая — 0. После кодирования количественные признаки были приведены в табличную форму (табл. 7.4).

На втором этапе выбор информативной системы признаков осуществлялся так же, как и на первом этапе. Результаты внутреннего экзамена приведены на рис. 7.4, а полученная информативная система признаков на рис. 7.3.

Во второй формализованной постановке выделенные в соответствии со вторым и третьим уровнями детальности три группы продуктивных интрузий при формировании геологической задачи были представлены как три последовательных класса эталонных объектов: 5 из класса более значимых месторождений, 4 — из класса менее значимых месторождений, 9 — из класса рудопроявления (соответственно номера объектов в табл. 7.2: 1, 2, 3, 4, 5; 7, 8, 9, 10; 21, 23, 25, 26, 32, 34, 35, 36, 37). Остальные объекты (37) представлены в качестве проб.

Мы исходим из предположения, что эталонные объекты внутри каждого класса, близкие между собой по интенсивности проявления сульфидного медно-никелевого оруденения, должны быть близки и по характеристическим признакам. В таком случае эталонные объекты разных классов, значительно и в разной степени различаясь между собой по целевому признаку, должны в такой же степени различаться и по характеристическим признакам. В формализованной постановке на первом шаге было задано следующее целеуказание (целевое требование) для формального решения геологической задачи: найти такую информативную систему признаков, которая позволяет пропорционально количественным значениям целевого признака (X_{n+1} в табл. 7.2) как раз делить объекты-эталонные разных классов, так и объединять их внутри каждого класса. Значения целевого признака выражены в условных единицах и заданы, исходя из знания эталонных объектов и их практической значимости. Наибольший практический интерес представляет обнаружение отличий более значимых месторождений от менее значимых и рудопроявлений, и в меньшей степени интересно выявление отличий менее значимых месторождений от рудопроявлений (соответственно разница между значениями целевого признака).

Информативная система признаков находилась из 21 качественного признака (которые принимают значения: 1 — признак выполнен, 0 — признак не выполнен, прочерк — информация отсутствует) и 14 количественных признаков. Признаки 1, 24, 25, 26, 27 принимают одинако-

Таблица 7.4

Количественные признаки после целевого кодирования

Классы	Номер объекта	Признак														
		21		30		32		34		36		38		40		
		20	23	31	33	35	37	39	20	23	31	33	35	37	39	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Продуктивные	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	21	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	23	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	25	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	26	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
	32	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	34	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
	35	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	37	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
	6	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	12	—	—	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	13	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	—	0	—	—
	14	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	—
	15	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0
	16	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	—	1	—	—
	17	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	18	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
	19	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	20	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	22	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
	24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
	27	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
	28	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	30	0	—	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
	31	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	—
	33	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
	41	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
	42	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
	44	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	45	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
	46	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	50	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	52	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	55	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
	57	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	61	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
	62	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
	63	—	—	—	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	64	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	65	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1
	66	—	—	—	1	1	1	1	1	1	1	—	1	1	1	1
	67	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	—	1	0	0	0
	68	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Пустые	38	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
		39	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	—
		40	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
		43	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—
		47	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Пустые	48	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
	49	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0
	51	0	—	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	53	1	—	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	—
	56	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	58	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

вые значения на всех эталонных объектах (см. табл. 7.2), т. е. представляют собой критерий общности для них (отождествляющие признаки) и поэтому не могут быть использованы для разделения классов. Информативная система признаков выбиралась в несколько приемов. Вначале была найдена первая подсистема признаков, в которую вошли два признака (см. рис. 7.5): наличие скарнов — X_3 , форма пинтузий — X_{18} . Эта подсистема признаков дает классификацию эталонных объектов, максимально близкую к целевой, что выражается соответствующим значением меры информативности $I = 0,99$. Затем из оставшихся признаков (X_3 , X_{18} были исключены) была получена вторая подсистема, в которую вошли четыре признака (см. рис. 7.5) с соответствующим значением меры информативности $I = 0,85$. Далее таким же образом были найдены еще две подсистемы признаков: соответственно $I = 0,64$, $I = 0,53$. Поиск четырех подсистем с последующим их объединением в общую систему проводился с целью увеличения надежности формализованного решения при последующем распознавании объектов-проб. Предполагается, что надежное решение может быть получено по такой системе признаков, которая дает классификацию эталонных объектов, достаточно близкую к целевой, и эта классификация должна быть устойчива по отношению к возможным изменениям или незначительным ошибкам в информации. Эта устойчивость достигается за счет увеличения числа признаков, входящих в информативную систему. Критерием включения подсистемы признаков в информативную систему признаков в настоящей задаче принималась величина $I > 0,5$. В полученных таким образом четырех подсистемах информационные веса (P_j) признаков были пронормированы пропорционально соответствующим значениям $(I)^2$ и так, чтобы сумма всех информационных весов признаков была равна единице ($\sum_{j=1}^n P_j = 1$). В состав общей системы признаков вошли 14 признаков — 7 качественных и 7 количественных (см. рис. 7.5).

На втором шаге решения задачи по результатам внутреннего экзамена производилась оценка информативности полученной общей системы признаков с последующим распознаванием (классифицированием) проб. Результаты внутреннего экзамена и распознавания проб приведены соответственно на рис. 7.6—7.10.

7.5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ (ПО ПОСТАНОВКАМ)

Согласно общей геологической постановке задачи основная цель математической обработки сведений о месторождениях, рудопроявлениях и пустых объектах — осуществление выбора информативных систем признаков и распознавания прогнозируемых объектов (проб). Решение основной задачи проводилось в двух изложенных выше формализованных постановках. Прежде чем перейти к анализу результатов по каждой по-

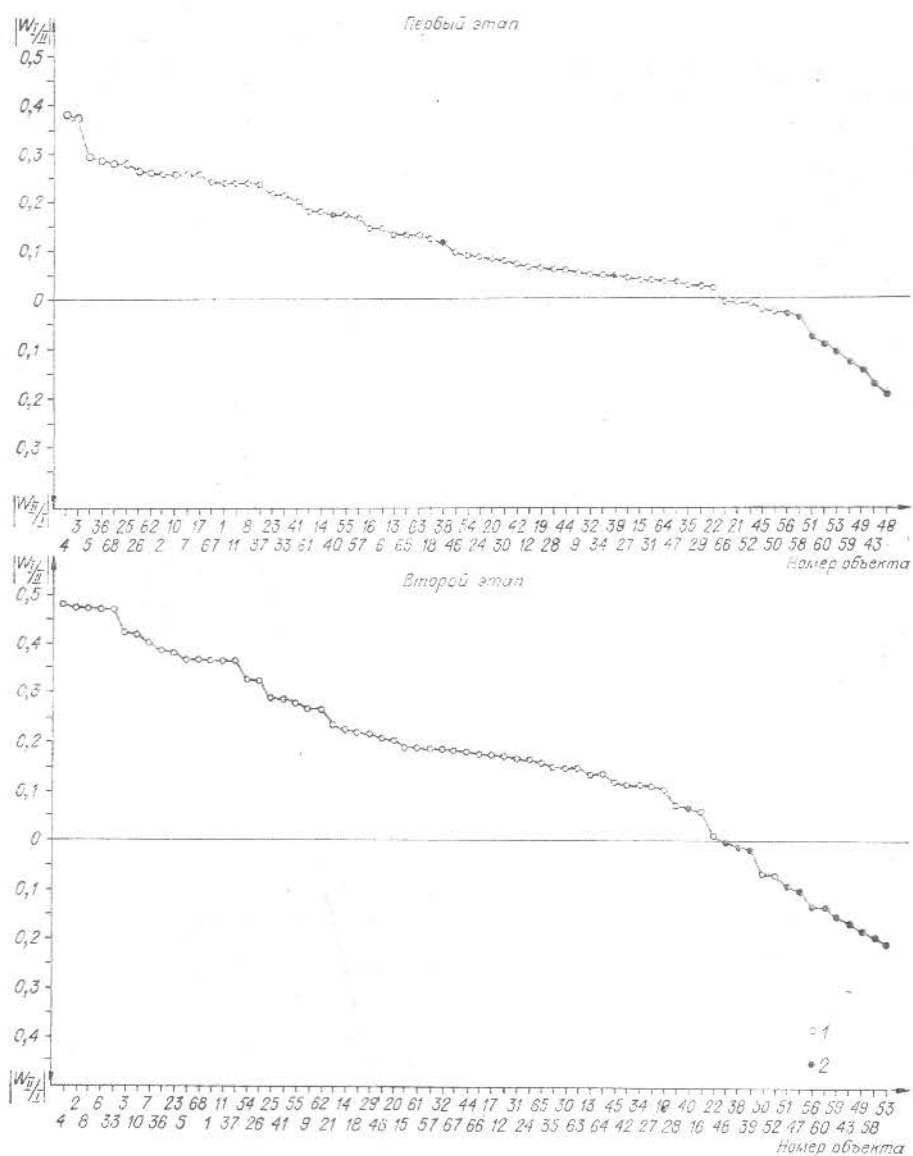


Рис. 7.4. Внутренний экзамен на первом и втором этапах в первой постановке по коэффициентам предпочтения ($W_{I/II}$ — коэффициент предпочтения первого класса в сравнении со вторым; $W_{II/I}$ — коэффициент предпочтения второго класса в сравнении с первым).

1 — эталонные объекты первого класса, 2 — второго класса.

становке, сделаем несколько общих замечаний. Как это следует из блока исходных данных (см. табл. 7.2), характеристические признаки подразделяются на отождествляющие признаки, которые служат критерием общности для эталонных объектов разных классов и не используются для разделения этих классов, и на различающие признаки, которые несут основную информативную нагрузку в исследовании сходств и различий объектов. Роль того или иного признака неодинакова в разных постановках (кроме признака X_1 — связь интрузий с глубинными разломами, являющегося везде отождествляющим). Так, в одной постановке он может быть отождествляющим, в другой — одним из различающих

Таблица 7.5

Результаты внутреннего экзамена в первой постановке на первом этапе

Номер объекта	V_I	V_{II}	Номер объекта	V_I	V_{II}	Номер объекта	V_I	V_{II}
1	0,942	0,702	15	0,811	0,772	57	0,940	0,774
2	0,921	0,661	16	0,879	0,732	61	0,833	0,649
3	0,983	0,607	17	0,917	0,661	62	0,929	0,667
4	0,983	0,602	18	0,823	0,699	63	0,756	0,628
5	0,892	0,593	19	0,832	0,768	64	0,727	0,691
7	0,903	0,646	20	0,834	0,752	65	0,749	0,616
8	0,950	0,712	22	0,834	0,814	66	0,684	0,687
9	0,764	0,709	24	0,821	0,734	67	0,968	0,725
10	0,969	0,711	27	0,834	0,638	68	0,968	0,685
21	0,788	0,794	28	0,850	0,787	38	0,788	0,671
23	0,834	0,615	29	0,767	0,743	39	0,802	0,751
25	0,947	0,665	30	0,810	0,733	40	0,814	0,640
26	0,947	0,680	31	0,829	0,793	43	0,685	0,853
32	0,823	0,772	33	0,917	0,703	47	0,770	0,737
34	0,828	0,777	41	0,940	0,740	48	0,745	0,937
35	0,818	0,792	42	0,856	0,784	49	0,796	0,937
36	0,966	0,673	44	0,827	0,764	51	0,692	0,766
37	0,966	0,731	45	0,774	0,793	53	0,741	0,852
6	0,905	0,759	46	0,856	0,760	56	0,759	0,784
11	0,933	0,694	50	0,762	0,786	58	0,786	0,821
12	0,784	0,718	52	0,792	0,799	59	0,768	0,890
13	0,900	0,767	54	0,736	0,648	60	0,808	0,891
14	0,879	0,699	55	0,826	0,655			

Примечание. V_I , V_{II} — коэффициенты принадлежности эталонных объектов к первому и второму классам.

и информативных (например, признак X_{27} — наличие сульфидной вкрапленности в верхних горизонтах). Выясняется также, что изменяется существенность различающих признаков в этих постановках (см. рис. 7.3, 7.5).

Анализ результатов по первой постановке. В этой постановке выбор информативной системы признаков осуществлялся в два последовательных этапа. Результаты приведены на рис. 7.3. Наиболее существенные признаки на первом этапе — это в основном качественные признаки: наличие метасоматитов в экзо- и эндоконтактовых зонах (X_2), наличие сульфидной вкрапленности в верхних горизонтах (X_{27}), присутствие кислых гибридных пород в кровле интрузий (X_{17}), наличие нижних такситовых габбро-долеритов (X_{14}), наличие субщелочных траптов во вмещающих вулканогенных образованиях (X_6), наличие скарнов (X_3), наличие «эруптивных брекчий» в периферических частях интрузий. Из количественных признаков наиболее существенный (X_{32}) — содержание щелочей в предполагаемом исходном расплаве.

Полученная на первом этапе система признаков дает незначительное ($I = 0,35$) разделение эталонных объектов класса «продуктивные» и класса «пустые». На внутреннем экзамене (табл. 7.5, рис. 7.4) выяснилось, какие объекты ухудшают разделение эталонных объектов. 5 объектов из класса «продуктивные» (соответственно номера из табл. 7.2: 21, 45, 50, 52, 66) и 4 объекта из класса «пустые» (38, 39, 40, 47) имеют максимальные величины коэффициентов принадлежности на чужих классах, т. е. распознаются не в свои классы, и дают таким образом ошибку распознавания (см. табл. 7.5). Кроме того, из рис. 7.4 видно, что все коэффициенты предпочтения для эталонных объектов незначительны. Максимальный коэффициент предпочтения для первого класса имеет 4-й объект $W_{I/II} = 0,381$, минимальный — 22-й $W_{I/II} = 0,02$. Соответственно для второго класса — 48-й объект $W_{II/I} = 0,192$ и 56-й объект $W_{II/I} = 0,025$.

На втором этапе количественная информация была приведена к бинарному виду (целевое кодирование) с целью получения системы признаков, дающей лучшее разделение эталонных объектов разных классов. Существенность признаков на этом этапе имеет, наряду со сходством, определенные отличия от существенности признаков на первом этапе. В результате целевого кодирования заметно увеличилась роль количественных признаков. Поскольку информативная система признаков выбирается с учетом взаимодействия (взаимной дополнителности) признаков, это привело к изменению в свою очередь роли качественных признаков, хотя их структура осталась неизменной.

Наиболее существенные признаки на втором этапе решения задачи (см. рис. 7.3) следующие: наличие сульфидной вкрапленности в верхних горизонтах (X_{27}), характер дифференцированности (X_{13}), содержание щелочей в предполагаемом исходном расплаве (X_{32}), железистость оливинов верхних горизонтов (X_{21}), магнизиальность наиболее богатых оливинов горизонтов (X_{37}), степень дифференциации интрузий (X_{40}), присутствие кислых гибридных пород в кровле интрузий (X_{17}), присутствие карбонатно-глинистых пород, ангидрида, гипса в верхнем экзоконтакте (X_{12}), щелочность — кислотность предполагаемого исходного расплава (X_{35}), условный ионный потенциал для предполагаемого исходного расплава (X_{36}), наличие скарнов (X_3), калиевость предполагаемого исходного расплава (X_{33}), основность плагиоклаза нижних горизонтов (X_{23}), присутствие ортопироксенов в нижних дифференциатах интрузий (X_{22}), наличие метасоматитов в экзо- и эндоконтактных зонах (X_2).

Менее существенные признаки: присутствие конгломератов, песчаников, сланцев в нижнем экзоконтакте (X_8), железистость оливинов нижних горизонтов (X_{20}), наличие нижних такситовых габбро-долеритов, кремнекислотность предполагаемого исходного расплава (X_{23}), магнизиальность предполагаемого исходного расплава (X_{30}) и др. (см. рис. 7.3). Несущественные признаки (в соответствии с номерами в табл. 7.1): X_4 , X_5 , X_{10} , X_{15} , X_{16} , X_{18} , X_{19} , X_{25} , X_{28} , X_{29} , X_{31} , X_{38} , X_{39} .

С петрологической точки зрения значительная роль ряда признаков в разделении «продуктивных» и «пустых» интрузий очевидна и находит объяснение. К таковым относятся — наличие скарнов и прочих метасоматитов в экзо- и эндоконтактных зонах, наличие сульфидной вкрапленности, железистость оливинов, магнизиальность, содержание щелочей и кремнекислотность предполагаемого исходного расплава, магнизиальность наиболее богатых оливинов горизонтов и ряд других.

Полученная на втором этапе система признаков дает лучшее разделение эталонных объектов ($I = 0,46$), чем на первом этапе. Улучшились результаты распознавания и на внутреннем экзамене (табл. 7.6, рис. 7.4). Число ошибок уменьшилось: 2 объекта из класса «продуктивные» (интрузии Холомолах и Хукочар) и 1 из класса «пустые» (Апакитская интрузия) распознаются (по величинам принадлежности) не в свои классы. Коэффициенты предпочтения тоже в целом изменились в большую сторону: для первого класса максимальный коэффициент имеет 4-й объект $W_{I/II} = 0,480$, для второго — 53-й объект $W_{II/I} = 0,207$. Минимальные значения остались такими же небольшими, как и на первом этапе.

Рассматриваемая на втором этапе задача по разделению 2 классов интрузий «продуктивные» и «пустые» решалась ранее с помощью логикодискретных методов на основе использования длин тушиковых тесторов (Дмитриев 1970; Дмитриев и др., 1975). Некоторые новые методические разработки и полученные результаты докладывались на двух конференциях и опубликованы в виде тезисов (Бишаев, Карбышев, 1974; Васильев и др., 1974). Поэтому результаты решения этой задачи тесторными методами здесь не приводятся. Отметим только, что они близки к результатам, изложенным в настоящей работе (как по существенности признаков, так и по внутреннему экзамену).

Таблица 7.6

Результаты внутреннего экзамена в первой постановке на втором этапе

Номер объекта	V_I	V_{II}	Номер объекта	V_I	V_{II}	Номер объекта	V_I	V_{II}
1	0,999	0,635	15	0,797	0,609	57	0,817	0,631
2	0,975	0,504	16	0,668	0,611	61	0,793	0,606
3	0,940	0,520	17	0,808	0,638	62	0,886	0,620
4	0,940	0,460	18	0,824	0,605	63	0,694	0,548
5	0,909	0,543	19	0,767	0,666	64	0,829	0,698
7	0,956	0,552	20	0,837	0,637	65	0,773	0,615
8	0,961	0,490	22	0,755	0,748	66	0,728	0,554
9	0,816	0,547	24	0,824	0,663	67	0,824	0,645
10	0,954	0,536	27	0,708	0,597	68	0,961	0,595
21	0,851	0,618	28	0,788	0,717	38	0,666	0,681
23	0,851	0,469	29	0,829	0,614	39	0,701	0,744
25	0,768	0,481	30	0,742	0,594	40	0,748	0,681
26	0,802	0,479	31	0,777	0,612	43	0,633	0,799
32	0,837	0,656	33	0,999	0,530	47	0,634	0,744
34	0,749	0,673	41	0,816	0,532	48	0,723	0,728
35	0,797	0,647	42	0,773	0,659	49	0,659	0,840
36	0,977	0,592	44	0,814	0,636	51	0,684	0,779
37	0,977	0,615	45	0,779	0,663	53	0,592	0,799
6	0,999	0,530	46	0,817	0,612	56	0,642	0,777
11	0,999	0,635	50	0,653	0,723	58	0,602	0,800
12	0,793	0,625	52	0,662	0,733	59	0,714	0,869
13	0,775	0,642	52	0,826	0,502	60	0,733	0,869
14	0,808	0,586	53	0,819	0,540			

Примечание. V_I , V_{II} — коэффициенты принадлежности эталонных объектов к первому и второму классам.

Следует сказать, что при анализе результатов внутреннего экзамена на втором этапе выявляется значительная неоднородность среди эталонных объектов, за счет чего и возникает растянутость в виде полосы объектов на рис. 7.4. По этой же причине к классу «пустых» интрузий отнесены 2 объекта, известные как рудопроявления (Холомолах, Хукочар). По-видимому, эти объекты, будучи рудопроявлениями, обладают специфическими чертами, отличающими их от интрузий норильского типа. К классу «продуктивных» ошибочно отнесена 1 пустая интрузия (Анакитская), из западной части Сибирской платформы, у которой четко выявляется иной тип дифференциации (скаргардский).

Анализ результатов по второй постановке. Во второй постановке решалась самостоятельная задача, соответствующая более детальному (второму и третьему) уровню разбиения интрузий на группы. Во многих отношениях она отличается от задачи в первой постановке. Получение информативной системы признаков здесь производилось с целью разбраковки интрузий, в связи с которыми обнаружено сульфидное медно-никелевое оруденение, т. е. с целью определения перспективности рудоносных интрузий. Решение задачи усложнилось в связи с тем, что информативная система находилась для разделения трех последовательных классов, между которыми были заданы определенные соотношения с помощью целевого признака (см. табл. 7.2).

Наиболее существенны в этой постановке следующие признаки (рис. 7.5): наличие скарнов (X_3), форма интрузий (X_{18}), наличие «эруптивных брекчий» в периферических частях интрузий (X_{19}), проявление жильного оруденения (X_{28}), кремнекислотность предполагаемого исходного расплава (X_{34}). Менее существенны: основность плагиоклаза нижних горизонтов (X_{33}), присутствие кислых гибридных пород в кровле интрузий (X_{17}), калиево-предполагаемого исходного расплава (X_{33}), наличие верхних такситовых габбро-долеритов (X_{15}), железистость оливинов нижних горизонтов (X_{20}), железистость предполагаемого исходного

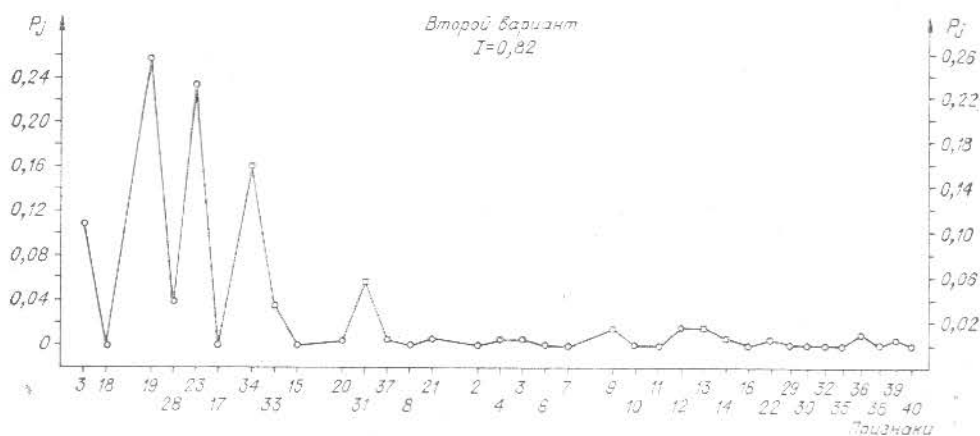
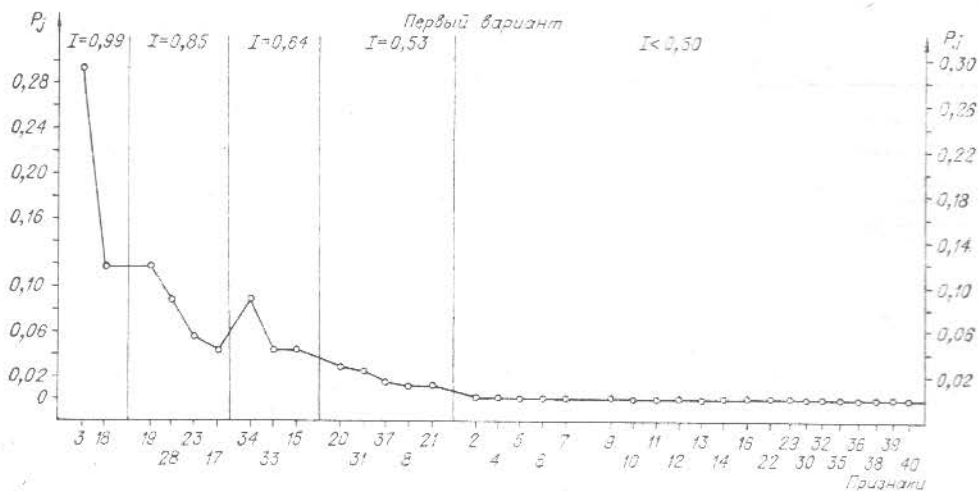


Рис. 7.5. Распределение признаков по информативности во второй формализованной постановке. (P_j — информационный вес признака, I — оценка информативности полученной системы признаков.)

расплава (X_{31}), магнезиальность наиболее богатых оливином горизонтов (X_{37}), присутствие конгломератов, песчаников, сланцев в нижнем экзоконтакте (X_8), железистость оливинов верхних горизонтов (X_{21}). Остальные признаки неинформативны.

С петрологической точки зрения значительная роль целого ряда признаков в разделении «более значимых», «менее значимых» месторождений и рудопроявлений находит вполне определенное объяснение. К таким признакам относятся наличие скарнов и «эруптивных брекчий» в периферических частях интрузий, проявление жильного оруденения, пониженная кремнекислотность предполагаемого исходного расплава, повышение основности плагиоклаза нижних горизонтов, характер железистости оливинов нижних и верхних дифференциатов интрузий, калиевость предполагаемого исходного расплава. Признак наличия в составе интрузий верхних такситовых габбро-долеритов подтверждает давно известную эмпирическую связь проявления основных пегматитов и сульфидного оруденения и свидетельствует в пользу представлений, трактующих эту связь как генетическую (Золотухин, 1964а). Влияние ряда других признаков не совсем ясно.

Результаты внутреннего экзамена приведены на рис. 7.6 и 7.7 (табл. 7.7), где распознавание каждого эталонного объекта проводилось

Результаты внутреннего экзамена во второй постановке

По полученной системе признаков				По исходной системе признаков			
Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}	Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}
1	0,924	-0,154	-0,618	1	0,743	0,569	-0,008
2	0,938	-0,133	-0,608	2	0,758	0,564	-0,01
3	0,946	-0,159	-0,618	3	0,838	0,483	0,023
4	0,935	-0,193	-0,643	4	0,828	0,463	0,037
5	0,935	-0,126	-0,602	5	0,640	0,467	0,131
7	-0,209	0,804	0,433	7	0,556	0,698	0,233
8	-0,232	0,806	0,468	8	0,522	0,709	0,285
9	-0,087	0,429	0,328	9	0,465	0,387	0,207
10	-0,226	0,746	0,422	10	0,545	0,714	0,242
21	-0,631	0,273	0,686	21	0,199	0,257	0,435
23	-0,655	0,487	0,806	23	0,022	0,207	0,460
25	-0,779	0,400	0,866	25	0,034	0,373	0,613
26	-0,734	0,431	0,840	26	-0,014	0,331	0,603
32	-0,609	0,467	0,734	32	0,192	0,333	0,291
34	-0,651	0,363	0,798	34	-0,033	0,180	0,285
35	-0,785	0,366	0,836	35	-0,361	-0,233	0,319
36	-0,693	0,304	0,866	36	-0,074	0,069	0,626
37	-0,707	0,308	0,866	37	-0,013	0,142	0,645

Примечание. V_I, V_{II}, V_{III} — коэффициенты принадлежности эталонных объектов к первому, второму и третьему классам.

последовательно по значениям коэффициента принадлежности (V) этого объекта к каждому из классов и по коэффициентам предпочтения (W).

На рис. 7.6 видно, что максимальные величины коэффициентов принадлежности все эталонные объекты имеют каждый на своем классе, т. е. каждый эталонный объект больше всего похож на объекты своего класса. Например, для объектов первого класса коэффициенты принадлежности лежат в диапазоне $0,924 < V_I < 0,946$ на оси «I класс», для объектов второго $0,429 < V_{II} < 0,806$ на оси «II класс», для объектов третьего $0,686 < V_{III} < 0,866$ на оси «III класс». Заметим, что из всех эталонных объектов только 9-й (Норильск-II) имеет небольшой по величине коэффициент принадлежности ($V_{II} = 0,429$), с чем связан большой диапазон значений V_{II} для всего второго класса.

Окончательное решение об отнесении эталонных объектов к классу принимается по коэффициентам предпочтения (W), т. е. по разности величин принадлежности этих объектов к сравниваемым классам.

Для всех эталонных объектов коэффициенты принадлежности и предпочтения отражают целевые требования, т. е. эталонные объекты близки между собой внутри своего класса, в большей степени различаются с объектами максимально удаленного класса и в меньшей степени различаются с объектами ближайшего класса (в соответствии со средними величинами сходства (\bar{g}_{n+1}) и различия (\bar{d}_{n+1}) по целевому признаку). Например, эталонные объекты первого класса близки между собой ($0,924 < V_I < 0,946$), в большей степени различаются с объектами третьего класса ($0,768 < |W_{I/III}| < 0,789$) и в меньшей степени с объектами второго класса ($0,258 < |W_{I/II}| < 0,519$). Более определенное принятие решений на внутреннем экзамене проводится с использованием порогов значимости.

1: $\zeta_I = \zeta_{II} = \zeta_{III} = 0,5$ — порог для уверенного принятия решения по коэффициентам принадлежности $V \geq 0,5$ к каждому из классов, где $1/2\zeta_I = 1/2\zeta_{II} = 1/2\zeta_{III} = 0,25$ — порог для приближенного принятия

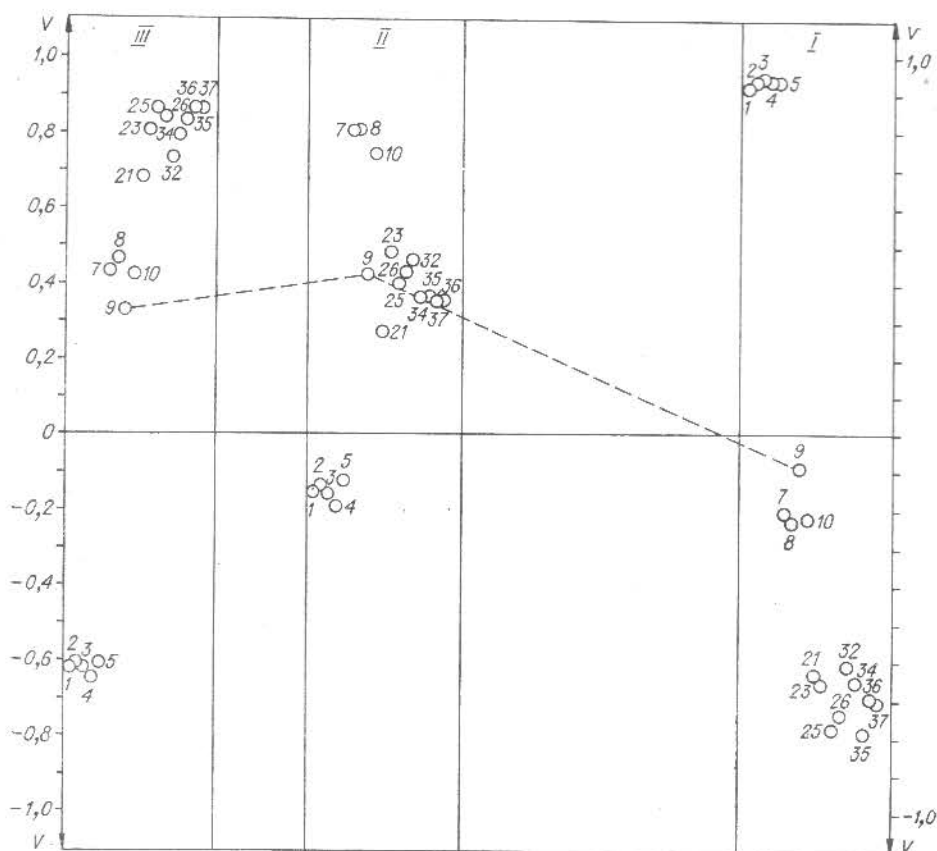


Рис. 7.6. Внутренний экзамен по полученной системе признаков во второй формализованной постановке (V — коэффициент принадлежности; кружок с цифрой — эталонный объект с номером из исходной табл. 7.2; I, II, III — области значений коэффициентов принадлежности эталонных объектов к первому, второму и третьему классам).

решения $V \geq 0,25$. Если коэффициент принадлежности объекта к одному из классов $< 0,25$, то решение о принадлежности объекта к этому классу не принимается, т. е. неопределенное.

2. $\xi_I = \xi_{II} = \xi_{III} = -0,5$ — порог уверенного исключения объекта из каждого класса по коэффициентам принадлежности ($V \leq -0,5$), где $1/2\xi_I = 1/2\xi_{II} = 1/2\xi_{III} = -0,25$ — порог для приближенного исключения ($V \leq -0,25$). Если коэффициент принадлежности объекта к одному из трех классов $> -0,25$, то решение об исключении объекта из этого класса не принимается.

3. $\eta_{I/II} = 0,5$, $\eta_{I/III} = 0,35$, $\eta_{II/III} = 0,15$ — пороги уверенного принятия решения по коэффициентам предпочтения ($|W_{I/III}| \geq 0,5$, $|W_{I/II}| \geq 0,35$, $|W_{II/III}| \geq 0,15$), где $1/2\eta_{I/III} = 0,25$, $1/2\eta_{I/II} = 0,175$, $1/2\eta_{II/III} = 0,075$ — пороги для приближенного принятия решения. Если коэффициент предпочтения (W) объекта для пары сравниваемых классов меньше по абсолютной величине соответствующего из порогов $|W_{I/III}| < 0,25$, $|W_{I/II}| < 0,175$, $|W_{II/III}| < 0,075$, то решение о предпочтении одного из классов для этого объекта не принимается. При этом, если коэффициенты принадлежности объекта к каждому из двух классов $V \geq 0,25$, то считается, что объект занимает промежуточное положение между ними.

Для 17 эталонных объектов выполнены все пороги для уверенного принятия решений, исключение составляет объект Норильск-II (на

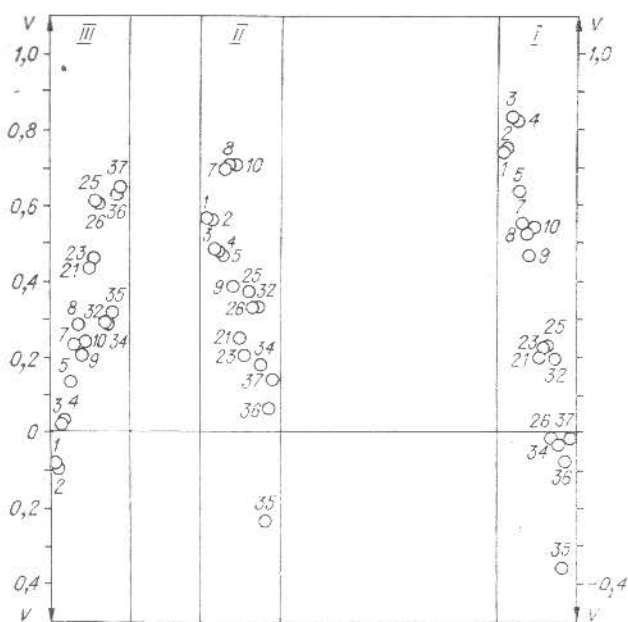


Рис. 7.7. Внутренний экзамен по исходной системе признаков при условии их одинаковой информативности (усл. обозн. см. на рис. 7.6).

Норильск-II на внутреннем экзамене равна половине меры различия между вторым и третьим классами по целевому признаку ($1/2\bar{d}_{n+1}=0,15$). Если максимальная ошибка для одного объекта равна единице (отнесение одного объекта первого класса к третьему или наоборот), то ошибка 0,15 может считаться незначительной, тем более, что она допущена на 1 эталонном объекте из 18.

Результаты разделения эталонных объектов на внутреннем экзамене по информативной системе признаков можно сравнить с начальным разделением (см. рис. 7.7, табл. 7.7), полученным на основании исходной системы признаков при условии их одинаковой информативности, т. е. информационные веса всех признаков равны между собой.

При самом общем рассмотрении видно, что результаты начального разделения значительно хуже: величины коэффициентов принадлежности (точки на рис. 7.7) для эталонных объектов близки между собой независимо от того, из какого они класса. При более детальном рассмотрении видно: все величины коэффициентов принадлежности эталонных объектов к своему классу меньше по абсолютной величине; 2 объекта Норильск-II (9-й объект) и Моронго (32-й объект) имеют максимальные коэффициенты принадлежности не на своих классах, т. е. Норильск-II ошибочно распознается в первый класс, а Моронго — во второй класс; для 15 объектов не выполнены пороги для уверенного принятия решений по коэффициентам предпочтения и т. д.

С учетом сказанного выше полученная система признаков считается вполне информативной для требуемого целевого объединения и разделения эталонных объектов и используется затем для распознавания объектов-проб к одному из трех эталонных классов.

Распознавание проб (37 интрузий, табл. 7.2) проводилось по правилам принятия решений, как и в случае внутреннего экзамена (по коэффициентам V и W). Результаты распознавания проб для наглядности приведены на трех рисунках и в табл. 7.8. На рис. 7.8 представлены пробы, которые преимущественно отнесены к первому или второму классам (более значимые и менее значимые месторождения), на рис. 7.9 — про-

рис. 7.6—9-й объект). По этому объекту принимается приближенное решение о принадлежности его к своему и к третьему классам ($V_{II} = 0,429$, $V_{III} = 0,328$) и приближенное решение о предпочтении своего класса в сравнении с первым ($|W_{II/I}| = 0,258$). Так как предпочтение для объекта Норильск-II своего класса в сравнении с третьим меньше заданного порога ($|W_{II/III}| < 0,075$), а условия принадлежности к этим классам выполнены, то данный объект распознается как занимающий промежуточное положение между ними. В соответствии с этим ошибка распознавания объекта

Таблица 7.8

Результаты распознавания проб во второй постановке

Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}	Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}
6	0,325	0,108	-0,159	41	-0,926	0,228	0,761
11	0,638	0,139	-0,380	42	-0,671	0,477	0,538
12	-0,337	0,789	0,500	44	0,525	0,061	-0,308
13	-0,619	0,134	0,523	45	-0,330	0,455	0,470
14	0,049	-0,010	-0,118	46	-0,830	0,169	0,752
15	-0,765	0,263	0,803	50	-0,702	0,431	0,829
16	-0,549	0,214	0,663	52	-0,913	0,259	0,775
17	0,111	-0,287	-0,498	54	-0,614	0,526	0,793
18	-0,278	0,695	0,424	55	0,142	-0,298	-0,085
19	-0,657	0,501	0,442	57	-0,943	0,212	0,768
20	0,250	-0,112	-0,019	61	-0,390	0,417	0,571
22	-0,280	-0,298	0,198	62	0,797	-0,062	-0,476
24	-0,647	0,486	0,844	63	0,546	0,036	-0,360
27	-0,785	0,370	0,761	64	0,214	0,170	-0,116
28	0,428	-0,159	-0,268	65	0,204	0,168	-0,023
29	-0,573	0,560	0,805	66	-0,583	0,447	0,645
30	-0,749	0,408	0,800	67	-0,337	0,668	0,515
31	-0,720	0,438	0,817	68	-0,251	0,820	0,371
33	0,476	0,059	-0,306				

Примечание. V_I , V_{II} , V_{III} — коэффициенты принадлежности проб к первому, второму и третьему классам.

бы, отнесенные к третьему классу (рудопроявления), и на рис. 7.10 — пробы, по которым не принимается каких-то определенных решений, так как они имеют коэффициенты принадлежности по всем эталонным классам, близкие к нулю.

Уверенное решение о принадлежности к первому классу ($V_I \geq 0,5$) принимается для 4 интрузий: Ханарской ($V_I = 0,797$), Имангдинской ($V_I = 0,638$), Пясинско-Вологодчанской ($V_I = 0,546$) и Макус ($V_I = 0,525$) (рис. 7.8). Из них только Ханарская имеет значимые коэффициенты предпочтения ($|W_{I/III}| = 0,636$, $|W_{I/II}| = 0,430$), т. е. она наиболее уверенно распознается в первый класс. Остальные 3 интрузии, судя по коэффициентам предпочтения, распознаются в первый класс менее уверенно (приблизенно). По другой группе интрузий (Накохоз, Кулюмбинская, Мантуровская и Верхне-Кунтыкахская) принимается приближенное решение о принадлежности их к первому классу ($0,25 \leq V_I < 0,5$); приближенное решение о предпочтении первого класса по сравнению со вторым и третьим принимается для интрузий Накохоз и Кулюмбинская, для интрузий Мантуровская и Верхне-Кунтыкахская решение о предпочтительности ($|W_{I/III}| < 0,25$, $|W_{I/II}| < 0,175$) первого класса не принимается (решение неопределенное). Последние 2 интрузии занимают промежуточное положение между первым и вторым классами.

Уверенное решение о принадлежности (V_{II}) ко второму классу принимается для 5 интрузий: Горстроевской, Нижне-Норильской, Арылахской, Арылахской-I и Улахан-Вавинской (см. рис. 7.8). Из них только Нижне-Норильская уверенно по коэффициентам предпочтения распознается во второй класс ($|W_{II/III}| > 0,35$, $|W_{II/II}| > 0,15$). Интрузии Горстроевская, Арылахская, Арылахская-I, Улахан-Вавинская уверенно по коэффициентам предпочтения отличаются от первого класса ($|W_{II/I}| > 0,35$), решение о предпочтительности второго класса по сравнению с третьим для интрузий Горстроевская, Арылахская и Арылахская-I приближенное (менее уверенное), а для Улахан-Вавинской ($|W_{II/III}| < 0,075$) это решение неопределенное, т. е. можно предполагать промежуточное положение этой интрузии между вторым и третьим классами.

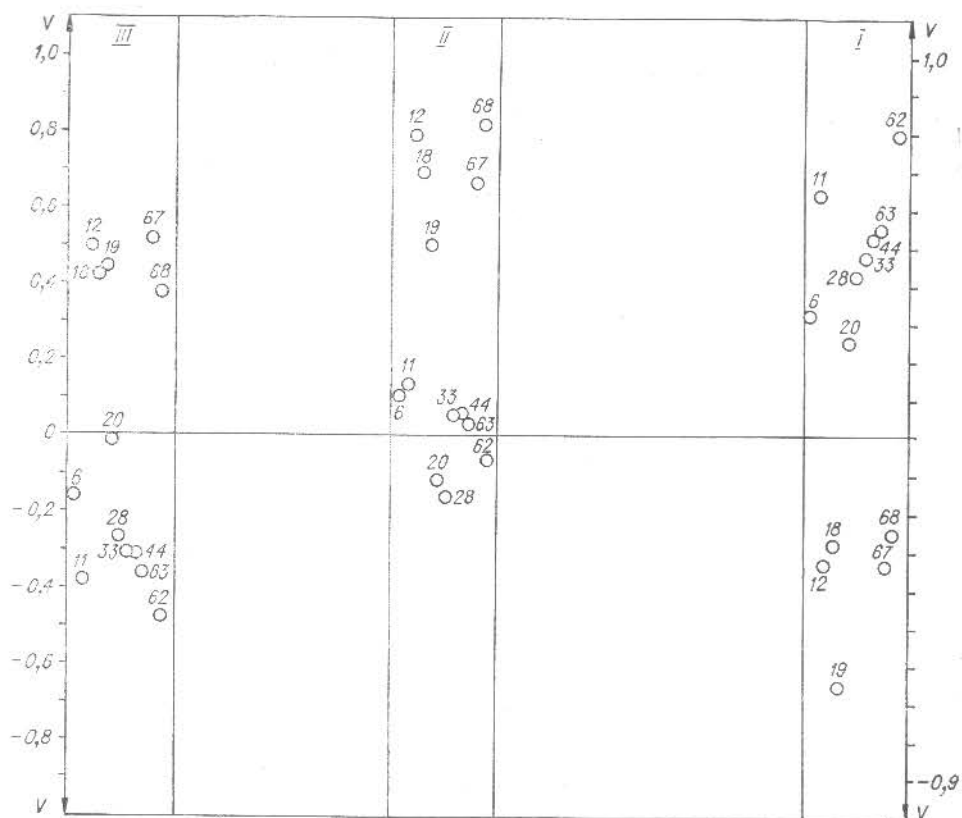


Рис. 7.8. Распознавание проб (V — коэффициент принадлежности; кружок с цифрой — проба с номером из исходной табл. 7.2; I, II, III — области значений коэффициентов принадлежности проб к первому, второму и третьему классам).

По 6 интрузиям (Маймечинской, Мирдзинской, Велингна, Средне-Чангадинской, Зеленой Гриве, Верхне-Тулаектасской) решение о принадлежности их к тому или иному эталонному классу не принимается (рис. 7.10). При этом по 3 интрузиям принимается приближенное решение об исключении (непринадлежности): Мирдзинской из третьего класса ($V_{III} = -0,498$), Велингна из первого ($V_I = -0,280$) и второго ($V_{II} = -0,298$) классов, Средне-Чангадинской из второго ($V_{II} = -0,298$) класса.

Остальные интрузии (18) уверенно принадлежат к третьему классу (рис. 7.9). Из них 16 распознаются в третий класс по предпочтению с первым уверенно ($|W_{III/I}| > 0,5$) и 2 (Джалтульская и Бортовая) приближенно ($|W_{III/I}| > 0,25$). 13 интрузий уверенно по коэффициенту предпочтения отличаются от второго класса ($|W_{III/II}| > 0,15$), приближенно ($|W_{III/II}| > 0,075$) интрузии Ручей Магнитный, Бортовая, Нижне-Фокинская, неопределенное ($|W_{III/II}| < 0,075$) положение между третьим и вторым классами занимают интрузии Нижне-Томбинская и Джалтульская.

Параллельно с решением изложенной задачи во второй постановке было проведено решение той же задачи относительно 3 эталонных классов (второй вариант), в которой интрузия Рудный (эталонный объект из класса рудопроявления, № 26 в табл. 7.2) была заменена на Кулюмбинскую интрузию (№ 28 в табл. 7.2). Это было сделано в связи с тем, что в настоящее время изученность Кулюмбинской интрузии допускает возможность ее использования в качестве эталонного объекта класса рудопроявлений, а ее «непохожесть» на другие объекты этого класса существенно увеличивает представительность объектов этого класса как на этапе обу-

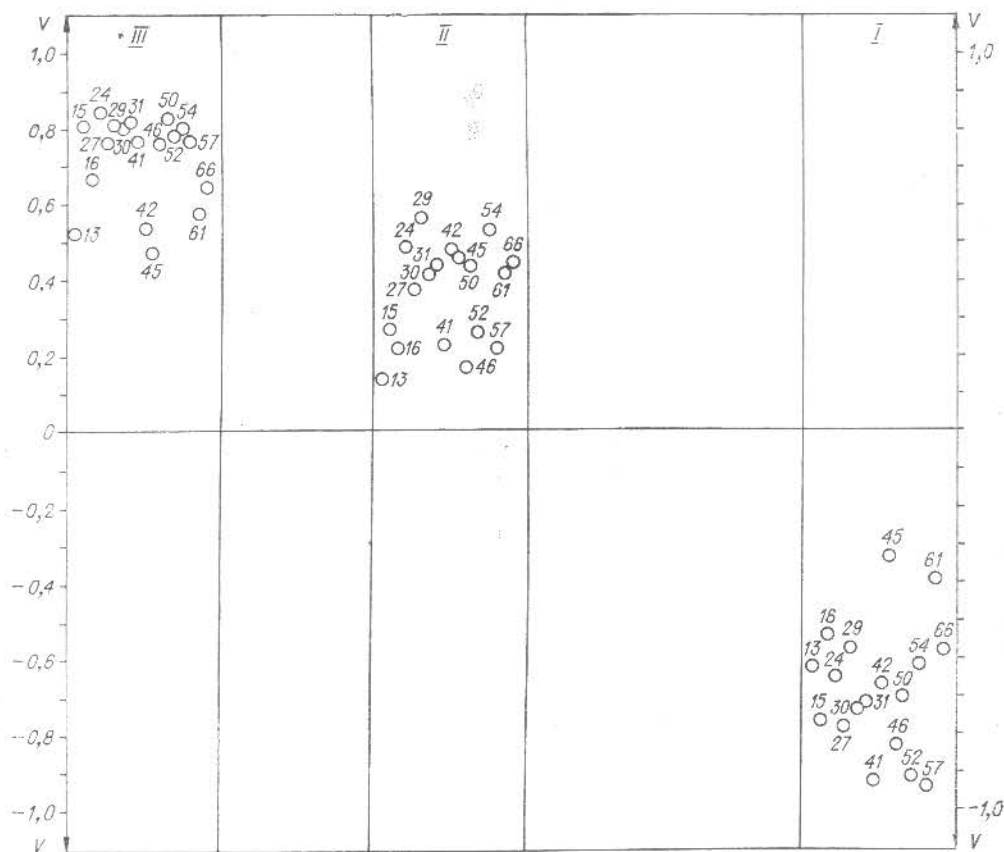


Рис. 7.9. Распознавание проб (усл. обозн. см. на рис. 7.8).

чения, так и при распознавании объектов-проб. Действительно, такая замена оказала определенное влияние как на выбор информативной системы признаков, так и на внутренний экзамен и распознавание проб. Изложим кратко полученные при этом основные результаты.

Информативная система признаков выбиралась в один прием, в нее вошли 19 признаков. Мера информативности полученной системы признаков $I = 0,82$. Наиболее существенны следующие признаки (см. рис. 7.5): наличие «эруптивных брекчий» в периферических частях интрузий (X_{19}), основность плаггиоклаза нижних горизонтов (X_{23}), кремнекислотность предполагаемого исходного расплава (X_{34}), наличие скарнов (X_3); менее существенны: железистость предполагаемого исходного расплава (X_{31}), проявление жильного оруденения (X_{28}), калиевость

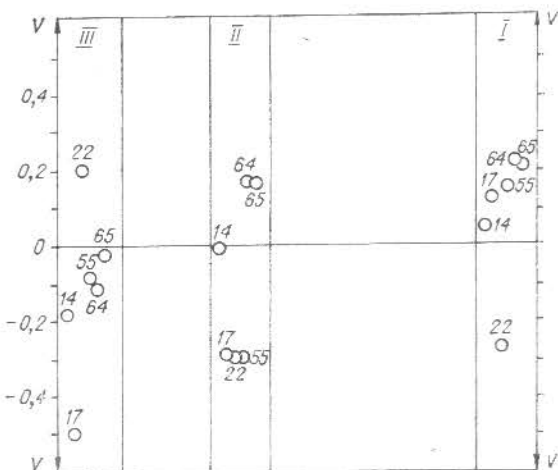


Рис. 7.10. Распознавание проб (усл. обозн. см. на рис. 7.8).

Таблица 7.9

Результаты внутреннего экзамена во второй постановке

По полученной системе признаков				По исходной системе признаков			
Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}	Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}
1	0,878	0,021	-0,395	1	0,744	0,570	0,002
2	0,896	0,140	-0,276	2	0,760	0,548	0,032
3	0,895	0,102	-0,310	3	0,839	0,485	0,104
4	0,878	0,00	-0,406	4	0,830	0,467	0,115
5	0,892	0,113	-0,278	5	0,651	0,471	0,150
7	0,004	0,756	0,445	7	0,558	0,700	0,232
8	0,00	0,745	0,437	8	0,528	0,714	0,271
9	0,186	0,227	0,197	9	0,481	0,389	0,240
10	-0,064	0,671	0,500	10	0,545	0,719	0,232
21	-0,333	0,403	0,730	21	0,205	0,261	0,422
23	-0,541	0,368	0,791	23	0,029	0,212	0,426
25	-0,435	0,412	0,786	25	0,044	0,380	0,432
28	-0,145	0,157	0,382	28	0,181	0,037	0,181
32	-0,302	0,516	0,691	32	0,195	0,338	0,272
34	-0,441	0,478	0,718	34	-0,023	0,187	0,268
35	-0,578	0,331	0,773	35	-0,346	-0,219	0,328
36	-0,548	0,355	0,855	36	-0,063	0,078	0,621
37	-0,592	0,320	0,854	37	-0,002	0,150	0,630

Примечание. V_I , V_{II} , V_{III} — коэффициенты принадлежности эталонных объектов к первому, второму и третьему классам.

предполагаемого исходного расплава (X_{33}), карбонатно-глинистые породы, ангидрид, гипс в нижнем и верхнем экзоконтакте (X_9 , X_{12}), характер дифференцированности интрузивных тел (X_{13}), условный ионный потенциал для предполагаемого исходного расплава (X_{36}); остальные признаки малоинформативные и неинформативные. Как видно из рис. 7.5, большая часть признаков, попавших в информативную систему в первом случае, попала в нее и во втором, но произошли определенные изменения в информативности этих признаков.

Результаты внутреннего экзамена приведены в табл. 7.9, из которой видно, что максимальные величины коэффициентов принадлежности (внутренний экзамен по полученной системе признаков) все эталонные объекты имеют каждый на своем классе. Для 13 эталонных объектов выполнены все пороги для уверенного принятия решений. Уверенное решение по принадлежности к своему классу и по предпочтительности своего класса в сравнении с первым выполняется для 3 объектов (10, 32, 34), но решение о предпочтительности своего класса в сравнении с третьим для 10-го и со вторым для 32-го и 34-го объектов принимается приближенное. Для 28-го объекта (Кулюбинская) выполнены пороги приближенного принятия решений как по принадлежности, так и по предпочтительности. Исключение составляет 9-й объект (Норильск-II), для которого не выполнены пороги для приближенного принятия решений, можно лишь говорить о тенденции распознавания его в свой класс. В соответствии с этим ошибка распознавания объекта Норильск-II на внутреннем экзамене равна половине меры различия между вторым и первым классами по целевому признаку $\frac{1}{2} \bar{d}_{n+1}(II - I) = 0,35$.

Результаты разделения эталонных объектов на внутреннем экзамене по информативной системе признаков можно сравнить с начальным разделением (см. табл. 7.9), полученным на основании исходной системы признаков, т. е. когда информационные веса всех признаков равны между собой. При самом общем рассмотрении видно, что результаты началь-

Таблица 7.10

Результаты распознавания проб во второй постановке

Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}	Номер объекта	V_I	V_{II}	V_{III}
6	-0,043	0,375	0,429	41	-0,800	0,144	0,612
11	0,556	0,377	-0,072	42	-0,780	0,163	0,681
12	-0,301	0,553	0,534	44	0,213	0,200	0,014
13	-0,651	0,098	0,558	45	-0,375	0,399	0,627
14	-0,450	0,020	0,519	46	-0,734	0,206	0,639
15	-0,589	0,343	0,702	50	-0,636	0,308	0,772
16	-0,523	0,231	0,737	52	-0,751	0,192	0,645
17	-0,412	-0,406	-0,362	54	-0,244	0,627	0,643
18	0,199	0,594	0,482	55	0,310	0,196	0,060
19	-0,482	0,032	0,562	57	-0,812	0,133	0,634
20	0,436	0,306	0,019	61	0,397	0,425	-0,054
22	-0,448	0,054	0,499	62	0,627	0,246	-0,052
24	-0,491	0,452	0,760	63	0,539	0,193	-0,191
26	-0,323	0,551	0,599	64	0,064	0,479	0,415
27	-0,648	0,262	0,699	65	-0,172	0,284	0,475
29	-0,172	0,642	0,545	66	-0,174	0,473	0,454
30	-0,566	0,382	0,758	67	-0,542	0,369	0,733
31	-0,527	0,418	0,768	68	-0,101	0,711	0,402
33	0,388	0,341	-0,022				

Примечание. V_I, V_{II}, V_{III} — коэффициенты принадлежности проб к первому, второму и третьему классам.

ного разделения значительно хуже: все величины коэффициентов принадлежности эталонных объектов каждого к своему классу меньше по абсолютной величине; 3 объекта (Норильск-II, Кулюмбинская, Моронго; номера объектов 9, 28, 32) имеют максимальные коэффициенты принадлежности не на своих классах, т. е. дают ошибку в распознавании; неопределенное решение о предпочтительности своего класса для 3 объектов первого класса (1, 2, 5), 3 объектов второго класса (7, 8, 10) и для 4 объектов третьего класса (21, 23, 25, 34). Общая ошибка на внутреннем экзамене по исходной системе признаков равна 5,45, т. е. в 15 раз больше, чем по полученной системе признаков.

Учитывая все это, естественно утверждать, что полученная система признаков считается вполне информативной для требуемого целевого объединения и разделения эталонных объектов и используется затем для распознавания объектов проб к одному из трех эталонных классов. Результаты распознавания проб приведены в табл. 7.10. Коротко остановимся только на объектах-пробах, которые преимущественно отнесены к первому классу.

Уверенное решение о принадлежности к первому классу принимается для 3 интрузий: Ханарской ($V_I = 0,627$), Имангдинской ($V_I = 0,556$), Пясинско-Вологочанской ($V_I = 0,539$). Из них Ханарская и Пясинско-Вологочанская распознаются приблизительно по коэффициентам предпочтения ($|W_{I/II}| \geq 0,25$, $|W_{I/III}| \geq 0,175$) в первый класс, Имангда распознается приблизительно по коэффициенту предпочтения ($|W_{I/III}| = 0,314$) в первый класс по сравнению с третьим и неопределенно по сравнению со вторым ($|W_{I/II}| < 0,175$), т. е. она занимает промежуточное положение между первым и вторым классами. По другой группе интрузий (Верхне-Кунтыкахская, Шакохоз и Средне-Чангадинская) принимается приближенное решение о принадлежности их к первому классу ($0,25 \leq V_I < 0,5$), решение о предпочтительности первого класса для этих интрузий не принимается (решение неопределенное) они занимают (менее уверенно, чем Имангда) промежуточное положение между первым и вторым классами.

В отличие от первого варианта интрузии Мантуровская и Макус не принадлежат к первому классу. Для интрузии Макус решение неопределенно ($V_I < 0,25$, $V_{II} < 0,25$, $V_{III} < 0,25$), а для Мантуровской принимается решение о промежуточном положении между вторым и третьим классами. Определенный интерес вызывают результаты распознавания для интрузии Бортовая, которая в первом варианте была отнесена к рудопрооявлениям, а во втором — занимает промежуточное положение между первым и вторым классами, тяготея к классу менее значимых месторождений ($V_{II} = 0,425$). Основную роль в переходе этой интрузии из класса рудопрооявлений (первый вариант решения) в класс месторождений (второй вариант решения) сыграло изменение информативности следующих признаков (см. рис. 7.5). Значительно уменьшилась информативность признаков: наличие скарнов (X_3), форма интрузии (X_{13}), проявление жильного оруденения (X_{23}), присутствие кислых гибридных пород в кровле интрузии (X_{17}) и наличие верхних такситовых габбро-долеритов (X_{15}); увеличилась информативность признаков: наличие эруптивных брекчий в периферических частях интрузий (X_{19}), повышение основности плагиоклаза нижних горизонтов (X_{23}) и понижение кремнекислотности и железистости предполагаемого исходного расплава (X_{34} , X_{31}).

Интрузия Бортовая — краевая часть Талнахской интрузии, отнесение ее во втором варианте к классу месторождений указывает, что полученная информативная система признаков учитывает те особенности интрузии, которые свидетельствуют о связи всей интрузии в целом с богатым сульфидным медно-никелевым оруденением. В то же время, исходя из первого варианта решения, сама по себе эта часть Талнахской интрузии не представляет особого интереса на сульфидное медно-никелевое оруденение. То же самое, вероятно, можно сказать, исходя из второго варианта решения, и об интрузии Макус, с которой связано железорудное месторождение.

Таким образом, результаты решения по обоим вариантам не только для интрузии Бортовая, но и для остальных интрузий несут, по-видимому, полезную информативную нагрузку. Эти результаты учитываются при окончательных выводах о перспективности интрузий, относимых к первому классу, т. е. повторяющиеся результаты решения служат основанием для уверенных рекомендаций по проведению разведочных работ, а неповторяющиеся — для продолжения их изучения.

Ранее было проведено решение задачи разделения более значимых и менее значимых месторождений логико-дискретными методами на основе использования длин тушиковых K -тесторов (Бишаев, Карбышев, 1974; Васильев и др., 1974). При распознавании объектов-проб этим методом интрузии Ханарская и Имангдинская, так же как и в рассматриваемом случае, были отнесены к классу более значимых месторождений, а интрузии Макус, Накохоз, Мантуровская, Верхне-Кунтыкахская и Кулюмбинская — к классу менее значимых месторождений (Пясинско-Вологодчанская ранее не рассматривалась).

Результаты, полученные методом «целевой итерационной классификации» и ранее логико-дискретным методом, легли в основу окончательных выводов о перспективности рассматриваемых интрузий.

7.6. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Исходя из поставленной цели — выбора наиболее перспективных на богатое сульфидное медно-никелевое оруденение дифференцированных интрузий севера Сибирской платформы для дальнейших геологоразведочных работ по признакам, не дающим каждый в отдельности прямого указания на перспективность интрузий, были использованы методы ло-

гико-математической обработки массива информации. В процессе применения методов по реализации заданной цели и, в частности, распознавания прогнозируемых объектов сделаны следующие выводы.

1. Специфика информации, подлежащей обработке, и многоцелевая постановка геологической задачи вызвали необходимость использования нового математического метода для ее решения. Проведены методические разработки, которые связаны с развитием целевого подхода к исследованию объектов, заданных списком признаков. Для решения поставленных задач был успешно применен новый алгоритм итерационного способа нахождения информативной системы признаков с последующим распознаванием объектов. С помощью этого метода получено достаточно эффективное решение поставленных задач, что позволяет предварительно судить о широких возможностях нового метода для решения задач подобного типа.

2. Наиболее целесообразным, в отличие от наших ранних разработок (см. список литературы), признано последовательное решение задачи, в связи с чем рассмотрены две постановки, позволяющие последовательно отделить «пустые» объекты от «продуктивных», среди «продуктивных» (пробы) выделить «рудопроявления», «менее значимые» и «более значимые» месторождения.

3. Полный список признаков, характеризующий исследуемые объекты был подразделен на 4 группы: геолого-тектоническая обстановка, строение интрузий, минералогические особенности, петрохимические особенности. Роль групп признаков в каждой из постановок несколько меняется. В первой постановке на втором этапе наибольший информативный вес имеют признаки, относящиеся к минералогической и петрохимической группам. По второй постановке наиболее эффективными при разделении эталонных объектов оказались качественные признаки, характеризующие геолого-тектоническую обстановку, строение интрузий и признаки — наличие жильного оруденения, понижение кремнекислотности в предполагаемом исходном расплаве и повышение основности плагиоклаза нижних горизонтов.

Полученные информативные системы признаков по постановкам отражают наиболее существенные особенности рудопосных интрузий и должны быть, с одной стороны, непротиворечиво объяснены любой предлагаемой петрологической моделью, а с другой — объективно использованы для построения новых моделей.

4. По результатам распознавания во второй постановке намечен ряд наиболее интересных объектов, диагностируемых этими методами как «месторождения». Для детальных разведочных работ на данном этапе исследований рекомендуется из новых интрузий Ханарская, а также уже известны, но недостаточно изученные интрузии — Имашдинская и Пясиноско-Вологодчанская.

Заслуживают внимания и дальнейшего изучения как объекты «второго эшелона» интрузии Накохоз, Маптуровская, Макус, Кулюмбинская, Верхне-Кунтыкахская, Средне-Чангадинская и др. Понятно, что оправданность указанных рекомендаций, несомненно, зависит от полноты и качества исходной информации, представленной геологами к началу данных работ.

5. Учитывая, что к югу от Норильского района прослеживается полоса высокомагнезиальных потенциально никеленосных (Варазд, 1974) интрузий, имеет смысл в дальнейшем собрать материал по району до широты Ниж. Тунгуски. Аналогичная работа по выявлению перспектив дифференцированных трапсовых интрузий, обнаруженных в западной части Сибирской платформы в процессе геологосъемочных работ КТГУ, по которым в литературе почти отсутствует информация, позволит в будущем выявить новые перспективные объекты и в этом районе.