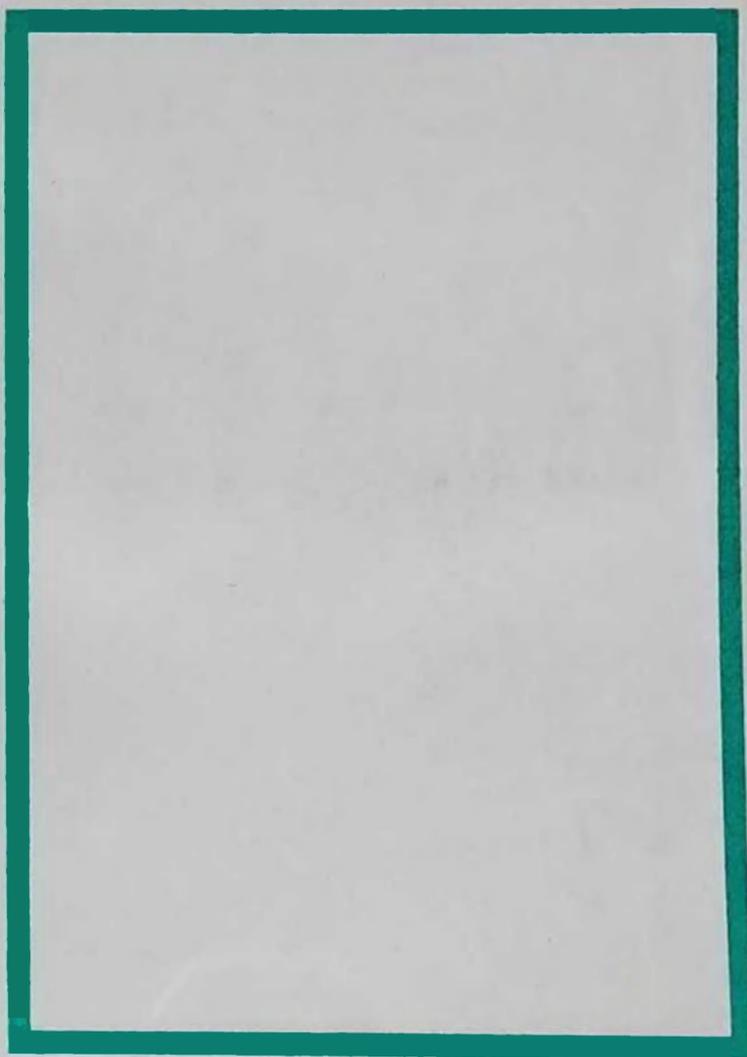


553
К 65
Р.М.КОНСТАНТИНОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
КОЛИЧЕСТВЕННОГО
ПРОГНОЗА
РУДОНОСНОСТИ**



2004

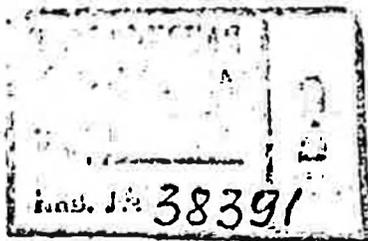
Р. М. КОНСТАНТИНОВ

553
К 65

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
КОЛИЧЕСТВЕННОГО
ПРОГНОЗА
РУДОНОСНОСТИ



МОСКВА
«НЕДРА»
1979



Константинов Р. М. Математические методы количественного прогноза рудоносности. М., «Недра», 1979. 127 с.

Рассматриваются вопросы, связанные с подготовкой геологических данных, их обработкой вероятностно-статистическими и логико-информационными методами, геологической интерпретацией результатов математической обработки металлогенической информации. Основное внимание уделяется наиболее простым способам, позволяющим во многих случаях решать задачи количественного прогноза без помощи ЭВМ. Применение этих способов иллюстрируется многочисленными примерами. Работа предназначена для широкого круга геологов, интересующихся применением математических методов при прогнозах.

Табл. 35, ил. 7, прил. 3, список лит. — 66 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимость значительного повышения эффективности поисково-разведочных работ на рудные полезные ископаемые является сейчас одной из наиболее актуальных геологических проблем. В связи с этим заметно возрастают требования к металлогеническим прогнозам. Точно такое же явление наблюдается и в других областях геологии, связанных с прогнозированием. Однако геологические методы до последнего времени успешно совершенствовались лишь в одном направлении — в способах получения новых данных. Вопросы синтеза этих данных для создания качественно новой информации о геологических объектах, позволяющей успешно решать задачи прогнозирования, не имеют должной научной разработки.

В связи с этим понятен большой интерес, который широкие круги геологов проявляют к современным методам обработки данных, в первую очередь к математическим методам, основанным на применении ЭВМ. Однако применяемый обычно сложный математический аппарат и специфические вопросы, возникающие при использовании ЭВМ, приводят к тому, что большинство геологов оставляют попытки овладеть этими методами уже на первых шагах. Поэтому главная задача данной работы — познакомить геологов-поисковиков и разведчиков с некоторыми в какой-то степени уже оправдавшими себя в практике металлогенических исследований, наиболее простыми математическими способами обработки геологических данных.

Следует заметить, что рассматриваемые в работе сравнительно простые методы обработки геологических данных при прогнозе рудоносности все же требуют для овладения ими определенных усилий. Поскольку эти методы позволят получать интересные результаты путем несложных расчетов, можно надеяться, что знание их пробудит еще больший интерес к проблеме и приведет к работе над более сложными и более результативными способами, без которых через 10—15 лет, вероятно, не будет считаться обоснованным ни один металлогенический прогноз.

Основой данной работы являются лекции по математическим методам в металлогении, которые автор читал на курсах повышения квалификации инженеров-геологов в Московском геологоразведочном институте и Московском государственном университете. При подготовке рукописи к печати существенную помощь оказали Г. А. Соколов, Н. Г. Демидова и С. В. Сиротинская, Р. Х. Бахтеев, а также Т. Г. Алякринская и В. Я. Кузнецова. Автор пользуется случаем выразить им свою признательность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уже недостаточно заключения о возможности выявления тех или иных типов месторождений в новом регионе; сейчас требуется дать прогноз количественный, т. е. указать вероятность присутствия в изучаемом регионе крупных месторождений и оценить возможные масштабы этих месторождений. Поэтому в металлогении — науке о закономерностях распределения рудного вещества в земной коре — все более и более четко выделяется новая ветвь — количественная металлогения. Ее задачей является прогноз вероятной рудоносности геологических объектов (металлогенических провинций, рудных районов и рудных полей) в численном выражении.

Поскольку количественные прогнозы основываются на синтезе сведений, накопленных в результате самых разнообразных геологических исследований, закономерны попытки все более широкого использования при прогнозировании математических методов обработки соответственным образом подготовленных геологических сведений.

Предполагается, что, как правило, обработка этих геологических данных должна проводиться с помощью ЭВМ. Однако имеющийся уже опыт показывает, что в целом ряде случаев интересные результаты, непосредственно относящиеся к количественным прогнозам, могут быть получены после использования сравнительно простых математических приемов, не требующих сложной вычислительной техники. По-видимому, широкое их применение может заметно содействовать повышению эффективности прогнозов. Знакомство с этими приемами и является основной задачей данной работы. Более полное изложение применяемых в настоящее время математических методов прогнозной оценки месторождений, но рассчитанное на читателя, имеющего математическую подготовку, есть в специальных руководствах.

В настоящее время в прогнозно-металлогенических исследованиях испытываются многочисленные методы, заимствованные из различных разделов математики и, по-видимому, лишь в будущем можно будет с полной определенностью сказать, какие из металлогенических задач и какими математическими методами должны решаться. На это, в частности, указывают Д. А. Родионов, Р. И. Коган и Ю. П. Белов (1977), которые, анализируя важнейшие современные направления применения математических методов в геологии, выделяют среди них следующие: 1) ме-

тоды оценки параметров распределений и «свертывания» геологической информации; 2) методы проверки гипотез о параметрах одномерных и многомерных распределений; 3) методы разграничения и классификации геологических объектов по комплексу признаков; 4) методы поисков информативных комбинаций признаков, обуславливающих различия в сопоставляемых геологических объектах; 5) методы корреляционно-регрессионного анализа, используемые для извлечения дополнительной информации; 6) методы тренд-анализа, применяемые для обработки данных в прогнозных геологических задачах; 7) стохастические и эвристические методы «распознавания образов», применяемые в задачах диагноза и классификации геологических объектов; 8) адаптивные и неадаптивные методы статистического программирования, методы теории стратегических, дифференциальных, байесовских решений, T -матричных игр и методы рефлексивного анализа при принятии решений в конфликтных ситуациях, которые можно использовать в задачах управления геологической отраслью; 9) математические методы исследования информационно-логических систем; 10) методы решения плохо обусловленных матриц с целью решения проблемы устойчивости статистических критериев, применяемых в геохимии.

Из приведенного перечня очевидно, что различные математические методы могут применяться для решения одних и тех же прогнозно-металлогенических задач, связанных как с классификацией, так и с выбором информативных признаков и прогнозной оценкой объектов исследования. В настоящее время поиски наиболее эффективных математических методов решения прогнозно-металлогенических задач являются актуальной темой для дальнейших исследований. Однако там, где эти методы выходят за рамки математической статистики, ее разработка наталкивается на отсутствие надежных критериев для оценки качества результатов. Практически единственным способом такой оценки является исследование контрольных объектов (так называемых объектов экзамена). При этом возможность использования результатов решения проверяется, например, путем прогнозной оценки перспектив объектов, масштабы которых уже хорошо известны. Выраженная в процентах величина, характеризующая отношение числа правильно оцененных объектов к их общему числу, служит мерой эффективности примененного метода. Очевидно, что при таком подходе не учитывается другая сторона — характер необходимой для прогнозирования исходной информации, ее объем и стоимость. Ведь при использовании одних методов для сравнительно надежного прогноза достаточно данных, полученных в процессе обычного геологического картирования и металлометрического опробования, а для других, немногим более точных, требуются большие объемы дополнительной информации. Опыт показал, что даже сравнительно простые методы, примененные для прогнозной оценки территории на основании

данных обычной геологической съемки масштаба 1 : 50 000, могут дать надежные прогнозы, подтверждаемые специальными геологопоисковыми работами.

Другим, не менее важным, критерием оценки результатов является их геологический смысл. Очевидно, что решение, как правило, не должно коренным образом противоречить существующему геологическому опыту. Если же такое противоречие возникло, то необходимо установить его причины, т. е. связано ли оно с ограниченными возможностями примененных методов или с недостаточной полнотой исходных сведений, или, напротив, с их избытком, или, наконец, с дефектами существующих геологических концепций. Важно, чтобы в процессе математической обработки имелись возможности не только прогнозировать, но и правильно понять относительную роль различных факторов рудообразования и в связи с этим наметить новые цели для исследований.

Наконец, самым важным является критерий практики, т. е. проверка обоснованности прогнозов, полученных с помощью различных математических методов поисково-разведочными работами. Однако в этом направлении пока тоже еще очень мало сделано.

Перечисленные выше методы могут быть условно разделены на две категории: 1) вероятностно-статистические и 2) логико-информационные.

Вероятностно-статистические методы основываются главным образом на достижениях математической статистики. Их преимуществом является возможность теоретического определения возможной ошибки по заданной вероятности или, наоборот, вычисление вероятности явления при заданной ошибке.

Широкое внедрение вероятностно-статистических методов в практику самых разнообразных геологических работ у нас в стране связано с исследованиями Д. А. Родионова, А. Б. Вистелюса, И. П. Шарпова и др.

К неудобствам их использования при обработке металлогенической информации относится, во-первых, то обстоятельство, что большинство из этих методов приспособлено лишь к обработке численных результатов наблюдений, а во-вторых, то, что для получения достоверных результатов, как правило, необходимо иметь большое количество исходных данных.

Логико-информационные методы включают как некоторые способы математической статистики, применяемые для обработки описательной геологической информации, так и главным образом средства эвристических алгоритмов классификации и распознавания образов, основанные на комбинаторике и математической логике. Как указывают В. Н. Ушаков, Ф. П. Кренделев, В. А. Воронич (1976), эвристическими называются совокупности методов поисков доказательств и путей решения по аналогии, которые строгими математическими способами решаться не мо-

гут. Эвристические методы призваны для выявления кратчайшего пути решения задачи с помощью логических операций. Появление этих методов связано с работами С. В. Яблонского, Ю. И. Журавлева, В. Б. Кудрявцева, А. Н. Дмитриева и др. Эти методы применяются главным образом для обработки описательных, качественных данных, с которыми большей частью приходится иметь дело при прогнозно-металлогенических исследованиях. Их эвристический характер не позволяет предсказывать вероятную ошибку и потому возможность их применения устанавливается опытным путем после проверки на контрольных объектах, где прогнозируемое свойство заведомо известно. К тому же логико-информационные методы разработаны специально для исследования сложных систем со слабо формализованными признаками, имеющими неясную иерархию. Они позволяют получать определенные выводы даже при небольших объемах исходных данных.

Как уже говорилось выше, в настоящее время трудно судить о сравнительной эффективности различных методов решения одних и тех же задач. Критериями пока являются надежность распознавания, полученная на примере контрольных объектов, а также геологическая обоснованность результатов и подтверждение выводов поисково-разведочными работами.

Анализ уже выполненных исследований показывает, что для прогнозно-металлогенических задач наиболее эффективные математические методы, по мнению А. Д. Щеглова (1976), могут быть использованы в следующих направлениях:

1) для информационных задач, связанных с анализом публикаций и организацией машинного поиска информации. Этим вопросам посвящена, в частности, монография под редакцией В. И. Мошкина (Автоматизированные..., 1973);

2) для комплексной обработки всей геологической информации (включая геофизическую и геохимическую). Обзор методов обработки такой информации был дан Н. П. Боровко (1971);

3) для выявления надежных критериев месторождений определенных рудных формаций и установления отличительных признаков наиболее крупных месторождений, включая условия их образования (Константинов, 1973);

4) при регионально-металлогеническом анализе для проведения аналогий с целью прогноза;

5) для количественной оценки в региональных прогнозах определения возможных масштабов прогнозируемых месторождений. Решение этой задачи имеет большое значение для более эффективного выбора оптимальных направлений поисковых работ.

Рассматриваемые в работе простые математические методы позволяют подойти к анализу последних трех перечисленных задач, а среди них в первую очередь к определению значимости геологических критериев, позволяющей перейти к количественным прогнозам и построению статистически обоснованных эффективных металлогенических схем и классификаций.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Подготовка информации для последующей оценки перспектив исследуемых геологических объектов (Математические методы..., 1973) сводится к определению объекта изучения; к определению исходной совокупности признаков и требований, предъявляемых к фактическому материалу; к сбору фактического материала, необходимого для решения формулированной задачи.

Объектами изучения могут быть какие-либо территории, для которых определяются перспективы локализации в них отдельных видов или комплекса месторождений полезных ископаемых, а также ранее обнаруженные, но слабо изученные месторождения и рудопроявления, среди которых необходимо выбрать наиболее перспективные для проведения ревизионных геологоразведочных работ.

В тех случаях, когда объектом изучения являются территории, то они делятся на элементарные участки — «ячейки равного размера и одинаковой формы» (Бугаец, Дуденко, 1976). Обычно элементарным участкам придают квадратную форму, однако, если породы, слагающие исследуемую площадь, имеют отчетливо выраженное единое преобладающее простирание, форма участка может быть прямоугольной. Размер элементарного участка в зависимости от конкретной задачи, сложности геологического строения территории и других причин может быть от 1 до 4 см² в масштабе исходной карты или плана.

Для прогнозной оценки месторождений и рудопроявлений можно придерживаться следующих правил (Ушаков и др., 1976): для характеристики региональных признаков использовать геологические карты масштаба 1 : 50 000 — 1 : 200 000; для характеристики локальных признаков — крупномасштабные (1 : 5000 — 1 : 1000) геологические планы. Границы рудных полей можно определять по повышенным концентрациям полезного компонента, по разломам, контактам различных по литологическим свойствам пород или, наконец, по исчезновению тел с промышленными концентрациями полезного компонента.

На этом же этапе, после того как определены объекты изучения и совокупность признаков, на основании которых предполагается разработать прогнозные рекомендации, необходимо выбрать математические методы, с помощью которых эти прогнозные рекомендации будут получены.

При подготовке геологических данных для дальнейшей математической обработки, на основе которой предполагается дать количественный прогноз рудоносности, можно выделить несколько стадий.

1. Предварительная оценка и сбор первичной информации, определение возможных математических методов ее последующей обработки, которые выбираются исходя из задач исследования и характера исходных геологических данных.

2. Составление шкалы признаков.

3. Составление основной таблицы характеристик объектов.

4. Выбор среди известных объектов эталонов и объектов, используемых затем для проверки качества решения (для экзамена).

Определяя возможный математический подход следует иметь в виду, что при разработке количественных прогнозов рудоносности независимо от масштабов исследований приходится решать одну или несколько из следующих задач:

1) определение степени аналогии между известным и оцениваемым объектами;

2) составление классификаций объектов и определение принадлежности прогнозируемого объекта к тому или иному классу;

3) выявление эмпирических закономерностей в размещении объектов;

4) выявление факторов рудоносности и оценка их роли в рудообразовании;

5) проверка обоснованности геологических представлений о связях различных факторов рудообразования.

Решение первой задачи до настоящего времени основывается главным образом на интуитивных соображениях и, как будет показано ниже, может быть формализовано лишь в минимальной степени.

Остальные задачи, в зависимости от характера исходной информации, могут быть решены как вероятностно-статистическими, так и логико-информационными методами.

Большое значение в выборе методов имеет характер исходной геологической информации. В прогнозно-металлогенических исследованиях она может быть трех видов: количественной, полуколичественной и качественной.

Количественная (цифровая) информация включает разнообразные аналитические данные (спектральные, химические, термические, количественные минералогические анализы технологических проб и другие анализы), а также результаты геофизических исследований.

Полуколичественная информация, которую обычно отображают в баллах, включает результаты полуколичественных спектральных анализов, визуальные оценки содержания различных минералов при петрографических и минералогических наблюде-

ниях (выделение главных, второстепенных, мало распространенных, редких минералов и т. д.).

Качественная (описательная) информация состоит из перечня характерных для рассматриваемой группы объектов геологических структур, литологических типов пород, текстур и структур пород, структур руд и т. п.

В качестве источника сведений, необходимых для разработки прогнозов, создаются специальные картотеки. В их организации различают четыре стадии: 1) анализ содержания и возможностей кодирования материала; 2) регистрация кодированного материала на соответствующие носители информации; 3) анализ и кодирование типовых информационных запросов; 4) поиск и выдача информации для последующей обработки. В качестве носителей геологической информации обычно используют или ручные перфокарты с двухрядной краевой перфорацией, или в последнее время все чаще, восьмидесятиколоновые машинные перфокарты.

Среди ручных перфокарт с краевой перфорацией сейчас употребляются только перфокарты типа К-5.

При записи информации используются или прямой, или цифровой ключи. Прямой ключ применяется, когда кодируются независимые признаки. Тогда каждому признаку присваивается определенное отверстие перфокарты. Этот ключ наименее экономичен в смысле использования возможностей кодирования больших объемов информации по перфокарте. Для записи взаимосвязанных признаков, находящихся в определенном соподчинении, применяются цифровые ключи, позволяющие с помощью небольшого количества отверстий зафиксировать значительные объемы информации.

Для кодирования лучше всего пользоваться макетом кодовой перфокарты.

Опыт показывает, что оптимальный объем картотеки из ручных перфокарт — до 20 тысяч карточек. Когда число карточек больше, пользоваться картотекой неудобно.

В отношении выбора наилучших ключей для кодирования на ручные перфокарты существуют теоретические разработки, изложенные в специальных руководствах (Олейников, Михайлова, 1968).

Перфокарты машинной сортировки также позволяют кодировать характеристики объектов как в прямом ключе, когда каждой пробивке отвечает отдельное понятие или признак, так и цифровые данные. Последними кодируются или количественные признаки, или признаки, имеющие определенное иерархическое подразделение. Кодовые символы записываются в десятичной системе (если обработка информации ведется с помощью табуляторов), в восьмеричной или двоичной системе (если обработка ведется на ЭВМ).

Пробивки на картах выполняются с помощью клавишных перфораторов. Картотеки машинных перфокарт обязательно должны выполняться в двух экземплярах — рабочем и контрольном.

Скорость поиска информации на электромеханических табуляторах — 300—450 карт в минуту, на ЭВМ — 700—1000 карт в минуту. С помощью печатающих устройств информация с карточек выдается в цифровом или текстовом виде и может быть подвергнута статистической или иной вычислительной обработке.

Обязательным элементом всех машинных перфокарт является номер объекта. Связывая через единый номер объекта несколько перфокарт, можно кодировать очень большие объемы сведений.

В отличие от картотек, созданных на картах с краевой перфорацией, машинные перфокарты обязательно сопровождаются таблицами или иными стандартными формами хранения исходных данных, из которых лишь часть данных переносится на перфокарты, а остальная хранится в обычном виде или микрофильмуется.

Сочетание перфокартотеки, таблиц исходных данных и схемы кодирования образуют единую информационно-поисковую систему (ИПС).

Так, для месторождений полезных ископаемых штата Колорадо была разработана информационно-поисковая система, в которой для характеристики каждого месторождения используются пять кодовых карт. На первой карте фиксируется номер месторождения (колонки 1—6), набор рудных элементов (колонки 7—46), набор рудных минералов (колонки 47—80); на второй — номер месторождения (колонки 1—6), набор жильных минералов (колонки 7—80); на третьей — номер месторождения (колонки 1—6); тип рудной залежи (7—12), тип складок (13—18), тип вмещающих пород (19—30); форма ассоциированных интрузий (31—42), тип пород ассоциированных интрузий (43—54) и т. д. Четвертая карта посвящена морфологии рудных тел, пятая — отражает содержания основных и сопутствующих полезных компонентов.

Для кодирования применялся прямой код (для типа месторождений, формы тел, минералов, геологических структур). Цифровые коды использовались для записи возраста месторождений и горных пород, элементов залегания рудных тел и геологических структур, содержания полезных компонентов в рудах и вмещающих породах.

Как упоминалось, вопрос о выборе тех или иных математических методов решения прогнозных задач в каждом конкретном случае решается в тесной связи с характером исходной информации. Для цифровой информации и значительного числа хорошо изученных объектов лучше использовать вероятностно-стати-

стические методы. В тех случаях, когда приходится иметь дело с геологическими описаниями, а количество хорошо изученных исходных объектов измеряется одним-двумя десятками, больший эффект могут дать логико-информационные методы.

Вторая стадия подготовки исходной геологической информации — составление шкалы признаков, особенно важен при анализе качественных, описательных данных.

Как известно, любой геологический объект характеризуется свойствами, которые фиксируются его описанием. Это описание в конце концов можно представить в виде списка признаков, который будет называться шкалой признаков. В такой шкале каждый признак в отличие от описания должен иметь строго фиксированное место, соответствующее его номеру. Если в описании объекта фигурируют чисто качественные сведения, для которых какая-либо оценка значимости будет иметь субъективный характер, то такие признаки фиксируются в соответствующих подразделениях шкалы лишь в зависимости от их наличия или отсутствия (соответственно «1» или «0»). Шкалы, целиком состоящие из таких признаков, называются номинальными. В тех же случаях, когда шкала состоит из признаков, которым может быть дана относительная (полуколичественная) оценка, такая шкала называется пропорциональной.

При разработке металлогенических признаков в наибольшей мере используется описательная, качественная информация, а потому особое внимание необходимо уделить вопросам составления номинальных шкал геологических признаков.

Во всех случаях шкалы признаков должны отвечать следующим требованиям:

1) они должны позволить собрать достаточно полную, обеспечивающую решение задачи, информацию по максимальному числу объектов. Поскольку хорошо изученных объектов обычно бывает мало, шкала должна соответствовать среднему уровню изученности этих объектов;

2) шкала должна быть стабильной, т. е. кодируемые признаки должны одинаково фиксироваться всеми квалифицированными исследователями;

3) шкала должна быть обоснованной, т. е. в ней должна использоваться система признаков, принятая в описаниях большинством исследователей.

Желательно определить также степень диагностируемости признаков, что достигается подсчетом количества совпадений, возникающих у различных исследователей при характеристике одной и той же особенности объекта.

Как показывает опыт проведенных исследований, при составлении номинальной шкалы признаков следует опираться на некоторые правила, к числу которых относятся следующие:

а) в шкалу признаков сначала должны включаться все при-

знаки, которые по мнению разрабатывающих проблему специалистов могут иметь отношение к решаемой задаче;

б) в шкалу признаков не включаются признаки, определяемые в результате специальных исследований, проведенных лишь на ограниченном количестве объектов или основанные на гипотетической интерпретации фактов. Могут быть включены лишь непосредственно наблюдаемые геологические признаки исследуемых объектов;

в) при разработке шкалы целесообразно наметить группы признаков (например, региональные, локальные, магматические и др.), в соответствии с которыми вести дальнейший сбор материалов;

г) набор признаков в шкале, как уже раньше отмечалось, должен соответствовать масштабам, в которых производится сбор исходных материалов и ставятся задачи прогнозирования. Например, такой признак, как региональные геологические структуры: антиклинории, синклинории, глубинные разломы, особенно тщательно нужно учитывать при разработке прогнозов в масштабе 1 : 50 000 и мельче. При более крупномасштабном прогнозировании эти признаки становятся малоинформативными.

Подготовка шкалы признаков — очень важный этап исследований. Успех решения задачи зависит от того, окажутся ли в ней факторы, влияющие на прогнозируемое свойство. Именно в шкале признаков должны найти свое место все признаки, в том числе и такие, о связи которых с рудоносностью существуют лишь интуитивные догадки специалистов. Поэтому важно бывает привлечь к составлению шкалы признаков квалифицированных геологов-рудников, имеющих опыт геологического изучения и прогнозной оценки рудоносных площадей и месторождений исследуемого типа. Отдельные примеры шкал признаков, использовавшихся при решении прогнозно-металлогенических задач, приведены в прил. I.

Третья стадия — составление основной таблицы характеристик объектов — заключается в кодировании всей доступной информации об исследуемых объектах по принятой шкале в форме таблицы, где строками являются характеристики объектов в принятой системе признаков, где каждый признак имеет установленное для него место и значение. Такая таблица составляется в первую очередь на основе имеющихся фондовых и других геологических описаний всех месторождений и рудопроявлений исследуемого типа, известных на данной территории. Однако затем она должна быть откорректирована специалистами-геологами, знающими конкретные объекты. По существу такая таблица концентрирует многолетний опыт многих геологов. Поскольку содержание этой таблицы служит базой для дальнейших построений, предъявляются повышенные требо-

вания к ее точности и объективности. В процессе корректировки основной таблицы специалистами, из нее следует также удалить все признаки, о которых вообще не оказалось сведений или эти сведения известны лишь на одном-двух объектах, а на остальных они не изучались.

В. Н. Ушаков и другие (1976) отмечают трудности, возникающие при попытках определить границы сферы влияния признака. Например, признак «площадная кора выветривания» может распространяться на большую территорию, чем «пересечение жил разного состава в пределах рудного тела». Поэтому предлагается отражать наличие признака в таблице только в том случае, если он мог найти отображение на карте соответствующего масштаба и входил в контуры сравниваемых участков, планшетов регионов.

При кодировании в бинарной системе качественных признаков те же авторы предлагают уже на этапе подготовки информации исключать явно зависимые и малоинформативные признаки.

Четвертая стадия — выбор эталонных объектов и объектов экзамена. Эталонными являются наиболее хорошо изученные объекты исследуемого класса, для которых, с одной стороны, достаточно точно установлено прогнозируемое свойство, а с другой, главные признаки однозначно трактуются всеми исследователями. Сведения об эталонных объектах ложатся затем в основу решения большинства из перечисленных выше металлогенических задач. При решении некоторых задач часть из этих объектов желательно не включать в общую систему обработки информации, а их характеристики затем использовать для проверки надежности прогнозов, полученных на основании исследования информации об эталонных объектах, т. е. использовать часть хорошо изученных объектов в качестве контрольных, или как еще говорят, для экзамена.

Успех математической обработки подготовленной таким образом информации определяется также и некоторыми дополнительными требованиями, среди которых главным является максимальная генетическая однородность объектов. Эту особенность желательно обосновать с помощью тех или иных статистических методов (Константинов, 1973). Как правило, математические методы обработки металлогенической информации неприменимы, если с их помощью сравниваются геологические объекты различной природы.

А. Н. Дмитриев и другие (1975) справедливо указывают, что этап подготовки информации для последующей математической обработки является наиболее трудоемким и на него приходится до 80% рабочего времени, затрачиваемого на решение задачи. Поэтому еще раз необходимо подчеркнуть важность этого этапа для успешного решения поставленных задач.

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

КРАТКИЙ ОБЗОР ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Вероятностно-статистические методы уже давно известны геологам. Они, в частности, широко применяются при подсчете запасов полезных ископаемых. Естественно поэтому, что эти методы были в первую очередь использованы и для металлогенического прогнозирования.

Пионером в этой области, по-видимому, являлся Ю. А. Билибин (1961), который в одной из своих статей писал, что прогнозная оценка вероятных масштабов оруденения Колымы была им сделана на основании статистических расчетов. Хотя оптимистические результаты этих расчетов удивили самого Ю. А. Билибина, сейчас ясно, что действительность далеко превзошла их.

После Ю. А. Билибина Л. И. Шаманский в работах 1935—1936 гг. опубликовал результаты исследования корреляции между содержаниями меди и молибдена в рудах, с одной стороны, и расстояниями проб от осевой плоскости синклинальной складки, — с другой. В результате им была выяснена и количественно охарактеризована с помощью коэффициентов корреляции и уравнений регрессии зависимость интенсивности оруденения от геологической структуры месторождения. С помощью методов математической статистики Л. И. Шаманский с успехом исследовал сопряженность качественных геологических признаков для выяснения связей между шеелитом и медью в рудах Глафирийского рудника (Хакассия). Вслед за В. Эммонсом им была предложена формула для вычисления содержания металла в первичных рудах, которой он пользовался для оценки вероятных средних содержаний на месторождениях Южного Урала.

В дальнейшем специалисты неоднократно обращались к математической статистике для изучения закономерностей размещения оруденения в пределах рудных районов, полей и месторождений. Соответствующие материалы приведены, например, в монографии И. П. Шарапова (1965). Некоторые из описанных

в ней способов не требуют сложных вычислений и вполне доступны. Наибольшее развитие в настоящее время получили методы количественной оценки вероятных прогнозных запасов полезных ископаемых по данным геохимического опробования. К ним относится, например, предложенный Р. И. Дубовым метод подсчета удельной перспективности районов по данным геохимического опробования.

Относительная удельная перспективность (по Р. И. Дубову) оценивается следующей формулой

$$\Pi_v^1 = \int_{c_6}^{\infty} c \cdot p(c) dc,$$

где $p(c)$ — плотность вероятности встречи в названных породах концентрации c ; c_6 — заданная «благоприятная» концентрация (например, бортовое содержание или какая-либо другая, превышение которой считается благоприятным для наличия оруденения); Π_v^1 — количество рудного элемента, находящегося в элементарной ячейке изучаемой территории, с концентрацией, превышающей c_6 . Выявление Π_v^1 для различных элементарных ячеек позволяет построить карту относительной удельной перспективности территории.

В последнее время алгоритм, предложенный Р. И. Дубовым, был реализован программой для ЭВМ БЭСМ-4, с помощью которой строились карты удельной перспективности отдельных территорий (Тонкопий, 1974). Такая карта была, например, построена для района полиметаллического месторождения Қастен (Южный Казахстан) на основании данных геохимической съемки вторичных ореолов масштаба 1 : 25000. В результате обработки данных геохимического опробования по алгоритму Р. И. Дубова было выявлено несколько зон повышенных концентраций полезных компонентов, две из которых, наибольшие по амплитуде, приурочены к известным месторождениям.

Проблеме пропорциональности между линейными и площадными продуктивностями остаточных элювиально-делювиальных ореолов и выходами рудных тел были посвящены работы А. П. Соловова (1959), Р. И. Дубова (1964, 1974) и многих других исследователей.

Важное направление прогнозной оценки месторождений на основе геохимической зональности, выявляемой по результатам статистической обработки, было создано работами Л. Н. Овчинникова и С. В. Григоряна (1970), А. П. Соловова и др. (1971).

Несколько работ по математическому изучению рудной зональности опубликовано И. А. Неженским (1967, 1971). Им были составлены специальные уравнения зональности, для определения тенденций изменчивости минерализации были применены уравнения регрессии, позволяющие более точно наметить основ-

ные закономерности размещения оруденения, а также сделан ряд других интересных предложений.

Как это показано в монографии Н. И. Боровко (1971), при анализе пространственных геологических закономерностей могут использоваться самые разнообразные статистические методы, но начинать нужно с решения одной и той же задачи — проверки наличия неоднородностей в размещении геологических объектов и оценки статистической значимости этих неоднородностей. В тех случаях, когда они очевидны, сразу приступают к решению локальной задачи: с помощью той или иной процедуры выясняют степень отклонения существующего распределения геологических объектов от вероятностного распределения. Если степень отклонения установлена, то в зависимости от целевой постановки задачи этому факту дается определенная генетическая интерпретация.

Примером применения статистических методов для выяснения общих закономерностей размещения рудных месторождений являются работы Л. Н. Овчинникова. Для исследования закономерности размещения гидротермальных плутоногенных месторождений Л. Н. Овчинников (1968) использовал статистические данные по 700 месторождениям. В результате анализа этих данных была подтверждена связь этих месторождений с кислыми интрузиями, сделан вывод о приуроченности месторождений преимущественно к подвижным частям тектоносферы и определен закон распределения запасов свинца и цинка, а также закон распределения размеров рудных тел по падению, простиранию и мощности.

Иногда для исследования рудных месторождений применяются довольно сложные методы математической статистики, заимствованные из теории случайных процессов, а также факторный анализ. Последний предназначается для характеристики связей между геологическими признаками, описывающими изучаемые объекты, и основывается на предположении о существовании линейной зависимости между двумя совокупностями переменных. Изучению рудных месторождений с помощью факторного анализа посвящены работы А. Б. Вистелиуса и др. (1968). Эти исследователи использовали факторный анализ для выявления геологических критериев, влияющих на концентрацию ртути на месторождениях Хайдаркана. В качестве исходных были взяты географические и геолого-структурные признаки, а также тип вмещающих пород. В результате проведенных исследований было сделано заключение, что наибольшее влияние на появление кондиционных содержаний ртути оказывают геолого-структурные факторы, в частности, приуроченность месторождений к крыльям антиклиналей.

Примером использования факторного анализа для оценки площадей является работа Дж. Е. Клована (1968), который количественно исследовал влияние предполагаемых факторов

рудобразования и по величине этих факторов наметил перспективные участки на площади рассматриваемого свинцово-цинкового месторождения.

Находит применение и дисперсионный анализ, который предназначен для проверки гипотез о влиянии тех или иных факторов на изменение природных явлений в тех случаях, когда число факторов и их геологический смысл известны. Например, дисперсионный анализ был применен Г. А. Булкиным и О. М. Лепилиной (1969) для проверки гипотезы о влиянии на концентрацию ртути следующих факторов: 1) расстояния ртутных проявлений от антиклинали; 2) положение ртутных проявлений по отношению к купольным структурам; 3) положения ртутных проявлений в подошве или кровле пласта рудоносных песчанников; 4) расстояния ртутных проявлений от рудоконтролирующих нарушений. Полученные результаты позволили авторам сделать вывод о влиянии на концентрацию ртути первой и четвертой групп факторов и количественно оценить степень этого влияния.

Другой разновидностью факторного анализа, примененного в металлогении, является метод главных компонент. Сущность его заключается в том, что все признаки, для которых можно предположить влияние на прогнозируемое свойство, с помощью математического преобразования группируются на главные компоненты — независимые группы тесно скоррелированных признаков (статистические факторы). Эти статистические факторы рассматриваются по их влиянию на общую изменчивость системы признаков, т. е. по их «весу» и интенсивности проявления на каждом объекте.

Геологическая интерпретация данных, полученных в результате довольно сложных вычислительных процедур, применяемых в методе «главных компонент», дает представление о том, какие из группировок геологических признаков и в какой мере влияют на изменчивость системы признаков в целом, т. е. определяют закономерности размещения эндогенных месторождений на исследованной территории. Для условий локализации эндогенных месторождений Восточного Забайкалья Ю. И. Михайловой и А. А. Ивановой (1973) на основании детальной характеристики 225 проявлений минерализации Au, As, Pb, Ag, Zn, Mo, CaF₂ с помощью метода «главных компонент» были получены группы признаков, которые отражают особенности двух рудных комплексов Восточного Забайкалья: Au—Mo—Ag—Pb—Zn и CaF₂. В первом рудном комплексе различают: а) свинцово-цинковые месторождения, которые образуют метасоматические залежи в карбонатных породах нижнего структурного яруса в поднятиях мезозойской геосинклинальной области; б) золото-полиметаллические в вулканогенно-осадочных толщах среднего структурного яруса в прогибах мезозойской геосинклинальной области; в) молибденовые месторождения, локализованные в

поднятиях геосинклинальной мезозойской складчатой области. Среди флюоритового комплекса также намечаются две группы месторождений с различными геологическими условиями локализации.

При прогнозе месторождений, рудоносных территорий и т. д., в тех случаях, когда нет четких теоретических представлений о природе исследуемого явления, приходится учитывать огромное количество информации, т. е. оперировать с многомерным пространством признаков, что невозможно без применения ЭВМ. В другой своей работе Ю. И. Михайлова и А. А. Иванова (1975) применили комплекс статистических методов для последовательного решения ряда геологических задач, связанных с прогнозированием флюоритовых месторождений Восточного Забайкалья. Исходными материалами для прогнозирования служили: 1) мелкомасштабная геологическая карта, составленная на формационной основе с детальным изображением элементов мезозойской тектоно-магматической активизации; 2) схема флюоритоносности, сопутствующей ей рудоносности и фтороносности магматических образований в том же масштабе; 3) внemasштабные характеристики рудных объектов (наличие рудных тел, их морфологии, минеральный состав и возраст вмещающих пород и др.).

В качестве элементарных единиц оценки были приняты ограниченные разломами тектоно-магматические блоки, характеризовавшиеся особенностями состава и интенсивности магматизма и тектоники.

А. С. Джойс и Дж. М. Ким (1974) применили метод главных компонент для выявления отличий массивных пикельсодержащих жил от других железистых пород. Результаты проверки метода на 400 контрольных пробах показали его высокую точность.

При поисково-разведочных работах и прогнозной оценке территорий много внимания обычно уделяется таким поисковым критериям, как например, гидротермальные изменения вмещающих пород. В связи с этим представляют интерес оценка их истинного значения с помощью методов математической статистики, которую получили Н. Г. Кудрявцева и В. Л. Лось (1974). На первом этапе работы была составлена карта плотности оруденения в изолиниях. При этом под плотностью оруденения понималась величина

$$D_{xy} = \sum_{i=1}^k M_i/L_i,$$

где M_i — масса i -того месторождения, L_i — расстояние от i -того месторождения до точки с координатами x, y ; k — количество учтенных месторождений. Величина M_i принимается равной (или пропорциональной) запасам i -того месторождения.

Если запасы по всем или некоторым месторождениям не известны, месторождения можно условно разделить по размерам (на крупные, средние и мелкие) и M_i оценить в баллах. Вычисления D желательно вести для однотипных объектов (например, для месторождений одной рудной формации). Величина L_i вычисляется по следующей формуле:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}.$$

Масштаб по x и y выбирается таким образом, чтобы единицы измерения были приблизительно равны средним линейным размерам месторождений на данной площади. В области $L_i < 1$ принимается $L_i = 1$.

Полученная карта распределения плотности оруденения послужила основой для количественного сопоставления с другими геологическими свойствами, в частности, со степенью метасоматических преобразований и пиритизации пород.

Гидротермальное выщелачивание фиксировалось по появлению кварц-серпичит-хлоритовых, кварц-серпичитовых и монокварцевых пород. Каждая из этих пород соответствует определенной интенсивности процессов выщелачивания (C), которая условно была принята равной 0,1 для кварц-серпичит-хлоритовых пород; 0,5 — для кварц-серпичитовых и 1,0 — для монокварцевых. Средняя интенсивность процессов выщелачивания, наблюдаемая в i -той скважине, определялась по формуле

$$C_i = \frac{0.1m_1 + 0.5m_2 + m_3}{m},$$

где m_1 , m_2 и m_3 — суммарные мощности соответствующих типов пород; m — глубина скважины. Величина C изменяется от 0 до 1. Она была вычислена для 670 скважин и эти данные послужили основой для составления схемы изолиний интенсивности процессов выщелачивания. Затем территория исследуемого района была разделена на 487 элементарных участка размерами 0,4—0,6 км². Для каждого такого участка учитывалась средняя плотность оруденения (D), средняя интенсивность процесса выщелачивания (C) и наличие хлоритизации (x). Существовавшие связи между этими величинами определялось с помощью критерия χ^2 , методы вычисления которого описаны в следующем разделе. Сила связи оценивалась коэффициентом Чупрова по формуле

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{N \sqrt{(K_A - 1)(K_B - 1)}}},$$

где K_A — число объектов класса A ; K_B — число объектов класса B ; N — общее число объектов.

Связь между интенсивностью выщелачивания и плотностью оруденения оказалась равной $K_{D-C} = 0,33$, а между плотностью

оруденения и хлоритизацией $K_D-x=0,24$. Полученные коэффициенты свидетельствуют, что сила связи относительно небольшая, а поэтому использование для целей прогнозирования только этих признаков недостаточно. Анализ показывает, что поисковое значение названных признаков изменяется с изменением масштабов исследований (уменьшается при уменьшении масштабов).

Г. Де Джеффри и Т. К. Вигналл (1972) провели статистическое изучение геологических характеристик месторождений медно-молибденовой порфировой формации Кордильер. С этой целью была составлена шкала из 170 геологических признаков, в соответствии с которой закодированы 58 промышленных месторождений. Кодирование велось в бинарной системе, т. е. для каждого признака отмечалось его присутствие (единица) или отсутствие (нуль). Основные группы геологических признаков включали в себя следующие: 1) тип пород, вмещающих рудоносную интрузию; 2) возраст вмещающих пород; 3) локальный контроль рудоносной интрузии; 4) генеральные направления рудоконтролирующих структур; 5) главный тип пород гранитоидной рудоносной интрузии; 6) главный тип порфириновых пород краевой формации; 7) главный тип дайковых пород; 8) наличие брекчий и диатрем; 9) тип контакта между порфирированными и гранитоидными породами рудоносной интрузии; 10) последовательность интрузивных фаз; 11) форма горизонтальной части интрузии; 12) полная форма интрузии; 13) тектонические соотношения интрузии с боковыми породами; 14) глубина расположения интрузии; 15) тип минерализованных пород; 16) форма горизонтальной части рудного тела; 17) полная форма рудного тела; 18) характеристика контактов рудного тела; 19) минеральные ассоциации в верхней зоне; 20) минеральные ассоциации в средней зоне; 21) минеральные ассоциации внутренней зоны и ядра; 22) горизонтальная зональность в размещении сульфидов; 23) количество сульфидов; 24) характер контактового ореола интрузии; 25) типы гидротермальных изменений пород; 26) внешняя зона гидротермально измененных пород; 27) уровень выхода на поверхность (уровень эрозионного среза); 28) данные магнитометрии; 29) данные электрометрии; 30) данные геохимической съемки.

Основываясь на частоте встречаемости признаков, путем несложных операций, авторы получили характеристики типичности каждого признака. Затем была выяснена типичность каждой из групп. Наиболее высоко оцененные признаки оказались среди гидротермально измененных пород, типов минерализованных изверженных пород и общей формы рудных тел. В результате сохранения только высоко характерных признаков в каждой из перечисленных 30 групп сформулировано представление о модели наиболее типичного медно-молибденового порфиривого месторождения Кордильер.

Среди признаков с высокой характерностью были выбраны поддающиеся количественной оценке и по ним выведено уравнение регрессии таким образом, чтобы функционально измерить связь значений этих признаков со стоимостью месторождения в долларах. Проверка на контрольных объектах показала, что наблюдаемая общая стоимость известных месторождений и их стоимость, полученная на основании уравнения регрессии, отличаются примерно на 15%.

Прогнозная оценка мало изученных месторождений производилась по формуле Байеса методом, близким к описанному ниже. В качестве промышленных принимались эталонные объекты со стоимостью свыше 650 млн. долл., а непромышленных — с более низкой стоимостью. Перспективы мало изученного месторождения определялись в зависимости от того класса, в который оно попадало, после подсчетов по формуле Байеса.

Обзор различных методов математической статистики, теории игр и прочих близких разделов математики, которые в принципе применимы для решения металлогенических задач, был дан в статье И. И. Абрамовича, Л. Н. Дуденко и Ю. И. Михайловой (1972).

В настоящее время имеется значительное число работ, посвященных изучению рудных месторождений, в которых для этих целей используются статистические способы распознавания образов. Для этих способов характерно разнообразие точек зрения и подходов к решению тех или иных вопросов (Васильев, 1969), что обусловлено недостаточной разработанностью теории распознавания образов, отсутствием общего систематизированного подхода к этой проблеме.

По характеру задач, решаемых при исследовании рудных месторождений, методы распознавания образов разбиваются на две группы. Для постановки задач, решаемых методами первой группы, характерно следующее. Имеется априорная классификация исследуемых объектов по какому-либо свойству, выполненная человеком. Требуется решить вопрос о принадлежности любого объекта, не участвовавшего в исходной классификации, к одному из данных классов на основании выбранной меры близости и определенного решающего правила.

Ко второй группе относятся методы, используемые для решения задач собственно классификации (таксономии). В этих задачах процесс создания и распознавания образов объединяется и производится машиной.

В зависимости от исходных предположений относительно множества изучаемых объектов и обусловленного ими выбора меры близости и решающего правила методы первой группы можно далее подразделить на детерминированные и вероятностные. К первым относятся методы, основой которых является допущение возможности достоверного, однозначного отнесения распознаваемого объекта к тому или иному классу. При этом

считается, что классы в заданной априорной классификации являются идеализированными абстрактными единицами, и поэтому отнесение распознаваемых объектов к тому или иному классу может быть произведено лишь с некоторой вероятностью. При этом выбор меры близости и решающего правила обосновывается теорией статистических решений, а сама задача распознавания образов рассматривается как задача оценки обоснованности гипотез.

В настоящее время в металлогенических исследованиях для решения задач в первой постановке используются в основном детерминированные алгоритмы. Это обусловлено главным образом свойствами вероятностных алгоритмов, которые требуют гораздо большего объема «обучающей» выборки, а также априорной информации, например, знания условных плотностей вероятности или задания закона распределения, часто с точностью до параметров. Немаловажную роль играет и существенно качественный характер обрабатываемой информации.

Из вероятностных методов распознавания при металлогенических исследованиях применялся главным образом метод дискриминантных функций, заключающийся в построении разделяющих границ между классами объектов (здесь n -мерными случайными величинами) в виде $r \frac{(r-1)}{2}$ линейных дискриминантных функций: $D(x) = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$, где x_1, \dots, x_n — значения n -мерной случайной величины, b_1, \dots, b_n — коэффициенты, определяемые в процессе решения. Требованиями, предъявляемыми к априорной информации в этом методе, являются нормальное или логнормальное распределение значений случайной величины, а также равенство ковариационных матриц для разных классов объектов. Распознаваемый объект (n -мерная случайная величина) подставляется в дискриминантную функцию, и по ее значению определяется принадлежность объекта к тому или иному классу.

Метод дискриминантных функций использовался для решения задачи типизации рудных месторождений по минеральному составу (Неженский, 1967) и ряда других.

Примером основных детерминированных алгоритмов распознавания образов, применявшихся при металлогенических исследованиях, являются алгоритмы «Кора-3», «Обобщенный портрет», «Метод потенциальных функций».

С помощью алгоритма «Кора-3» производится анализ сочетаний геологических признаков по три и отбираются те из сочетаний, которые наиболее существенны для характеристики изучаемых классов (например, рудоносных и нерудоносных участков). Алгоритм «Кора-3» первоначально использовался для прогнозов на нефть, а затем А. П. Куклиным (1971) был применен для оценки перспективности некоторых рудоносных площадей Северо-Востока СССР.

Ш. А. Губерман и Т. М. Марипов (1966) для оценки рудоносности однородных геологических блоков на одном из рудных полей Средней Азии наряду с алгоритмом «Кора-3» использовали алгоритм «Обобщенный портрет». По этому алгоритму на ЭВМ для двух классов эталонных объектов, представленных в виде многомерных векторов, вычисляются обобщенные векторы, скалярные произведения которых с эталонными векторами удовлетворяют определенным условиям. При распознавании находятся скалярные произведения предъявленного вектора с обобщенными векторами, и объект относят к тому из классов, для которого значение скалярного произведения превзошло заданный порог распознавания.

«Метод потенциальных функций», являющийся одним из наиболее известных детерминированных алгоритмов, заключается в построении функции, разделяющей различные классы эталонных объектов. Если такая разделяющая функция построена, то в зависимости от того, какой знак она принимает для распознаваемых объектов, их относят к тому или другому классу. Этот алгоритм с некоторыми изменениями использовался для деления крупных и мелких месторождений олова Тихоокеанского рудного пояса по геологическим признакам, при решении задачи деления крупных и мелких редкометалльных месторождений по совокупности характеристик магнитного и гравитационного полей, а также при решении задачи деления верхних и нижних горизонтов рудных тел по геохимическим данным (Оценка оловорудных..., 1974).

Краткий обзор статистических алгоритмов, применяемых для решения типовых геологических задач, содержится в брошюре Т. Н. Лазаревой, Р. И. Когана, Ю. П. Белова и А. Г. Мюллербеска (1972). В ней дается схематичная характеристика классов математических методов, используемых для выбора эффективных оценок параметров распределения, выявления однородных групп наблюдений, определения комбинаций информативных признаков, статистических методов разграничения геологических объектов по комплексу признаков, методов распознавания образов, корреляционного и регрессионного анализа, математического прогнозирования и математической обработки геологоразведочной информации. В соответствии с перечисленными классами методов приводится каталог с аннотациями алгоритмов и программ.

Статистические закономерности распределения параметров опупления, методы изучения размещения рудных тел эндогенных месторождений и оценки рудоносности геологических блоков на примере ртутных, полиметаллических и золотых месторождений рассмотрены в работе В. И. Смолянца, В. Я. Зималиной, В. А. Королева (1972). Анализируя распределения содержания, мощностей рудных тел и метропроцентов, они доказывают, что

все эти показатели соответствуют логарифмически нормальному закону. Поэтому такие статистические оценки, как среднее арифметическое, дисперсия, асимметрия, эксцесс, здесь не применимы, так как являются параметрами нормального закона распределения. Предполагаются оценки для логнормального распределения.

При изучении закономерностей размещения рудных тел статистическими методами рассматривалось влияние разломов различного направления, а также осей складок на минерализацию ртутного месторождения джаспероидного типа. Оценка проводилась путем подсчетов коэффициентов вариации минерализации по мере изменения расстояния до конкретного разлома. Выяснилось, что оси мелких складок влияют на содержания ртути и мощность рудных тел больше, чем разрывные структуры. Зависимость рудоносности от рудоконтролирующих факторов исследовалась также с помощью критерия скачков, рангового коэффициента корреляции Спирмена (его использование рассматривается ниже, в разделе о геологической интерпретации результатов). Применение для этих целей метода корреляционной решетки позволило установить отсутствие существенного влияния крупных широтных разломов на размещение оруденения.

Для анализа связей различных параметров минерализации из-за отсутствия заметной линейной зависимости, позволяющей использовать обычную корреляцию, применен информационный коэффициент корреляции. Его использование показало значительную связь между содержанием ртути и сурьмы, мощностью рудных тел и содержанием флюорита. Информационные коэффициенты корреляции позволили установить наличие зависимостей в тех случаях, когда обычные коэффициенты эту связь не выявляют.

Для анализа факторов, контролирующих размещение оруденения, авторам предлагается корреляционный анализ, позволяющий дать сравнительную оценку роли различных факторов, а также многомерный дисперсионный анализ. Корреляционный анализ показал, что на локализацию рудных тел одновременно действует большое количество факторов и могут быть различные их оптимальные сочетания. Так, для одного типа золотых месторождений выяснилось, что на локализацию крупных тел структурные факторы влияния не оказывают; зоны дробления вмещающих пород, возникшие в связи с тектоническими деформациями, благоприятны лишь для мелких тел. В то же время на крупные тела большее воздействие оказывают вмещающие породы. Таким путем доказывается устойчивая связь между масштабами рудных тел, с одной стороны, и составом подстилающих и перекрывающих пород, с другой. Отмечается высокая корреляция между типами рудных и гипсометрическими значениями горизонтов их локализации.

Применение дискриминантных функций позволило определить информативность отдельных факторов, что достигалось путем последовательного исключения этих факторов из расчетов. Чем выше оказывалось отклонение полученного значения от среднего значения функции, тем большую информативность и, следовательно, значимость получал данный признак. Выяснилось, что для формирования крупных золоторудных тел наибольшее значение имеют позиция рудных тел, перекрывающие породы, тип рудных тел.

Как отмечалось выше, в настоящее время в литературе отсутствует сравнительная оценка различных статистических методов исследования зональности и других закономерностей в размещении рудных объектов. Геологи не находят ясного ответа, какой из существующих методов наиболее применим в том конкретном случае, с которым они столкнулись. Поскольку многие из методов, предлагаемых в специальных руководствах, требуют больших объемов геологической информации и трудоемких расчетов, они и по сей день слабо применяются в практике прогнозных геологических исследований.

Возможно, в связи с отмеченными обстоятельствами было предложено несколько эмпирических формул, с помощью которых делались попытки характеризовать рудную зональность. В качестве примера можно упомянуть работу В. В. Богацкого и Н. В. Гаврилина (1967), где распределение геологических признаков оценивается с помощью показателя неравномерности. Этот показатель подсчитывается по формуле

$$\text{НП} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\bar{P} - P_{\min}}$$

где НП — показатель неравномерности; P_{\max} — наибольшее значение признака; P_{\min} — наименьшее значение признака; \bar{P} — среднее значение признака.

Специальная монография, посвященная математическим методам прогнозирования месторождений полезных ископаемых, как уже упоминалось, опубликована А. Н. Бугайцом и Л. Н. Дуденко (1976). В их книге сформулированы общие задачи геологического прогнозирования и математические методы их решения, рассмотрены статистико-игровые и эвристические методы обработки информации при прогнозировании. На примере медно-шкелевого оруденения Кольского полуострова, пегматитовых месторождений Казахстана, полиметаллических проявлений Рудного Алтая и ртутных месторождений рассмотрены конкретные случаи применения некоторых из методов при решении задач прогнозирования. В этой книге дано краткое описание многих алгоритмов распознавания, в том числе таких как «Кора-3», тупиковых тестов и тесторов (близкие алгоритмы рассмотрены в следующем разделе), нахождение байесовской ре-

шающей функции, преобразования по методу главных компонент, алгоритмов автоматической классификации.

Несмотря на то что вероятностно-статистические методы чрезвычайно разнообразны, а сравнительная оценка эффективности различных методов при решении прогнозных геологических и металлогенических задач отсутствует, можно рекомендовать некоторые наиболее простые способы, возможности которых подтверждены практикой прогнозно-металлогенических исследований.

НЕКОТОРЫЕ ПРОСТЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

ПРОВЕРКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБОСНОВАННОСТИ ГИПОТЕЗ О СВЯЗЯХ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

При прогнозно-металлогенических исследованиях очень часто высказываются предположения о наличии геолого-структурного, литологического или магматического контроля для различных типов месторождений. Однако эти предположения делаются на основании геологических описаний или простых подсчетов, далеко не всегда дающих возможность для однозначных выводов. Между тем имеются достаточно простые способы, позволяющие убедиться в том, что выдвинутые предположения не подтверждаются фактическим материалом и потому должны быть отвергнуты, или наоборот, не противоречат фактическим данным и потому имеют право на существование.

Для проверки гипотезы о наличии связи между двумя признаками в работе Л. Н. Овчинникова и Р. И. Когана (1975) рекомендован метод, иллюстрируемый следующим примером. Выяснялся вопрос о существовании или напротив, отсутствии связи между некоторым возрастом грейзенов (древнее или моложе некоторого значения A , в млн. лет) и наличием или отсутствием в грейзенах промышленного оруденения. Авторы имели в своем распоряжении n определений абсолютного возраста грейзенов с промышленным оруденением и с безрудной минерализацией. Для проверки обоснованности упомянутой гипотезы о наличии связи между возрастом грейзенов, превышающим A млн. лет, и промышленным оруденением в них исходные данные были сведены в табл. 1.

Проверялась гипотеза о том, что связь между двумя признаками отсутствует, т. е. что неизвестный коэффициент корреляции ρ равен нулю:

$$H: \rho = 0$$

при альтернативе, что истинный коэффициент корреляции ρ не

Таблица 1

Соотношение определений абсолютного возраста в грейзенах с промышленным оруденением и безрудных. По Л. Н. Овчинникову и Р. И. Когану

Характер оруденения в грейзенах	Абсолютный возраст		Всего определений абсолютного возраста
	превышающий А млн. лет	меньше А млн. лет	
Грейзены с промышленным оруденением	n_{11}	n_{12}	$n_{1.}$
Грейзены без рудной минерализации	n_{21}	n_{22}	$n_{2.}$
Всего определений абсолютного возраста	$n_{.1}$	$n_{.2}$	n

равен нулю, т. е. связь между исследуемыми признаками отсутствует: $H: \rho \neq 0$. Оценкой коэффициента корреляции ρ служила величина

$$r = \frac{n_{11}n_{22} - n_{12}n_{21}}{\sqrt{n_{.1}n_{.2}n_{1.}n_{2.}}}$$

Нулевая гипотеза (связь между признаками отсутствует) принимается как подтвердившаяся, если абсолютное значение не превысит трех стандартов коэффициента корреляции 3σ , определяемого по формуле

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}$$

Нулевая гипотеза отклоняется и принимается альтернативная о наличии связи между возрастом и оруденением в грейзенах, если абсолютное значение r превысит 3σ . Примеры расчетов показаны в таблицах 2 и 3.

Следует заметить, что несмотря на простоту вычислений и отсутствие необходимости пользоваться справочными таблицами, этот критерий является довольно грубым и иногда не подтверждает наличие связей даже там, где она представляется достаточно очевидной.

Эти же гипотезы, как и другие более сложные, надежнее проверяются с помощью более мощного критерия χ^2 .

Примеры, приведенные в таблицах 2 и 3, ниже рассмотрены с применением этого критерия.

С целью применения критерия χ^2 исследуется так называемая таблица сопряженных признаков, принципиальная схема которой показана ниже (табл. 4).

Такая таблица составляется следующим образом. Допустим, в исследуемой металлогенической провинции известны место-

Таблица 2

Распределение оловорудных олово-вольфрамовых месторождений в разных типах рудовмещающих трещин. По Р. Х. Бахтеву

Формация	Трещины отрыва и неясного генезиса	Трещины скола	Сумма
Касситерит-кварцевая	14	7	21
Касситерит-вольфрамит-кварцевая	8	18	26
Сумма	22	25	47

Расчет.

$$r = \frac{14 \cdot 18 - 8 \cdot 7}{\sqrt{22 \cdot 25 \cdot 21 \cdot 26}} = 196:548 = 0,36;$$

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}} = \frac{1 - 0,13}{\sqrt{47}} \approx \frac{0,87}{6,85} = 0,12;$$

$$3\sigma_r = 0,36; r = 3\sigma_r.$$

Гипотеза о наличии связей между рудными формациями и рудовмещающими трещинами, вычисленным критерием, не подтверждается и не отвергается.

Таблица 3

Распределение оловорудных месторождений разных формаций в зависимости от углов падения рудных тел. По Р. Х. Бахтеву

Формация	Угол падения более 60°	Угол падения менее 60°	Сумма
Касситерит-кварцевая и касситерит-вольфрамит-кварцевая	12	22	34
Касситерит-силикатная и касситерит-сульфидная	9	6	15
Сумма	21	28	49

Расчет.

$$r = \frac{-126}{547,6} = -0,23; \quad \sigma_r = \frac{1 - 0,05}{\sqrt{49}} = \frac{0,95}{7} = 0,13;$$

$$3\sigma_r = 0,39; \quad 0,39 > 0,23; \quad 3\sigma_r > r.$$

Гипотеза о связи углов падения рудных тел с перечисленными сочетаниями рудных формаций отвергается, так как абсолютная величина r (0,23) меньше $3\sigma_r$ (0,39).

Принципиальная схема таблицы сопряженных признаков при проверке допустимости гипотезы с помощью критерия Пирсона (χ^2)

Классификация I	Классификация II			Всего
	D	E	F	
A	$a(a_1)$	$b(b_1)$	$c(c_1)$	$a + b + c$
B	$d(d_1)$	$e(e_1)$	$f(f_1)$	$d + e + f$
C	$g(g_1)$	$h(h_1)$	$i(i_1)$	$g + h + i$
Всего	$a + d + g$	$b + e + h$	$c + f + i$	$L = a + b + \dots + i$

рождения золота, олова и ртути. Имеются данные, позволяющие предполагать, что появление этих месторождений зависит от типа магматических проявлений, с которыми эти месторождения ассоциированы. Тогда первая классификация должна охватить типы месторождений, по главному металлу (A — месторождения золота; B — месторождения олова; C — месторождения ртути), вторая классификация — типы магматических пород, в которых эти месторождения локализуются; количество объектов, удовлетворяющих одновременно требованиям двух пересекающихся классов этих классификаций, обозначено буквами $a, b, c \dots$

Следует выяснить, настолько ли значимо отклонение размещения объектов от их случайного распределения, чтобы можно было допустить гипотезу о связи этих месторождений с различными типами магматических пород.

С этой целью сначала подсчитывают в каждой клетке таблицы те количества объектов, которые имели бы место при условии их равномерного распределения (математические ожидания). Расчеты проводятся по приведенным ниже формулам и результаты (a_1, b_1, \dots, j_1) также вписываются в таблицу.

$$a_1 = \frac{(a + b + c)(a + d + g)}{L};$$

$$b_1 = \frac{(a + b + c)(b + e + h)}{L};$$

$$\dots \dots \dots$$

$$j_1 = \frac{(g + h + i)(c + f + i)}{L}.$$

Если математическое ожидание в какой-либо клетке таблицы оказывается меньше 5, то соответствующий столбец таблицы необходимо объединить с каким-либо другим, родственным так, чтобы эта величина обязательно была больше 5.

Далее подсчитывается критерий Пирсона (χ^2) по формуле

$$\chi_{\text{выч}}^2 = \frac{(a-a_1)^2}{a_1} + \frac{(b-b_1)^2}{b_1} + \dots + \frac{(l-l_1)^2}{l_1}$$

Определяется число степеней свободы K , которое равно

$$K = (u - 1)(l - 1),$$

где u — число строк таблицы; l — число столбцов таблицы.

Для полученного числа степеней свободы K находим в статистических таблицах (прил. II-1) значение χ^2 , которое является максимальным для того случая, если между сопоставленными геологическими факторами связь отсутствует. Если вычисленный критерий $\chi_{\text{выч}}^2$ больше $\chi_{\text{т}}^2$ взятого из таблиц, то гипотеза о наличии связи между факторами имеет право на существование, если же вычисленный $\chi_{\text{выч}}^2$ меньше $\chi_{\text{т}}^2$, то эта гипотеза должна быть отвергнута, как неподтверждающаяся имеющимся фактическим материалом.

Таблица 5

Проверка допустимости гипотезы о связи оловорудных формаций с типом вмещающих пород

Оловорудная формация	Типы вмещающих пород				Всего
	Карбонат- ные породы	Угристо- глинистые сланцы, кислые эффузивы	Песчаники	Кислые интрузивные породы	
Касситерит-кварце- вая	7(6,8)	17(27,4)	13(16,7)	35(21,0)	72
Касситерит-сили- катная	4(3,7)	15(14,8)	12(9,1)	8(11,3)	39
Касситерит-суль- фидная	7(7,4)	40(29,7)	19(18,1)	12(22,7)	78
Всего	18	72	44	55	189

$$\chi_{\text{выч}}^2 = 24,7; K = 6; \chi_{\text{т}}^2 = 12,6 \text{ (для } \alpha = 0,05).$$

Таким образом, например, была проверена допустимость гипотезы о наличии связи между главными рудными формациями оловорудных месторождений и петрографо-литологическим типом вмещающих пород (табл. 5). Расчеты по приведенной выше схеме дают для этой таблицы $\chi_{\text{выч}}^2 = 24,7$ при $K=6$. Между тем для $K=6$ табличное значение $\chi_{\text{т}}^2 = 12,6$ (при вероятности ошибки $\alpha=0,05$) (см. прил. II-1). В связи с этим, поскольку $\chi_{\text{выч}}^2 > \chi_{\text{т}}^2$, гипотеза о наличии связи между составом вмещающих пород и оловорудными формациями фактическим материалом не опровергается.

При расчете критерия χ^2 для примеров, приведенных в таблицах 2 и 3, можно воспользоваться упрощенной формулой, применяемой для таблиц с размерностью 2×2 ,

$$\chi^2 = \frac{n(ad - bc)^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$$

Соответственно для табл. 2 получим

$$\chi_{\text{выч}}^2 = \frac{47(14 \cdot 18 - 7 \cdot 8)^2}{(14+7)(8+18)(14+8)(7+18)} = \frac{1805552}{300300} = 6,01.$$

При числе степеней свободы $K=1$ табличное значение χ^2 для уровня значимости $\alpha=0,05$ (см. прил. II-1) равно 3,8. Поэтому можно предполагать наличие связи между типами рудоносных трещин и олово-вольфрамовыми формациями. Между тем примененным ранее критерием эта связь не опровергается и не подтверждается.

Для табл. 3 получаем следующее:

$$\chi_{\text{выч}}^2 = \frac{49(12 \cdot 6 - 22 \cdot 9)^2}{(12+22)(9+6)(12+9)(22+6)} = \frac{777924}{299880} = 2,59.$$

Табличное значение $\chi^2=6,63$. Таким образом, наличие связи между углами падения рудных тел и различными перечисленными в таблице оловорудными формациями опровергается, так же как ранее примененным критерием $|r| < 3 \sigma$.

Результат деления вычисленного таким образом критерия χ^2 на величину $E=L \cdot (c-1) \cdot (l-1)$ может служить мерой силы связи между различными геологическими факторами. Например, подобно тому, как это сделано в табл. 5 для осадочно-метаморфических и магматических пород, можно определить допустимость гипотезы связи оловорудных формаций с различными типами магматических пород, а затем сравнить результаты, полученные после подсчета по формулам

$$\chi_1^2 / L_1 (c_1 - 1) (l_1 - 1),$$

$$\chi_2^2 / L_2 (c_2 - 1) (l_2 - 1),$$

где L —, как и выше, количество объектов наблюдений; c — число строк таблицы; l — число столбцов таблицы.

Например, сила связи (V) между касситерит-кварцевой и касситерит-вольфрамит-кварцевой формациями, с одной стороны, и рудовмещающими трещинами, с другой (табл. 2), следующая:

$$V = \frac{6,01}{47 \cdot (2-1) \cdot (2-1)} = 0,13.$$

В то же время связь между оловорудными формациями и составом вмещающих пород (табл. 5) соответствует следующей величине:

$$V = \frac{24,7}{189,6} = 0,022.$$

Для характеристики силы связи между двумя группами факторов может быть использован также коэффициент Чупрова, который, как было показано выше, Н. Г. Кудрявцева и В. Л. Лось (1974) применили для оценки связи между степенью выщелачивания пород и плотностью оруденения.

Если при анализе таблицы сопряженных признаков получается большое число степеней свободы, отсутствующее в статистических таблицах-приложениях, то пользуются подсчетом коэффициента d , отражающего уровень значимости при нормальном распределении, который обычно в этих таблицах приводится. Коэффициент d определяется по формуле

$$d = \sqrt{\chi_{\text{выч}}^2} - \sqrt{2K-1},$$

где K — число степеней свободы. Сравнение вычисленного коэффициента d с табличным позволяет сделать те же выводы, что и применение критерия χ^2 .

При проверке гипотезы с использованием критерия Пирсона, а также при помощи других статистических критериев следует учитывать возможность ошибок, возникающих прежде всего в связи с принимаемым уровнем значимости q , т. е. с вероятностью отвергнуть гипотезу о равномерном распределении на площади объектов, в то время как в действительности отклонения от этого распределения незначительны. Вероятность ошибочного отбрасывания проверяемой гипотезы составляет ошибку первого рода. Значение q нужно выбрать таким малым, чтобы событие, заключающееся в случайном превышении соответствующего критического значения критерия, можно было считать практически невозможным. Обычно уровень значимости принимают равным 0,05 или 0,01. Следует иметь в виду, что проверка гипотезы о равномерном распределении не имеет генетического смысла, а лишь согласуется с предложением о наличии таких отклонений, причины которых могут быть самыми разными.

Возможна также ошибка второго рода, при которой принимается гипотеза о равномерном распределении объектов, в то время как она неверна. Ошибка второго рода зависит от применяемого критерия. Поэтому при проверке гипотезы необходимо выбрать такой критерий, чтобы при одинаковой возможности совершить ошибку первого рода, вероятность ошибки второго рода была наименьшей. К сожалению, на практике оценить эту вероятность не всегда можно.

ПРОВЕРКА ДОПУСТИМОСТИ ГИПОТЕЗЫ О РАВНОМЕРНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В современной металлогении все большее распространение получает представление о «геологических аномалиях». Под ними понимаются статистически значимые отклонения тех или иных

геологических признаков от общего фона их распределения. Все более обоснованно высказываются предположения, что именно с ранними аномалиями в геологическом строении территорий связаны наиболее интересные в промышленном отношении месторождения полезных ископаемых. Поскольку методам выяв-

Таблица 6

Проверка гипотезы о закономерности размещения даек на исследуемой территории

Число даек в элементарной ячейке	Средняя интервала x_i	Число ячеек n_i	$x_i - \bar{x}$	$t_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$	$Z(t_i)$	n'_i	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
0—2	1	5	-5,23	-1,95	0,0596	3	1,333
2—4	3	10	-3,23	-1,20	0,1942	10	0
4—6	5	10	-1,23	-0,46	0,3589	18	3,555
6—8	7	25	0,77	0,28	0,3836	19	1,894
8—10	9	10	2,77	1,03	0,2347	11	0,091
10—12	11	5	4,77	1,77	0,0833	4	0,250

$$\bar{x} = 6,23$$

$$65$$

$$\frac{\chi^2}{\text{д.св.}} = 7,123$$

ления таких аномалий посвящена обширная геологическая литература (Боровко, 1971; Чагин, 1969 и др.), ниже рассматривается лишь один сравнительно простой способ, позволяющий проверить степень обоснованности предлагаемой гипотезы о закономерностях в распределении каких-либо геологических признаков имеющимся фактическим материалом.

Например, необходимо выяснить, допустимо ли предположение о наличии закономерностей в распространении даек, если при этом по разбитой на ячейки геологической карте произведен подсчет количества даек в каждой ячейке и в результате получены данные, приведенные в табл. 6, (столбцы 1, 2 и 3).

$$x = \frac{\sum_{i=1}^m n_i x_i}{\sum n_i} \quad \text{или} \quad \bar{x} = \frac{1 \cdot 5 + 3 \cdot 10 + \dots + 9 \cdot 10 + 11 \cdot 5}{65} = 6,23;$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{или} \quad S = \sqrt{\frac{461,5}{64}} = 2,68;$$

$$n = \sum_{i=1}^m n_i; \quad n'_i = \frac{n \Delta_i}{S}$$

Δ_i — длина интервала (для табл. 6 равна 2); число степеней свободы $K = m - 3 = 3$; m — число интервалов ($m = 6$);

$$Z(t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t_i^2/2} \quad \text{значение плотности вероятности нормаль-}$$

ного распределения, которое берется в соответствии с каждым t_i (прпл. 11-2); n_i — число ячеек, которое имело бы место при нормальном распределении; $\chi^2_{\text{т}}$ — табличное значение χ^2 при числе степеней свободы, равном K ($K=3$), и вероятности α ($\alpha=0,05$);

$$\chi^2_{\text{т}} = 3,841; \chi^2_{\text{выч}} = 7,123.$$

Поскольку $\chi^2_{\text{выч}} > \chi^2_{\text{т}}$, гипотеза о наличии геологических факторов, влияющих на размещение даек на исследуемой территории, статистическими данными не опровергается. Оригинальная статистическая методика определения информативности признаков для прогнозной оценки рудоносных объектов, была предложена Е. Т. Бубиновым (1975). Все эталонные объекты делятся при этом на два класса: на содержащие прогнозируемый признак и не содержащие его. Общее количество объектов n не должно быть меньше 15—20. Все они должны быть хорошо изучены как в отношении исследуемых признаков, так и, в особенности, в отношении прогнозируемых; кроме того, эти объекты должны быть достаточно однородными (принадлежащими к одной рудной формации или к однотипным рудным районам). Оптимальное количество признаков 200—500, но при этом имеется в виду обработка информации на ЭВМ. Значимость различных геологических признаков по отношению к прогнозируемому свойству определяется при этом с помощью тетрагорического показателя связи, вычисляемого по формуле

$$r = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}$$

где a — количество эталонных объектов, имеющих как первый (прогнозируемый), так и второй признаки; b — количество объектов, имеющих первый признак, но не имеющих второй; c — количество эталонных объектов без прогнозируемого признака, но имеющих второй признак; d — количество объектов, не имеющих ни первого, ни второго признаков.

Значимость связи признаков проверяется с помощью критерия χ^2 по формуле $\chi^2 = r^2 n$, где n — общее количество объектов. Нижний предел значений критерия χ^2 , при котором исследуемая связь считается существующей, принимается $\chi^2_{\text{табл}} = 3,8$ (при числе степеней свободы, равном единице).

Для проведения вычислений в один этап обе формулы объединяются и критерий χ^2 получается с помощью выражения

$$\chi^2 = \frac{n |ad - bc| (ad - bc)}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$$

где, $|ad - bc|$ — абсолютное значение числа, заключенного в круглые скобки.

Например, в Восточном Забайкалье имеются два типа гранитоидных массивов: оловоносные и неоловоносные. Требуется оп-

педелить влияние на их формирование положения в различных структурно-формационных зонах: срединных массивах, поднятиях, мезозойских прогибах.

Таким образом, для первого рассматриваемого случая характерны оловоносность гранитов или ее отсутствие (первый признак), положение гранитов в пределах срединных массивов или вне их (второй признак). Соответственно для второго случая оловоносность гранитов остается первым признаком, вторым является расположение гранитов в сводовых поднятиях, а в третьем случае вторым признаком является локализация гранитов в мезозойских прогибах.

Исходная таблица будет при этом выглядеть следующим образом (табл. 7).

Таблица 7

Зависимость между некоторыми структурно-формационными зонами оловоносных гранитов Восточного Забайкалья

Структурно-формационные зоны	Массивы гранитов	
	оловоносные	неоловоносные
Срединные массивы	1 0 0 1 0 0 0 0	1 1 1 0 0 1 0 0
Сводовые поднятия	0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0
Мезозойские прогибы	0 1 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 1 1

$$\chi_1^2 = \frac{16 |(2 \cdot 4 - 6 \cdot 4)| (2 \cdot 4 - 6 \cdot 4)}{(2 + 6)(4 + 4)(2 + 4)(6 + 4)} = \frac{-4096}{3840} = -1,06;$$

$$\chi_2^2 = \frac{16 |(4 \cdot 8 - 4 \cdot 0)| (4 \cdot 8 - 4 \cdot 0)}{(4 + 4)(0 + 8)(4 + 0)(4 + 8)} = \frac{16384}{3072} = 5,33;$$

$$\chi_3^2 = \frac{16 |(2 \cdot 5 - 6 \cdot 3)| (2 \cdot 5 - 6 \cdot 3)}{(2 + 6)(3 + 5)(2 + 3)(6 + 5)} = \frac{-1024}{3520} = -0,291.$$

Учитывая, что значимыми признаками являются при абсолютных значениях χ^2 , превышающих величину 3,8, влияние срединных массивов на оловоносность не подтверждается, а сводовых поднятий оценивается положительно. Мезозойские прогибы заметного влияния на оловоносность гранитов не оказывают.

Е. Т. Бубновым предусматриваются логическая и статистическая процедуры исключения взаимного влияния признаков. Проведение этих процедур позволяет затем судить о близости прогнозируемого объекта к эталонным по суммам критерия χ^2 .

При логическом способе исключения взаимосвязанных признаков последние подразделяются на однородные (например, это могут быть содержания СаО в гранитондах, которые все информативны по отношению к прогнозируемому свойству); дублирующие (например, содержания различных компонентов в ру-

дах, полученные разными методами анализа), дополняющие друг друга, представляющие собой распространенные сочетания простых признаков (например, лейкократовые крупнозернистые граниты, или крупнозернистые песчаники и мелкогалечные конгломераты, или грейзенизация и сульфидизация вмещающих пород и т. д.). Во всех этих группах признаков учитывается лишь один, имеющий наибольшую связь с исследуемым свойством. Суммы максимальных значений χ^2 для сгруппированных таким образом признаков, полученные для эталонных объектов, обладающих прогнозируемым свойством, дают обобщенный портрет прогнозируемого признака.

После того как выполнена логическая процедура, переходят к статистическому способу исключения взаимного влияния признаков. С этой целью находятся пары признаков, связь между которыми является значимой. Расчеты для этого ведутся по формуле

$$m = \frac{ad - bc}{ad + bc},$$

где m — показатель связи между двумя качественными признаками; a — число эталонных объектов с первыми и со вторыми признаками; b — число эталонных объектов с первым признаком, но без второго; c — без первого признака, но со вторым; d — число эталонных объектов без первого и без второго признака.

Для определения степени сходства конкретного объекта с искомым признаком по двум информативным признакам — первому и второму применяется формула

$$\Pi_{1,2} = \chi_1^2 + \chi_2^2 - \min \chi_{(1,2)}^2 m_{1,2},$$

где $\Pi_{1,2}$ — степень сходства; χ_1^2 — степень связи первого признака с искомым; χ_2^2 — степень связи второго признака с искомым; $m_{1,2}$ — показатель связи между первым и вторым признаками; $\min \chi_{(1,2)}^2$ — минимальная сила связи одного из двух признаков с прогнозируемым.

Путем последующих преобразований достигается полное исключение взаимосвязанных признаков и создается цифровой обобщающий портрет эталона с искомым прогнозируемым свойством.

Н. Н. Боровко (1971) использовал сходные методы расчета для анализа пространственных закономерностей размещения крупных месторождений золота, цинка и меди на территории США. Сопоставление генерального и выборочного распределений с помощью критерия χ^2 , выполненное с учетом масштабов трех ближайших соседей — месторождений того же металла, вскрыло интересные закономерности. Оказалось, что выборочное распределение для золота и меди весьма существенно отличается от теоретического. Повышенное число крупных и сред-

них месторождений по сравнению с мелкими настолько существенно, что оно противоречит предположению о случайном распределении месторождений. Эти результаты Н. Н. Боровко проверял с помощью подсчета различных по масштабу месторождений в пяти квадратах. В центре первого квадрата размещалось крупное месторождение, остальные пять квадратов располагались крестообразно по отношению к первому. В результате подсчетов выяснилось, что при длине стороны квадрата порядка первых десятков километров около 40% крупных месторождений оказываются в областях пониженной плотности минерализации.

Эти расчеты привели Н. Н. Боровко к выводу о том, что наиболее благоприятными для обнаружения крупных месторождений оказываются участки с относительно повышенной долей месторождений средних классов. По-видимому, металлогеническое обособление отдельных участков земной коры проявляется не только в изменении плотности минерализации (например, в количестве месторождений на единицу площади), но и в изменении соотношений различных по размеру месторождений.

Выделение наиболее перспективных территорий по одной лишь повышенной плотности размещения известных месторождений и пренебрежение территориями с пониженной плотностью могут приводить к серьезным ошибкам, в частности, к пропуску крупных месторождений.

В последнее время предложен еще один метод анализа закономерностей размещения точек минерализации на площади, который имеет ряд преимуществ перед описанными выше (Прогнозирование..., 1976). При использовании этого метода не нужно разбивать площадь на квадраты, и при сравнительно несложных вычислениях он дает возможность сопоставлять степень сопряженности различных признаков. Метод применим только для объектов, которые можно считать точками, не учитывая их величины. Анализ наличия закономерностей в размещении месторождений выполняется путем расчетов по формуле

$$V = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i},$$

где V — величина, приближающаяся к χ^2 ; n_i — количество точек минерализации на конкретном участке; n — количество точек минерализации на всей территории; P_i — доля площади участка ко всей территории в процентах; k — количество участков, на которое разделена территория. Для достоверности получаемых результатов n_i должно быть больше 5, а nP_i — больше 10. Если значение V больше $\chi_{табл}^2$ для числа степеней свободы, равного $i=k-1$, то предполагается наличие сопряжения исследуемых точек минерализации с областями различных типов. Для того, чтобы решить вопрос о степени сопряженности различных при-

знаков, используется критерий, предложенный Д. А. Родионовым,

$$t = \frac{|V_1 - V_2|}{2\sqrt{V_1 + V_2 - l}}$$

где V_1 и V_2 — величины, полученные для сравниваемой пары признаков; l — число степеней свободы.

Если вычисленное значение t не превысит допустимого значения $t_{\text{табл}}$ при выбранном уровне значимости ($t_{\text{табл}}$ берется из таблиц в руководствах по математической статистике), то величины V_1 и V_2 считаются равными; если же t больше $t_{\text{табл}}$, то различие величин V_1 и V_2 считается значимым, а степень сопряженности точек минерализации с различным типом районов — неодинаковой.

В качестве примера определим, есть ли закономерности в распределении различных по масштабам проявлений оловянной минерализации (табл. 8), заимствовав исходные данные из упомянутой работы (Прогнозирование..., 1976).

Таблица 8

Распределение месторождений и рудопроявлений олова в областях Восточного Забайкалья с различной историей развития

Масштабы проявлений	Области I категории (k=3)					Области II категории (k=2)				
	Относительные площади областей (P _i)			Число проявлений n _i	V	Относительные площади областей (P _i)		Число проявлений n _i	V	
	0,204	0,382	0,414			0,250	0,750			
Месторождения	0	4	23	27	21,9	1	26	27	6,5	
Рудопроявления	15	27	96	138	45,1	43	95	138	2,8	

Для месторождений в областях I категории в соответствии с приведенной выше формулой получим выражение

$$V = \frac{(0-27 \cdot 0,204)^2}{27 \cdot 0,204} + \frac{(4-27 \cdot 0,382)^2}{27 \cdot 0,382} + \frac{(23-27 \cdot 0,414)^2}{27 \cdot 0,414} = 21,9.$$

Аналогичным образом выполняются расчеты для месторождений из областей II категории, для которых V равно 6,5. Число степеней свободы для областей I категории равно $l = k - 1 = 2$; а для областей II категории $l = 1$, следовательно, $\chi^2_{\text{табл}}$ для областей I категории при уровне значимости 0,05 равно 5,99; а для областей II категории $\chi^2_{\text{табл}} = 3,84$, поскольку V для областей I категории больше, чем 5,99, а для областей II категории больше, чем 3,84; отличия наблюдаемого распределения от рав-

померного являются значимыми. т. е. возможная закономерная связь оловянных месторождений с областями различного типа допустима во всех случаях.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ЭМПИРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕНИЙ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Эмпирические обобщения являются одним из основных средств познания: они следуют за сбором фактов и предшествуют возникновению научных гипотез.

Крупнейший естествоиспытатель нашего времени В. И. Вернадский по этому поводу писал: «... значение эмпирических обобщений в науке часто упускается из виду, и под влиянием рутины и философских построений эмпирические обобщения отождествляются с научными гипотезами» (Вернадский, 1967, с. 238). По В. И. Вернадскому, отличие эмпирического обобщения от гипотезы заключается в том, что «эмпирическое обобщение опирается на факты, индуктивным путем собранные, не выходя за их пределы и не заботясь о согласии или несогласии полученного вывода с другими существующими представлениями о природе. В этом отношении эмпирическое обобщение не отличается от научно установленного факта: их совпадение с нашими научными представлениями о природе нас не интересует, их противоречие с ними составляет научное открытие». И далее: «Эмпирическое обобщение может очень долго существовать, не поддаваясь никаким гипотетическим объяснениям, являться непонятным и все же оказывать огромное благотворное влияние на понимание явлений природы. Но затем часто наступает момент, когда оно вдруг начинает освещаться новым светом, становится областью создания гипотез, начинает менять наши схемы мироздания и само меняться. Очень часто тогда оказывается в эмпирическом обобщении мы имели не то, что думали, или в действительности имели много больше, чем думали». (Там же, с. 238).

Типичным примером эмпирических обобщений является периодическая система элементов Менделеева, которая сама стала затем широким полем для научных гипотез.

Примерами эмпирических обобщений в металлогении являются представления о поясовом строении многих металлогенических областей (Забайкалье, Верхоянье и др.), зональном (п других типов) размещении оруденения в масштабах рудных районов и отдельных рудных тел. К этому же классу исследований относится сравнительная оценка существенности различных геологических факторов для оценки закономерностей размещения и масштабов месторождения. Для создания эмпирических обобщений в области металлогении и разработки на их основе количественных прогнозов рудоносности с успехом применялись

разнообразные вероятностно-статистические методы распознавания (Оценка..., 1974).

Наиболее простые из этих методов основаны на использовании формулы вероятностей гипотез (формулы Байеса)

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i) P(A/B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j) P(A/B_j)},$$

где $P(B_i/A)$ означает вероятность гипотезы B_i при условии A ; A — событие, которое может осуществиться тогда, когда осуществляется какое-нибудь из несовместимых событий B_1, \dots, B_n , таким образом событие A подразделяется на виды $B_1A, B_2A, \dots,$

\dots, B_nA , так что $A = \sum_{i=1}^n B_iA$.

С помощью формулы вероятностей гипотез определяется вероятность одного какого-нибудь события B_i из числа несовместимых событий B_1, \dots, B_n , если известно, что событие A произошло.

Например, близповерхностные существенно кварцевые жилы могут содержать или не содержать в промышленных концентрациях определенные полезные компоненты. В рассматриваемой металлогенической провинции 40% изучаемых рудопроявлений этого типа характеризуются высокими содержаниями полезных компонентов. Если содержания их в рудных телах близки к промышленным, то в них отмечаются значительные количества халцедона и адуляра, вероятность присутствия которых равна 95%. Если же полезных компонентов мало, то вероятность появления халцедона и адуляра равна 70%. Допустим, что обнаружена новая рудная точка, где макроскопическими наблюдениями в жильном материале установлена значительная распространенность халцедона и адуляра. Требуется оценить вероятность высоких содержаний здесь полезных компонентов.

Таким образом, возможны две гипотезы: первая (H_1), что рудопроявление содержит близкие к промышленным концентрации ценных металлов и вторая (H_2), что она этих концентраций не содержит. Вероятность этих гипотез до того, как были выявлены халцедоны и адуляр, равнялась $P(H_1) = 0,4$ (поскольку по условиям известно, что 40% рудопроявлений подобного рода содержат высокие содержания полезных компонентов, $P(H_2) = 0,6$).

Событием A в данном случае является обнаружение в жилах рудопроявления халцедона и адуляра. Условные вероятности этого события при гипотезе H_1 : $P(A/H_1) = 0,95$, а при гипотезе H_2 : $P(A/H_2) = 0,7$. По приведенной выше формуле находим

$$P(H_1/A) = \frac{P(H_1) P(A/H_1)}{P(H_1) P(A/H_1) + P(H_2) P(A/H_2)} =$$

$$= \frac{0,4 \cdot 0,95}{0,4 \cdot 0,95 + 0,6 \cdot 0,7} = 0,475.$$

Таким образом, несмотря на присутствие в рудах халцедона и адуляра, вероятность того, что найденное рудопоявление будет представлять промышленный интерес, составляет менее 50%.

Я. Ш. Флакс и В. А. Бедчер (1967) использовали эту формулу для оценки медноколчеданных месторождений Урала по признакам, значения которых фиксируются в виде единиц и нулей. После преобразования в удобный для расчетов вид эта формула представляется следующей:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \quad \begin{cases} > 0 \text{ показан образ } A \\ < 0 \text{ показан образ } B \end{cases}$$

A — первый образ, месторождения; B — второй образ, рудопоявления; $\alpha_i = \ln m_{x_i=1}^A - \ln m_{x_i=1}^B$ — коэффициент, учитывающий информативность признака при его наличии (т. е. число единиц в одноименных столбцах таблицы для классов A и B); $\beta_i = \ln m_{x_i=0}^A - \ln m_{x_i=0}^B$ — коэффициент учитывающий информативность признака в его отсутствии (т. е. число нулей в одноименных столбцах таблицы для классов A и B).

Полученные значения α и β для относящегося к исследуемому классу нового конкретного объекта в соответствии с его геологической характеристикой подставляются в формулу, приведенную выше, и таким образом определяется принадлежность этого объекта к классу A или классу B .

Например, необходимо решить, к какому типу принадлежит месторождение x , если известно, что оно может принадлежать или к типу A , или к типу B (табл. 9). При этом к типу A принадлежат хорошо изученные месторождения 1—5, а к типу B месторождения 6—10. Наиболее удобным, хорошо изученным признаком на месторождениях является состав вмещающих пород; это и определяет выбор вмещающих пород (признак 1 — песчаники; 2 — глинистые сланцы; 3 — граниты; 4 — кислые эффузивы) в качестве главного критерия определения типа нового месторождения.

Рассматриваемое месторождение x представлено кварцевыми жилами в песчаниках (признак 1) и гранитах (признак 3). Соответственно его тип будет определяться суммой:

$$\alpha_1 + \beta_3 + \alpha_3 + \beta_1 = 0,406 - 0,693 - 0,406 + 0,406 = -0,287.$$

Поскольку $-0,287 < 0$, то в соответствии с приведенным выше условием, объект x следует отнести к классу B .

Следует иметь в виду, что рассмотренный пример является условным. Для получения с помощью этого метода достаточно надежных результатов число эталонных объектов должно быть

значительно большим (порядка 30—40), а количество информативных признаков также увеличено.

Таблица 9

Определение типа месторождения x в зависимости от состава вмещающих пород

Тип месторождения	№ п/п	Признаки			
		1	2	3	4
A	1	1	1	1	0
	2	0	0	0	1
	3	1	1	0	1
	4	1	1	0	0
	5	0	1	1	0
B	6	1	1	1	0
	7	0	0	1	1
	8	0	0	1	0
	9	1	1	0	1
	10	0	1	0	1
Информативность	α_1	0,406	0,287	-0,406	-0,406
	β_1	-0,406	-0,693	0,406	0,406
	$|\alpha_i + \beta_i|$	0,812	0,980	0,812	0,812
	x	0,406	-0,693	-0,406	0,406

Значения коэффициентов

$$\alpha_1 = \ln 3 - \ln 2 = 1,099 - 0,693 = 0,406$$

$$\alpha_2 = \ln 4 - \ln 3 = 1,386 - 1,099 = 0,287$$

$$\alpha_3 = \ln 2 - \ln 3 = 0,693 - 1,099 = -0,406$$

$$\alpha_4 = \ln 2 - \ln 3 = 0,693 - 1,099 = -0,406$$

$$\beta_1 = \ln 2 - \ln 3 = 0,693 - 1,099 = -0,406$$

$$\beta_2 = \ln 1 - \ln 2 = 0 - 0,693 = -0,693$$

$$\beta_3 = \ln 3 - \ln 2 = 1,099 - 0,693 = 0,406$$

$$\beta_4 = \ln 3 - \ln 2 = 1,099 - 0,693 = 0,406$$

Я. Ш. Флакс и другие исследователи этим методом производили на Урале выбор перспективных медноколчеданных проявлений. Принятая шкала содержала 86 признаков; в качестве эталонных использовались характеристики 32 месторождений. Результаты проверялись на примере 64 месторождений с известными запасами. Из них к классу A (промышленных) правильно было отнесено 30 объектов из 32, а к классу B (непромышленных) — 29 из 32, т. е. относительная ошибка составила около 8%.

Близкие методы количественной оценки перспектив территорий при поисках месторождений рудных полезных ископаемых были применены Е. Б. Высокоостровской и Д. С. Зеленецким (1968), которые для этой цели делили всю исследуемую местность на элементарные квадраты (с учетом масштабов исследо-

ваний). Каждый квадрат характеризовался набором значений всех признаков. Все данные о признаках по каждому квадрату заносились затем в журнал и суммировались. В заключение строилась карта суммарной информативности и околтуривались перспективные площади. Сходный подход использовался в М. М. Чагным (1969).

А. Д. Канишев и Г. И. Менакер (1973), используя эти методы, определили информативность различных металлогенических схем Забайкалья. Они выяснили, что в наибольшей мере реальному размещению 4660 точек минерализации месторождений и рудопоявлений отвечает металлогеническая схема Забайкалья, предложенная С. С. Смирновым и являющаяся классическим примером эмпирического обобщения. Все последующие схемы, основывающиеся на тех или иных генетических гипотезах о роли металлогенических факторов, оказались значительно менее информативными.

Таким образом, даже кратко рассмотренные в данном разделе вероятностно-статистические методы открывают широкие возможности для выявления эмпирических геологических закономерностей и проверки существования взаимосвязей различных геологических факторов, которые могут быть использованы при решении прогнозно-металлогенических задач. Однако, как было очевидно из большинства рассмотренных примеров, применение этих методов позволяет получить достаточно обоснованные выводы лишь при наличии большого количества хорошо изученных объектов.

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-ИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА МНОГОФАКТОРНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ АНАЛОГИИ

Аналогия — один из древнейших видов логических умозаключений, восходящий корнями к Древнему Египту (Рабинович, 1973).

В современной логике аналогия, наряду с индукцией и дедукцией, является одним из основных видов логических умозаключений. Это вывод, который «делается от сходства одних свойств или отношений к сходству других» (Уемов, 1970). Поскольку умозаключение, сделанное по аналогии, является перенесением группы выводов от одного известного объекта к другому, менее известному, его можно определить также, как перенос информации от модели к прототипу. Таким образом, путем аналогии определяются неизвестные свойства объекта на основании сходства его известных признаков с признаками объекта того же класса, в котором эти свойства уже установлены. Выводы, полученные по аналогии, могут быть только вероятными.

Прогнозы, сделанные на основании аналогий, несомненно являлись первыми металлогеническими заключениями. Удачно подмеченные геологические аналогии способствовали открытию золотых месторождений Австралии, нефти Прикаспия, оловорудных месторождений Приморья, алмазов Якутии. Но несмотря на все это как математическая, так и геологическая теория аналогий пока совершенно не разработана и еще ждет своих исследователей.

Выводы по аналогии возможны лишь после того, как определено, какие свойства эталонного и оцениваемого объекта будут сравниваться. Разработка прогнозных заключений на основании аналогий требует формализации геологических представлений о сопоставляемых объектах: должны быть оговорены их особенности, которые будут являться предметом сравнения и, в конечном счете, должна быть предложена шкала признаков, в соответствии с которой задается характеристика эталонных объектов.

В региональной металлогенической задаче, решаемые методом аналогий, обычно сводятся к анализу степени сходства между

хорошо геологически изученными территориями, где известны, например, определенные рудные формации золота, олова, свинца и цинка, и другими, менее исследованными территориями, где такие месторождения пока неизвестны.

В качестве основополагающих сведений о степени аналогии обычно сравнивается геологическая история формирования территорий; при этом в общем виде дается анализ эволюции во времени тектонических структур, магматизма, осадконакопления, характеристика геологической позиции известных типов месторождений. Оценка роли перечисленных факторов в появлении и размещении оруденения у разных исследователей бывает далеко не однозначна.

Металлогеническое изучение рудных районов чаще ограничивается рамками одной металлогенической провинции или пояса, где они выделяются на основе геологических соображений. В этом случае задача, решаемая по аналогии, сводится к выяснению вопроса: достаточно ли для постановки поисковых работ сходство между одним-двумя хорошо изученными рудными районами, для которых известны месторождения определенных рудных формаций, например, олова, вольфрама, флюорита, и менее изученным районом, где эти месторождения пока неизвестны.

В такой форме постановка задачи фактически полностью совпадает с той, которая имела место для региональной металлогении. Однако характер рассматриваемых геологических данных, т. е. шкала геологических признаков, как уже отмечалось выше, с изменением масштабов прогнозов тоже существенно изменяется. Сведения об эволюции тектонических структур, магматизма и осадконакопления рассматриваются гораздо более детально, более подробно характеризуются типы пликтивных и дизъюнктивных дислокаций, особенности магматизма и его связи с эндогенным оруденением, метаморфизмом, учитываются также физико-механические и химические особенности осадочных пород и возможное влияние их на тип и масштаб месторождений.

При локальных прогнозах в пределах одного рудного поля рассматривается сходство геологических особенностей каких-либо двух-трех участков, несущих промышленное оруденение, с особенностями прогнозируемых участков. На этом основании делаются выводы о возможности обнаружения в этом участке промышленных рудных тел и об их вероятном расположении.

Шкала сведений, используемых для разработки локального прогноза, имеет свои особенности. В нее включаются сведения о типах рудовмещающих структур, пространственных соотношениях оруденения с различными магматическими проявлениями, физико-механических и химических свойствах пород, околорудных изменениях, а также количественные характеристики особенностей размещения оруденения. В связи с этим, при локальных прогнозах большое значение приобретают вероятностно-статистические методы обработки геологических данных.

При оценке месторождений методом аналогий, как указывают В. Ф. Семенов, А. Н. Еремеев, Е. П. Власов и другие (Принципы..., 1975), возможны следующие условия прогнозирования:

а) характеризуемый район является известной провинцией на определенные типы месторождений и имеет объекты, которые могут быть взяты в качестве эталонов для постановки поисково-оценочных работ;

б) в районе отсутствуют промышленные объекты и соответственно прямых аналогов в районе не существует. В таких случаях специалисты используют метод так называемой «дальней аналогии».

Главное различие всех металлогенических задач, решаемых методом аналогии, заключается в том, какие геологические признаки и с какой детальностью учитываются в исходных данных. А определить необходимый набор признаков и их детальность может только специалист-геолог. Таким образом, при решении металлогенических задач методом аналогий геологические знания исследователя и его интуиция в настоящее время играют решающую роль, а роль математических методов здесь пока минимальна.

История металлогенических прогнозов знает случаи, когда на основании двух-трех удачно подмеченных признаков открывались новые рудоносные провинции, или когда годы поисков в новом районе не приводили к успеху, несмотря на казалось бы полную его геологическую аналогию с территорией, богатой промышленными рудами.

Следует отметить, что какие-либо общие правила построения таких аналогий отсутствуют. Тем не менее очевидно, что при исследовании аналогий простое сопоставление геологических описаний объектов для правильного прогнозирования уже требует некоторой формализации и систематизации имеющихся сведений.

Можно указать лишь некоторые общие правила, применение которых повышает точность выводов по аналогии. Эти правила, применительно к геологическим объектам, следующие:

1. Количество геологических признаков, используемых для сравнения эталонного и прогнозируемого объекта, должно быть возможно большим.

2. Сходные признаки должны иметь существенное значение в металлогенической характеристике объектов.

3. Все эти сходные признаки должны быть по возможности более разнородными, т. е. должны характеризовать различные группы основных геологических факторов тектоники, магматизма, литологии и других, в совокупности достаточно полно и с разных сторон освещающих сравниваемые объекты.

4. Прогнозируемый признак должен входить в одну из групп, совпадающих по всем другим показателям.

Для большей правильности вывода по аналогии полезно бывает выяснить, в какой генетической связи находится прогнозируемое свойство с остальными.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ АНАЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ РАССТОЯНИЯ ХЕММИНГА

В тех случаях, когда отсутствуют соображения о важности или о генетических соотношениях признаков сравниваемых металло-

Таблица 10

Определение расстояния по Хеммингу

Объекты	Признаки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
x	1	0	0	0	1	1	0	0	$z=5$
y	0	0	1	1	1	0	0	1	
$x+y \text{ по } \text{mod } 2=z$	1	0	1	1	0	1	0	1	

генетических объектов, определение степени аналогии может быть выполнено путем подсчета расстояний по Хеммингу, т. е. подсчета количества различающихся признаков.

Таблица 11

Определение степени сходства месторождений Дубровское, Депутатское и Эге-Хая путем вычисления расстояния по Хеммингу

Месторождения	Номера признаков								Расстояния по Хеммингу	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
I (Дубровское)	0	0	0	1	0	1	1	0		
II (Депутатское)	0	1	0	0	1	1	0	1		
III (Эге-Хая)	1	1	1	1	0	0	1	0		
Результаты сложения по модулю 2	I—II	0	1	0	1	1	0	1	1	5
	I—III	1	1	1	0	0	1	0	0	4
	II—III	1	0	1	1	1	1	1	1	7

Признаки: 1 — брахискладки, 2 — линейные складки, 3 — поперечные пегрибы складок, 4 — крылья антиклиналей, 5 — крылья синклиналей, 6 — трещины односистемного скота и субпараллельные нарушения, 7 — трещины двухсистемного скота и пересекающиеся нарушения, 8 — кольцевые системы трещин

Например, x — характеристика первого, известного объекта, выраженная в единицах, которыми обозначается присутствие

признаков, а нулем — их отсутствие, y — заданная в единицах и нулях в той же шкале признаков характеристика объекта с прогнозируемым свойством (табл. 10).

Затем на основании сравнения x и y выписывается строка z . В этой строчке, если цифры в одноименных столбцах строчек x и y совпадают, записывается нуль, а если различаются — то единица. В дискретном анализе такая операция называется сложением по модулю 2.

Количество единиц в строке z и называется «расстоянием Хемминга», которое может служить мерой различия между объектами x и y .

В табл. 11 приведен пример определения различия между оловорудными месторождениями касситерит-сульфидной формации — Дубровским, Депутатским и Эге-Хая по локальным рудовмещающим структурам. Результаты этого сравнения показывают, что по особенностям локальных структур наиболее резко различаются Депутатское и Эге-Хайское месторождения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХОДСТВА МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО КОСИНУСУ УГЛА МЕЖДУ ИХ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ-ВЕКТОРАМИ

Опыт показывает, что определение расстояния по Хеммингу, как меры аналогии, является довольно грубым способом. Значительно более содержательные результаты могут быть получены, если считать заданные в единицах и нулях характеристики объектов векторами, а измерение сходства производить по косинусу угла между парами векторов-характеристик. При этом считается, что чем больше косинус угла, тем больше сходство между объектом. В этом случае расчеты выполняются по формуле

$$\cos(x, y) = \frac{\langle x, y \rangle}{|x||y|} = \frac{x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \sqrt{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}}$$

где x — характеристика одного из сравниваемых объектов, заданная признаками x_1, x_2, \dots, x_n ; y — характеристики второго сравниваемого объекта с одноименными признаками y_1, y_2, \dots, y_n .

Преимущество определения средства по косинусам угла между характеристиками-векторами по сравнению с расстоянием по Хеммингу заключается еще и в том, что в этом случае можно сравнивать и характеристики, заданные в разных цифрах, а не только в единицах и нулях. Для удобства вычислений рекомендуется переходить от значений косинусов к арккосинусам.

Следует напомнить, что определение сходства по косинусам угла между характеристиками-векторами, как и по расстоянию Хемминга, имеет смысл только тогда, когда сравниваются объек-

ты, о которых заранее известно, что они близки по своим геологическим особенностям. Сравнение этим методом резко различных объектов (например, сплошных сульфидных и существенно кварцевых руд) ведет к заведомо неверным результатам. Примеры определения сходства между объектами по косинусам между векторами показаны в табл. 12 и 13.

Таблица 12

Сходство локальных рудовмещающих структур месторождений Дубровское, Депутатское, Эге-Хая по косинусам углов между характеристиками-векторами

$$\cos (I-II) = \frac{0+0+0+0+0+1+0+0}{\sqrt{1+1+1} \times \sqrt{1+1+1+1}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29$$

$$\cos (I-III) = \frac{0+0+0+1+0+0+1+0}{\sqrt{1+1+1} \times \sqrt{1+1+1+1+1}} = \frac{2}{\sqrt{15}} = 0,52$$

$$\cos (II-III) = \frac{0+1+0+0+0+0+0+0}{\sqrt{1+1+1+1} \times \sqrt{1+1+1+1+1}} = \frac{1}{\sqrt{20}} = 0,22$$

В табл. 12 приведены подсчеты сходства локальных рудовмещающих структур месторождений Дубровское, Депутатское и Эге-Хая по характеристикам, приведенным в табл. 11. Результаты сравнения близки к полученным на основании расстояний по

Определение сходства минерального состава оловорудных месторождений характеристиками-

Месторождения	Количество минералов						
	Кварц	Касситерит	Арсенопирит	Хлорит	Пирит	Пирротин	Спальси
I (Хатмеранга)	4	4	3	4	3	3	2
II (Этыка I)	4	3	3	1	2	1	1

$$\cos (I-II) = \frac{4 \cdot 4 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot 3 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 4 \cdot 0 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 4}{\sqrt{4^2+4^2+3^2+4^2+3^2+3^2+2^2+2^2+4^2+4^2+4^2+1^2+1^2+1^2}} = \frac{71}{\sqrt{134} \sqrt{87}} = \frac{71}{108} = 0,66$$

Хеммингу. Наименьшее сходство по характеру локальных рудовмещающих структур наблюдается между месторождениями Депутатское (II) и Эге-Хая (III), для которых $\cos (II-III) = 0,22$.

В табл. 13 дан пример подсчета сходства минерального со-

става двух оловорудных месторождений, где содержания минералов в рудах оценены в баллах.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВАНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИХ СХОДСТВА ПО АНАЛОГИИ

Если есть возможность определить сходство нескольких металлогенических объектов с помощью вычисления косинусов углов между характеристиками-векторами или путем вычисления расстояний Хемминга, то эти данные могут послужить основой для классификации последующих объектов. Метод классификации объектов по коэффициентам сходства — косинусам углов между характеристиками-векторами — был предложен С. В. Сиротинской (Константинов и др., 1968). Согласно этому методу показатели сходства сводятся в таблицу (табл. 14).

Затем эта таблица обрабатывается следующим образом:

а) отмечаются максимальные коэффициенты в каждой строке таблицы (выделены полужирным шрифтом в табл. 14).

б) выписываются римскими цифрами номера столбцов, в которых есть максимальные показатели сходства, вместе с обозначаемыми арабскими цифрами номерами строк, содержащих эти показатели. Индексы столбцов выписываются в порядке убывания количества максимальных показателей. Объекты, отвечаю-

Таблица 13

Хапчеранга и Этыка (Восточное Забайкалье) по косинусам угла между векторами состава

ралов в баллах

Халькоп- рит	Сфалерит	Галенит	Карбонаты	Толаз	Флюорит	Мусковит	Марказит	Кальцевый полевой шпат
2	4	4	4	1	0	1	1	0
1	1	1	0	4	3	4	1	1

$$+1 \cdot 1 + 0 \cdot 1$$

$$\sqrt{4^2 + 3^2 + 3^2 + 1^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 4^2 + 3^2 + 4^2 + 1^2 + 1^2}$$

щие индексам столбцов, называются ядрами, а индексам строк — элементами группы. Для табл. 14 эти группы будут следующие:

1-группа — III: 1—4—6; 2-я группа — IV: 2—3; 3-я группа — V: 6, 4-я группа — VI: 5;

Таблица 14

Показатели сходства металлогенических объектов по С. В. Сиротинской

Номера объектов	Номера объектов					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0,62	0,77	0,71	0,56	0,58
2	0,62	1	0,53	0,66	0,51	0,47
3	0,77	0,53	1	0,84	0,70	0,75
4	0,71	0,66	0,84	1	0,62	0,70
5	0,56	0,51	0,70	0,62	1	0,75
6	0,58	0,47	0,75	0,70	0,75	1

в) объединяются группы с общими индексами, т. е. выясняется, являются ли элементы одной группы ядрами другой. В приведенном примере 1-я группа объединяется со 2-й по индексам III-3 и IV-4; 4-я группа объединяется с 1-й по индексам VI-6 и, наконец 3-я группа с 4-й группой по индексам V-5;

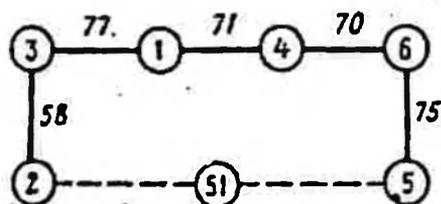


Рис. 1. Классификация объектов по показателям сходства, приведенным в табл. 14: 1 класс — объекты 1, 3, 2 класс — объекты 5, 6; 3 класс — объект 2. Кружками обведены номера объектов, цифры над соединяющими их линиями — показатели сходства

г) над линиями, соединяющими различные элементы, выписываются показатели сходства, и на основании их анализа по наименьшим показателям проводятся границы (рис. 1). В рассматриваемом случае наиболее отличающимся по показателям сходства оказывается объект 2, более всего связанный с объектом 3; остальные образуют цепочку, но по выписанным над соединяющими их линиями минимальным показателям сходства можно разделить их еще на два класса.

На примере данных, приведенных в табл. 15 и рис. 2, показано применение этого метода для классификации оловорудных месторождений по показателям сходства их минерального состава.

Группировка объектов из табл. 15 по показателям сходства следующая: III — 1—6—9; IV — 2—3—8; VIII — 4—7—10; VI — 5.

Последующее объединение групп и анализ коэффициентов сходства позволяет выделить следующие классы: первый с объектами 7, 8, 10; второй с объектами 1, 2, 3; третий с объектами 5, 6, 9 и промежуточный между первым и вторым классамп объ-

ект 4. Несколько более сложный подход был предложен Р. Миллером и Дж. Каном (1965).

В предлагаемом ими методе ветвящихся связей допускается, что связь двух объектов существует, если значение показателя

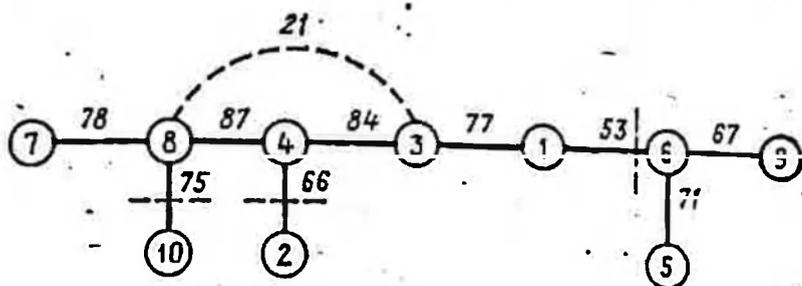


Рис. 2. Классификация объектов по показателям сходства, приведенным в табл. 15. Кружками обведены номера объектов, цифры над соединяющими их линиями — показатели сходства

сходства (коэффициента корреляции) превысит некоторый произвольно заданный уровень. Нахождение связанных групп объектов сводится к ряду последовательных операций:

Таблица 15

Показатели сходства (косинусы характеристик-векторов углов) минерального состава оловорудных месторождений

Номера и названия объектов	Номера объектов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 (Хапчеранга)	1	62	77	71	56	53	52	64	57	49
2 (Смирновское)	62	1	58	66	51	47	63	59	53	47
3 (Дубровское)	77	58	1	84	70	75	70	21	77	73
4 (Хрустальное)	71	66	84	1	62	70	77	87	71	60
5 (Валькумейское)	56	51	70	62	1	71	65	62	63	55
6 (Иультинское)	53	47	75	70	71	1	68	70	67	55
7 (Индустриальное)	52	63	70	77	65	68	1	78	51	40
8 (Депутатское)	64	59	21	87	62	70	78	1	73	75
9 (Льялягуа)	57	53	77	71	63	67	51	73	1	74
10 (Марококала)	49	47	73	60	55	55	40	75	74	1

Шаг 1. Упорядочиваются объекты. Например, принимается порядок верхней строки таблицы показателей сходства.

Шаг 2. Из установленного таким образом порядка последовательно выписывается на карточку каждый объект вместе со всеми объектами, с которыми он связан.

Шаг 3. Начиная с первой карточки и выбирают из записанных номеров объекты следующих за первым справа. Рассматривают следующую карточку и на ней выбирают первый объект и следующий за ним справа, который есть и на первой карточке. Каждый новый объект должен быть и на предшествующих карточках этой последовательности. Процедура продолжается до тех пор, пока все карточки последовательно не будут исчерпаны.

Совокупность выбранных таким образом карточек характеризует группу связанных объектов.

Шаг 4. Возвращаются к первой карточке и начинают построение новой последовательности (начиная со второго объекта справа от первого объекта); это построение производится до тех пор, пока все возможности не будут исчерпаны.

Шаг 5. Первая карточка пропускается и вся процедура производится начиная со второй карточки, полученный набор карточек фиксируется как новая группа связанных объектов. Все операции последовательно начинаются затем с каждой очередной карточки.

В результате полностью выделяются все максимальные группы. Например, в табл. 16, которая представляет собой симметричную матрицу, показатели сходства больше или равные 0,9, обозначены буквой x , а пустые клетки соответствуют случаям, когда связь между объектами отсутствует ($r < 0,9$).

На основании данных этой таблицы выписываются карточки, на которых сверху указывается номер карточки, соответствующий номеру объекта, а затем номера всех других объектов, с которыми он имеет показатели сходства, большие 0,9.

Таблица 16

Выделение групп методов ветвящихся связей

Номера объектов							Номера объектов						
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
1		X	X			X	4		X				
2	X			X	X		5	X		X			
3	X	X			X	X	6	X	X		X		X

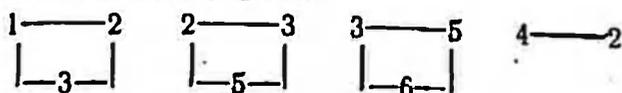
В результате получается следующий набор карточек:

(1), 2, 3, 6 ⁽¹⁾	1, (2), 3, 4, 5 ⁽²⁾	1, 2, (3), 5, 6 ⁽³⁾	2, (4) ⁽⁴⁾
2, 3, (5), 6 ⁽⁵⁾	1, 3, 5, (6) ⁽⁶⁾		

Очевидно, что карточка 1 связана с карточками 2, 3, 6. Далее рассматриваем карточку 2 и видим, что справа от нее расположен объект 3, который есть и на карточке 1. Затем рассматриваем карточку 3 и видим, что на ней справа от объекта 3 расположен объект 5, которого нет на карточке 1. Это дает основание зафиксировать группу, состоящую из объектов 1, 2, 3.

Затем карточка 1 исключается, и отбор начинается с карточки 2 в новой последовательности. Этот отбор позволяет выделить следующую группу 2, 3, 5. Отбор, начатый с карточки 3, дает группу 3, 5, 6. Для карточки 4 получаем группу, состоящую из одной пары 2, 4; для карточки 5 — аналогичную группу 5, 6.

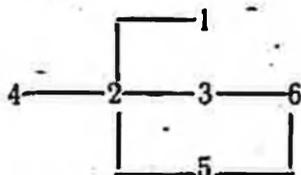
т. е. каждый новый объект должен быть и на предшествующих карточках этой последовательности. Результаты анализа изображаются в следующей форме:



После этого возвращаются к карточке 1, но рассматривают новую последовательность, начинающуюся с объекта 3. Это позволяет выделить группу 1, 3, 6. Продолжая подобный просмотр связей, приходим к выводу, что дальше он дает уже выделенные ранее группы.

Проводя линии, соединяющие объекты и тем самым означающие наличие связи между ними, получаем максимально отделенные группы, т. е. группы, которые не содержатся полностью ни в какой другой, например пара 1, 6. Наоборот, пара 5, 6 является группой, содержащейся в большой группе 3, 5, 6. Иногда некоторые члены оказываются общими для нескольких групп.

Этот метод также позволяет дать графическое изображение групп, отчетливо показывающее соотношения между ними и наличие перекрытий. В рассматриваемом случае это изображение сводится к следующему:



Проверка показала, что метод ветвящихся связей и метод С. В. Сиротинской дают в конечном счете близкие результаты, однако последний представляется автору предпочтительным, так как, во-первых, при нем не вводятся граничные значения коэффициентов сходства, а во-вторых, он позволяет количественно выразить связи между объектами внутри групп и между различными группами.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА «БР»

Для определения принадлежности исследуемых объектов к одному из двух классов (перспективные или бесперспективные) И. Д. Савинским (1974) был предложен сравнительно простой способ, названный им алгоритмом «БР». Как показал опыт работы, этот алгоритм позволяет получить достаточно уверенные выводы о том, к какому классу принадлежит исследуемый объект при небольшом (10—20) числе используемых для сравнения эталонных промышленных и непромышленных объектов. Алгоритм основан на вычислении с помощью биномиального рас-

пределения веса каждого признака и проведении последующего «голосования» с учетом этого веса. Под «голосованием» понимается анализ сочетаний значений признаков в каждом из двух классов эталонных объектов.

Таблица 17

Применение алгоритма «БР» для оценки вероятных масштабов рудных месторождений

Объекты обучения

Номера месторождений	Классы	Номера признаков									$\sum l_i$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	-1,22
2	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0,74
3	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1,91
4	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	2,62
5	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	-3,27
6	2	0	1	1	1	1	0	1	1	0	-14,16
7	2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	-9,23
8	2	0	1	0	1	0	1	1	1	0	-5,23
9	2	0	1	1	1	1	0	1	1	0	-14,16
10	2	0	1	1	0	1	0	1	0	0	-10,15
Соотношение											
$\frac{l_1}{l_2}$		$\frac{3}{0}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{0}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{0}{-4}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{2}{0}$	
Информационный вес l_i		2,83	-1,66	-2,83	-2,31	-4,00	2,10	-1,66	-1,70	2,00	

Объекты экзамена

11	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	-2,43
12	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	-0,92
13	2	0	0	1	1	1	0	1	1	0	-12,5
14	2	0	1	1	0	1	1	1	1	0	-9,75

При использовании алгоритма «БР» с помощью вспомогательной таблицы (см. прил. 11-3) определяется вес каждого признака, выраженного столбцом в таблице объектов эталонов. Этот вес зависит от соотношения находящихся в столбце единиц первого и второго классов (l_1/l_2). В зависимости от соотношения $l_1 > l_2$ или $l_1 < l_2$ информационному весу признака придается знак «+» или «-». Затем вычисляются суммы этих весов ($\sum l_i$)

для эталонных объектов и объектов экзамена, т. е. таких, для которых прогнозируемое свойство хорошо изучено, но которые не входили в первоначальные подсчеты. В зависимости от того, насколько хорошо различаются по величинам $\sum l_i$ эталонные

объекты и объекты экзамена, можно судить об успешности решения задачи и о возможности использовать полученные веса для прогнозирования.

В качестве примера рассмотрим применение алгоритма «БР» для определения вероятных масштабов ртутных месторождений. В приведенной ниже табл. 17, основанной на таблице, разработанной Н. Г. Демидовой и другими (Оценка... 1974), оставлены только такие признаки, которые, как показала предшествующая обработка (после применения алгоритма «Потенциал-2») могут являться информативными для отнесения объектов к одному из двух классов: промышленным (1) и непромышленным (2) месторождениям. Из рассмотренных семидесяти признаков, характеризующих региональные геологические структуры, сопутствующую минерализацию, рудоконтролирующие и рудовмещающие структуры, рудовмещающие и рудолокализирующие породы, типы рудных тел и особенности их залегания, околорудные изменения и ассоциированные с оруденением магматические породы, информативными оказались следующие: 1 — сопутствующая свинцово-цинковая минерализация; 2, 3 — рудоконтролирующие линейные складки, ядра и шарниры антиклиналей; 4 — рудовмещающие зоны расланцевания и трещиноватости; 5 — рудолокализирующие песчаники и алевролиты; 6, 7 — рудные тела в виде гнезд и минерализованных зон дробления; 8 — углы падения рудных тел от 50 до 70°; 9 — наличие ассоциированных с оруденением штоков щелочных сиперитов-монцитов.

В рассматриваемом в табл. 17. примере все объекты обучения (эталон) по суммам весов информативных признаков четко разделились на два класса, соответствующих масштабам месторождений. Для объектов экзамена также достаточно определено устанавливается принадлежность к первому или второму классу. Некоторые сомнения могут возникнуть по поводу правильности определения масштаба месторождения 11, однако анализ $\sum I_i$ для объектов-эталонных показывает, что это место-

рождение скорее ближе к первому классу, чем ко второму. Однако следует иметь в виду, что в рассмотренном примере для экзамена было взято слишком мало объектов. Это не дает возможности достоверно судить, насколько эффективно можно использовать алгоритм «БР» для определения вероятных масштабов ртутных месторождений по перечисленным признакам.

Другим примером может служить оценка вероятных содержаний полезного компонента по геолого-минералогическим особенностям рудных тел.

На одном из месторождений обычным геологическим анализом условий локализации рудных тел не удалось выяснить причины появления рудных столбов. Проведенная математическая обработка имевшейся документации позволила наметить основные факторы их образования (Константинов, Сиротинская,

1973). Как показано ниже, с помощью алгоритма «БР» можно определить информационные веса этих факторов, а по суммам информационных весов прогнозировать богатые и бедные участки (табл. 18).

Оценка вероятных содержаний полезного компонента в

№ п/п	Содержание, г/т	Классы	Номера							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Объекты										
1	86,4	I	0	0	0	0	1	0	1	0
2	50,0	I	0	1	0	0	0	1	1	0
3	34,8	I	0	0	1	0	1	0	1	1
4	17,6	I	0	0	0	0	1	0	1	0
5	9,6	II	0	0	0	0	0	1	1	1
6	4,0	II	0	0	0	0	0	1	0	1
7	1,6	II	0	1	1	0	0	1	0	0
8	0,0	II	1	0	1	1	1	1	0	0
Соотношение $\frac{I_1}{I_2}$			0/1	1/1	1/2	0/1	2/1	1/4	2/1	1/2
Информационный вес I_f			-1,41	1,15	-1,41	-1,41	1,79	-2,31	1,79	-1,41
Объекты										
9	31,2	I	1	1	0	0	1	0	1	0
10	11,4	I	0	1	1	0	1	0	0	0
11	8,3	II	0	0	1	1	0	0	1	0

Значения геологических признаков, по которым можно судить о степени обогащенности участков, следующие: 1 — мощность рудного тела 1,5—2,0 м; 2 — азимут падения контакта лежащего бока жилы 330—340°; 3 — угол падения контакта лежащего бока 20—30°; 4 — висячий бок жилы сложен серым кварцем; 5 — лежащий бок жилы сложен серым кварцем; 6 — лежащий бок жилы сложен молочно-белым кварцем; 7 — в жильном кварце наблюдаются пустоты выщелачивания; 8 — во вмещающих породах присутствуют прожилки, гнезда и апофизы молочно-белого кварца; 9 — разветвление жилы; 10 — наличие включений полезного компонента в кварце; 11 — наличие включений сфалерита; 12 — видимые включения полезного компонента в рудной жиле; 13 — включения полезного компонента на контактах жильного квар-

да с ксенолитами вмещающих пород; 14 — богатая вкрапленность сульфидов в жильном кварце; 15 — редкая вкрапленность сульфидов в жильном кварце; 16 — азимут падения трещин в жильном кварце 350—20°, угол падения 30—40°; 17 — азимут падения трещин в жильном кварце 350—20°, угол падения больше 70°.

жилах по геологическим факторам с помощью алгоритма «БР» Таблица 18

признаков										$\sum W_i$
9	10	11	12	13	14	15	16	17		
обучения,										
0	1	1	1	0	1	0	0	0		11,58
1	0	0	0	0	0	0	0	0		4,63
1	1	0	1	1	0	0	0	1		9,58
0	0	1	0	0	0	0	0	0		3,79
1	0	0	0	0	0	0	0	0		-1,93
0	0	0	0	0	0	1	0	0		-6,55
0	0	0	0	0	0	1	1	0		-6,81
0	0	0	0	0	0	1	0	0		-7,58
$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{0}{10}$	$\frac{0}{10}$	$\frac{1}{10}$		
2,00	2,00	2,00	2,00	1,41	2,00	-2,83	-1,41	-1,41		
экзамена										
1	0	1	0	0	1	0	0	0		9,32
1	0	0	0	0	0	1	1	0		-0,71
0	1	0	0	0	0	1	0	0		-1,86

Итоги расчетов показывают, что по полученным с помощью табл. 18 информационным весам признаков объекты обучения хорошо подразделяются на два класса. Эти классы соответствуют первому и второму классам, выделенным по содержаниям полезного компонента. Суммы информационных весов для первого класса определяются границами от 3,79 до 11,58; для второго класса от -1,93 до -7,58.

Результаты, полученные с помощью сумм информационных весов признаков для объектов экзамена, также подтверждают хорошие возможности алгоритма. Лишь один объект, принадлежащий к первому классу по сумме весов признаков, оказался в неопределенном положении. Позиция двух других объектов определена правильно. Однако, как и в предыдущем случае,

количества рассмотренных объектов экзамена недостаточно для того, чтобы уверенно использовать полученные данные для прогноза на данном месторождении обогащенных участков.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИОННЫХ РЯДОВ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Метод анализа вариационных рядов геологических объектов возник из сравнительного изучения рудных месторождений путем исследования рядов рудных формаций (Константинов, 1973). При таком подходе ряд рудных формаций составляется из месторождений, объединенных каким-либо общим признаком, выбранным в соответствии с задачами исследования (например, все они должны принадлежать к месторождениям золото-сульфидно-кварцевой группы рудных формаций). В то же время эти месторождения должны характеризоваться постепенным направленным изменением минерального состава от одной рудной формации через сложные переходные формации к другой формации. Исследование причин, определяющих постепенное изменение какого-либо минералогического параметра путем изучения геологических особенностей месторождений, составляющих ряд рудных формаций, иногда позволяет выделить тот геологический фактор, который влиял на это изменение, сам меняясь также постепенно, и тем самым найти взаимосвязь между различными особенностями минерального состава данной группы месторождений и геологическими условиями их нахождения.

Дальнейшим развитием метода являлся сравнительный анализ других геологических объектов путем составления из них рядов с постепенным изменением исследуемого признака и использованием математического аппарата. Таким образом, был осуществлен переход к исследованию месторождений, изменяющийся признак которых представляется вариационным рядом. Применение математических методов позволяет в этом случае выявить связь этого признака одновременно с несколькими геологическими факторами, что значительно затруднено, а иногда и просто невозможно при обычном геологическом анализе. При этом геологические объекты могут быть самыми различными: месторождения какой-либо одной рудной формации, различные участки территории, исследуемой с целью разработки прогнозов, содержания элементов в различных частях рудных тел и т. д.

Изучение расположенных в вариационные ряды по изменяющемуся прогнозируемому признаку геологических объектов — метод, открывающий совершенно новые перспективы в прогнозе тех или иных геологических явлений. С его помощью удается, во-первых, уже на начальных стадиях исследования выбрать среди многих именно те признаки, которые действительно влияют на прогнозируемое свойство, во-вторых, значительно упро-

стить все вычислительные процедуры, в-третьих, получать надежные прогнозные заключения, обходясь в некоторых случаях без помощи ЭВМ.

Преимущество предложенной методики, по сравнению с обычно применяющимся в задачах распознавания образцов делением объектов на два класса, уже понято многими специалистами-геологами. В частности, В. Н. Ушаков, Ф. П. Кренделев, В. А. Воронич (1976) при оценке золотоносности золоторудных и шеелитовых месторождений широко применяли ранжирование эталонных объектов по их масштабам.

Рассматриваемый в работе логико-информационный метод прогнозирования путем исследования вариационных рядов не является единственным направлением.

Решение прогнозно-поисковых задач логико-информационными методами интенсивно разрабатывается коллективом исследователей СО АН СССР (Организация ... 1975; Логико-математическая ..., 1975). В последние годы ими предложен комплекс соответствующих алгоритмов и программ, составленных для ЭВМ БЭСМ-6, М-220 и М-222 и предназначенных для исследования геологической информации.

При этом значительное внимание было уделено алгоритмам и программам, основанным на применении спектрального метода оценки столбцов и строк числовых матриц (метода согласованных оценок, предложенного Ю. Л. Васильевым и А. Н. Дмитриевым (1972)). Содержание метода заключается в том, что о проявленности фактора x_{n+1} в объектах $\omega_1, \dots, \omega_n$ и степени влияния на него признаков P_1, \dots, P_n предлагается судить по нагрузкам строк и столбцов таблицы, в которой отражены характеристики эталонных объектов. Эти нагрузки находятся путем последовательных пересчетов весов строк с учетом весов столбцов, и наоборот. При каждом пересчете вес строки ω_i определяется через веса столбцов, найденные на предшествующем шаге как сумма весов тех столбцов, по которым в строке ω_i стоят единицы; вес столбца P_i аналогично определяется через найденные в предшествующем шаге веса строк, затем полученные два набора чисел нормируются, начинается новый пересчет и т. д. Процесс пересчетов сводится к тому, что получаются некоторые предельные векторы $\underline{\omega}$ и $\underline{\pi}$, которые принимаются в качестве нагрузок. Значения ω_i интерпретируются как мера типичности объекта в группе объектов исследуемого класса, а величины π_i — как мера характерности признака «i» для исследуемого класса объектов. Существенной особенностью этих алгоритмов является возможность обработки таблиц, содержащих характеристики признаков, представленных в виде любых неотрицательных чисел.

Кроме того, разрабатывались алгоритмы и программы, в которые для вычисления оценок столбцов и строк включают зна-

чения целевого признака, а само вычисление построено на индивидуальной оценке каждого отдельного признака. Применение этих методов позволяет сократить время вычислительных процедур, значительно увеличить количество признаков и объектов исследования.

Одновременно продолжалось совершенствование программ, в основу которых было положено изучение объектов с помощью тестов и тесторов. Хотя в основу этих программ положен алгоритм, существенно уменьшающий необходимость перебора столбцов исходной таблицы (Слуцкая, 1968), однако эффективность его все же невелика. Так, эксплуатация программы № 1 на ЭВМ М-220 показала, что таблицы с числом строк 15—20 и столбцов 20—25 обрабатываются за 30—40 мин, а программа № 2 на ЭВМ ЭСМ-6 просчитывает таблицу с 15—20 строками и 30—35 столбцами примерно за 1 ч (Логико-математическая ..., ..., 1975).

Внимание сотрудников ИГЕМ АН СССР, как было сказано выше, сосредоточивалось на разработке возможно более простых способов исследования геологической информации, которые позволили бы избежать сложных вычислительных процедур и придать каждому применяемому математическому преобразованию определенный содержательный смысл, раскрывающийся в геологической интерпретации результатов.

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Основные правила подготовки исходных данных при обработке информации методом вариационных рядов, дополнительно к тем, которые рассматривались выше, сводятся к следующему:

а) объекты-эталон должны принадлежать к одной, максимально однородной группе (рудные месторождения — к одной рудной формации, рудные районы — к одному типу и т. д.) Степень однородности желательно определять с помощью статистических критериев или показателей сходства, как это было показано выше;

б) объекты-эталон, если позволяют условия задачи, должны находиться в максимально однородных геологических условиях (рудные месторождения — в одной металлогенической провинции, рудные районы — в однотипных металлогенических провинциях и т. д.), так как это значительно улучшает качество прогноза;

в) характеристики объектов-эталон располагаются в соответствии с направленным монотонным изменением целевого признака, т. е. в соответствии с вариационным рядом, образуемым изменяющимися значениями этого признака. Однако внутри этого ряда необходимо выделить несколько рангов-классов (не менее трех), причем в пределах каждого класса должно находиться не менее двух объектов одного класса.

Месторождения при этом могут делиться по масштабам на крупные, средние, мелкие и рудопроявления, или, как было сделано при исследовании факторов, влияющих на содержания олова и вольфрама в олово-вольфрамовых месторождениях (Сиротинская, 1975), на классы месторождений, содержащих: 1) только олово, 2) олова больше вольфрама, 3) вольфрама больше олова, и, наконец, класс чисто вольфрамовых месторождений.

Пользуясь терминами математической статистики, можно сказать, что эталонные объекты располагаются в дискретный вариационный ряд с ранжированным значением варьирующего признака.

Например, при исследовании геологических факторов, влияющих на содержание золота в кварцевых жилах, целевой признак изменяется непрерывно, как и при опробовании рудных тел на любые другие компоненты. Переход к дискретному ряду в этом случае осуществляется делением на интервалы. Для определения оптимальной величины интервала (h), при которой интервальный ряд не был бы слишком громоздким и в то же время позволял бы выявить характерные черты рассматриваемого явления, можно использовать формулу Стрэджеса (Математическая статистика, 1975)

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,322 \lg n}$$

где x_{\max} и x_{\min} — соответственно максимальное и минимальное значения варьирующего признака, n — количество объектов. Если h оказывается дробным числом, то за величину интервала берут либо ближайшее целое число, либо ближайшую несложную дробь. За начало первого интервала рекомендуется в этих случаях принимать величину, равную $(x_{\min} - h/2)$. Тогда если a_1 — начало i -того интервала, то $a_1 = x_{\min} - h/2$; $a_2 = a_1 + h$; $a_3 = a_2 + h$ и т. д. Построение интервалов продолжают до тех пор, пока начало следующего по порядку интервала не будет равным или большим x_{\max} (табл. 19).

После того как получена шкала интервалов, приступают к группировке результатов наблюдений на классы. Границы последовательных интервалов записываются в столбец, а затем объекты делятся на три-пять классов, в соответствии с найденными таким путем границами интервалов. Если x_i совпадает с границей интервала, то его можно относить или к более низкому, или более высокому классу, однако делать это единообразно для всей серии наблюдений:

$$h = \frac{12,2 - 3,0}{1 + 3,322 \lg 20} = \frac{9,2}{5,322} \approx 1,7.$$

Принимаем $h \approx 2,0$, начало первого интервала $a_1 = x_{\min} - h/2 = 3,0 - 1,0 = 2,0$; $a_2 = a_1 + h = 2,0 + 2,0 = 4,0$; $a_3 = a_2 + h = 4,0 + 2,0 = 6,0$; $a_4 = a_3 + h = 6,0 + 2,0 = 8,0$; $a_5 = 10$; $a_6 = 12$.

Для повышения точности результатов последующей математической обработки желательно удалить некоторые промежуточные члены дискретного вариационного ряда. При этом нужно стремиться к тому, чтобы различия между составляющими од-

Таблица 19

Вариационный ряд характеристики различных участков кварцевых жил, содержащих разные концентрации золота

№ п/п	Содержания золота, г/т	Номера интервалов	Номера классов	Геологические признаки различных участков рудных жил				
				1	2	3	.....	160
1	12,2	6	IV	1	0	1	.....	1
2	10,1	5		1	0	0	.....	1
3	9,6	4		0	1	1	.....	1
4	8,3			1	0	0	.....	1
5	7,5			0	0	1	.....	1
6	7,4			0	0	0	.....	1
7	6,8	3	III	1	1	0	.....	0
8	6,7			1	1	1	.....	0
9	6,2			1	0	1	.....	0
10	6,1			0	1	0	.....	1
11	5,8			1	1	1	.....	0
12	5,6			1	0	1	.....	0
13	5,5	2	II	0	1	0	.....	1
14	5,4			1	1	1	.....	1
15	5,2			1	1	0	.....	0
16	4,8			0	0	0	.....	0
17	4,5	1	I	0	1	0	.....	1
18	3,5			0	1	1	.....	1
19	3,3			1	0	0	.....	0
20	3,0			0	0	0	.....	0

ного класса не превышали различия между средними характеристиками соседних классов. Однако это требование для крайних членов ряда не всегда удается выполнить.

Конечной стадией подготовки исходных геологических данных для логико-информационной обработки является расположение хорошо изученных эталонных объектов в вариационный ряд в соответствии с монотонным изменением изучаемого свойства, которое затем предполагается прогнозировать на новых объектах. Объекты в вариационном ряду делятся на три-пять классов, по два-три объекта в каждом классе. В соответствии с полученным вариационным рядом располагаются геологические характеристики объектов, закодированные в виде единиц и нулей в принятой шкале признаков.

В результате получается основная таблица эталонных объектов, которая затем подвергается математической обработке.

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Математическая обработка систематизированных исходных данных осуществляется по следующему плану: а) селекция информативных признаков и определение их весов с помощью смещенного треугольника Паскаля; б) определение весов информативных признаков путем графического построения тупиковых тесторов; в) получение разделяющих весов информативных признаков; г) оформление результатов.

Селекция информативных признаков и определение их весов с помощью смещенного треугольника Паскаля

Селекция признаков имеет целью выявить и сохранить для дальнейших исследований среди всех перечисленных в шкале лишь те, которые имеют отношение к цели исследования (информативные признаки).

Таблица 20

Треугольник Паскаля

а	б
Биномиальные коэффициенты, образующие треугольник Паскаля	Треугольник Паскаля в числовом виде
C_0^0	1
C_1^0 C_1^1	1 1
C_2^0 C_2^1 C_2^2	1 2 1
C_3^0 C_3^1 C_3^2 C_3^3	1 3 3 1
	1 4 6 4 1

Смещенный треугольник Паскаля

0
1 0
2 1 0
3 3 1 0
4 6 4 1 0
5 10 10 5 1 0

Для селекции признаков может быть использован смещенный треугольник Паскаля (Константинов, Сиротинская, 1974; Сиротинская, 1975). Как известно, обычный треугольник Паскаля представляет собой треугольную таблицу чисел, являющихся биномиальными коэффициентами (табл. 20, а), в числовом виде треугольник Паскаля показан на табл. 20, б. В силу свойства биномиальных коэффициентов

$$C_n^k + C_n^{k+1} = C_{n+1}^{k+1}$$

каждое число треугольника Паскаля равно сумме двух чисел над ним стоящих. (при этом считается, что на периферии треугольника Паскаля стоят нули). Треугольник Паскаля был введен в сочинении Паскаля «Трактат об арифметическом треугольнике», поэтому его иногда называют «арифметическим треугольником».

Смещенный треугольник Паскаля отличается от обычного тем, что повернут по отношению к обычному на 90° и первая строка состоит у него из нулей (табл. 20, в). Смещенный треугольник Паскаля применяется в теории кодирования (кодирование источника, порождающего сообщения, для которых полностью или частично отсутствуют сведения о распределении вероятностей). С помощью смещенного треугольника Паскаля, являющегося одной из простейших функций двух переменных, каждому двоичному набору $(1,0)$ некоторой фиксированной длины m , содержащему r единиц, можно присвоить определенный вес. При этом существует взаимнооднозначное соответствие между множеством наборов с параметрами (m, r) и их весами. Методика определения весов и селекции признаков с помощью смещенного треугольника Паскаля рассмотрена ниже на конкретных примерах.

Селекция признаков проводится в несколько стадий.

1. Для определения информативных признаков рассматриваются составленные на основании основной таблицы подтаблицы характеристик объектов-эталонов. В каждой подтаблице содержится по одному объекту из каждого класса основной таблицы. Число таких подтаблиц должно быть не меньше числа объектов в каждом классе основной таблицы. В каждой подтаблице объекты упорядочены в соответствии с постепенным изменением целевого признака, причем это упорядочение должно быть одинаковым во всех подтаблицах. В результате получается, что каждая из таких подтаблиц характеризуется как бы элементарный вариационный ряд объектов-эталонов (табл. 21).

2. Затем в каждой подтаблице определяются веса признаков с помощью смещенного треугольника Паскаля. Все вычисляется как для единиц, так и для нулей. Эта процедура производится следующим образом (табл. 21, а, б). Каждому порядковому номеру единицы столбца подтаблицы ставится в соответствие столбец с таким же номером в треугольнике Паскаля. Кроме того, определяется место, которое занимает эта единица в строках таблицы, и находится соответствующий ей номер строки треугольника. Затем этой единице придается вес, равный числу, стоящему на пересечении найденных столбца и строки треугольника. Затем веса, найденные для всех единиц столбца, суммируются.

Таким же образом вычисляется и суммируются веса для нулей исследуемого столбца. Например, в первом столбце номеров признаков подтаблицы а таблицы 21 в первой строке, т. е. на первом месте, стоит первая по порядку единица. Ее вес по расположенному справа смещенному треугольнику Паскаля определяется нулем, расположенным в первой строке и первом столбце треугольника. Второй по порядку единице, расположенной в первом столбце во второй строке подтаблицы, следовательно на втором месте, отвечает нуль, расположенный во второй строке треугольника вторым по порядку: третьей единице — нуль, расположенный на третьем месте в третьей строке смещенного треугольника Паскаля. Поскольку вес каждой едини-

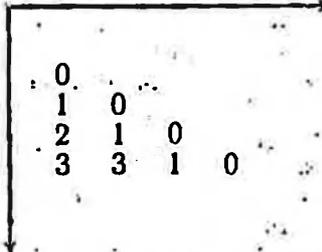
Определение весов признаков в подтаблицах таблицы объектов-эталонов с помощью смещенного треугольника Паскаля

Таблица объектов-эталонов

(полужирным шрифтом набраны номера признаков, для которых преобладание веса единиц или веса нулей остается постоянным)

Классы	Номера объектов	Номера признаков							
		1	2	3	4	5	6	7	8
I	1	1	0	0	1	0	1	0	0
	2	1	1	0	1	1	0	1	0
II	3	1	0	0	1	0	0	1	0
	4	0	1	0	0	1	1	0	0
III	5	1	0	1	1	1	1	1	0
	6	1	1	1	1	0	0	0	0
IV	7	0	1	0	0	1	0	0	1
	8	0	0	0	0	0	1	1	1

Подтаблица а

Классы	Номера объектов	Номера признаков								Треугольник Паскаля 1 2 3 4
		1	2	3	4	5	6	7	8	
I	1	1	0	0	1	0	1	0	0	Порядковые номера знаков 
II	3	1	0	0	1	0	0	1	0	
III	5	1	0	1	1	1	1	1	0	
IV	7	0	1	0	0	1	0	0	1	
		0	3	2	0	5	1	2	3	Вес единиц по треугольнику
		3	0	1	3	0	4	3	0	Вес нулей по треугольнику

Подтаблица б

Классы	Номера объектов	Номера признаков								Треугольник Паскаля
		1	2	3	4	5	6	7	8	
I	2	1	1	0	1	1	0	1	0	Треугольник Паскаля ↓ Место знаков 0 1 0 2 1 0 3 3 1 0
II	4	0	1	0	0	1	0	0		
III	6	1	1	1	1	0	0	0		
IV	8	0	0	0	0	0	1	1		
		1	0	2	1	0	4	3	3	Вес единиц по треугольнику
		4	3	1	4	5	1	2	0	Вес нулей по треугольнику

цы первого столбца равен нулю, суммарный вес единиц в первом столбце также равен нулю. Затем определяем вес нулей в этом столбце. Единственный (следовательно, первый по порядку) нуль находится здесь в четвертой строке подтаблицы. Ему будет соответствовать тройка, находящаяся в четвертой строке в первом столбце треугольника. Соответственно вес нулей в первом столбце будет равен трем.

Рассмотрим, как вычисляется вес единиц и нулей в шестом столбце подтаблицы а таблицы 21. Здесь первая по порядку единица находится на первом месте (в первой строке), вес ее по смещенному треугольнику равен нулю. Вторая по порядку единица находится в третьей строке подтаблицы а, т. е. на третьем месте, и ей в треугольнике будет соответствовать единица, находящаяся в его втором столбце и третьей строке. Таким образом, суммарный вес единиц в шестом столбце подтаблицы равен единице. Первый нуль в этом столбце стоит на втором месте, следовательно, его вес определяется единицей первого столбца и второй строки треугольника.

Второй по порядку нуль находится в четвертой строке подтаблицы, по треугольнику его вес равен трем, так как определяется цифрой, расположенной на пересечении второго столбца и четвертой строки треугольника. В результате суммарный вес нулей шестого столбца подтаблицы а равен четырем.

Наконец, для седьмого столбца подтаблицы а веса единиц и нулей по смещенному треугольнику определяются следующим образом. Здесь первая по порядку единица расположена во второй строке. Ее вес определяется цифрой, находящейся на пересечении первого столбца и второй строки треугольника, т. е. единицей. Вторая единица седьмого столбца подтаблицы расположена в третьей строке, следовательно, по смещенному треугольнику ее вес также равен единице. Таким образом, сумма весов единиц седьмого столбца равна двум. Вес первого нуля седьмого столбца определяется величиной, расположенной на пересечении первого столбца и первой строки треугольника, т. е. равен нулю. Весу второго нуля седьмого столбца, расположенного в четвертой строке подтаблицы, соответствует цифра три, нахо-

длежащая на пересечении второго столбца и четвертой строки треугольника. Таким образом, суммарный вес нулей, находящихся в седьмом столбце, оказывается равным трем.

Таблица 22

Пример. оценки максимально возможного колебания веса признаков

Подтаблица а

Номера объектов	Номера признаков	Смещенный треугольник Паскаля
	...К...	
1	1	0 0 0 0 0
3	0	1 0 0 0 0
5	1	2 1 0 0 0
7	1	3 3 1 0 0
9	0	4 6 4 1 0
	2	Вес единиц по треугольнику
	7	Вес нулей по треугольнику

Подтаблица б

Номера объектов	Номера признаков	
	...К...	
2	1	
4	1	
6	0	
8	0	
10	1	
	Вес единиц по треугольнику	4
	Вес нулей по треугольнику	5

Подтаблица а₁

(после замены строк 3 и 7 строками 4 и 8 из подтаблицы б)

Номера объектов	Номера признаков
	...К...
1	1
4	1
5	1
8	0
9	0
Вес единиц по треугольнику	0
Вес нулей по треугольнику	9

Подтаблица б₁

(после замены строк 4 и 8 строками 3 и 7)

Номера объектов	Номера признаков
	...К...
2	1
3	0
6	0
7	1
10	1
Вес единиц по треугольнику	7
Вес нулей по треугольнику	2

3. Полученные с помощью смещенного треугольника Паскаля веса одноименных признаков разных подтаблиц сравниваются между собой и среди них отмечаются лишь такие признаки, у которых во всех вариантах вес нулей постоянно остается или больше веса единиц, или, наоборот, вес нулей

везде остается меньше веса единиц. Признаки — столбцы, у которых во всех подтаблицах вес единиц равен весу нулей, или такие, для которых в одной подтаблице большим является вес нулей, а в другой — большим вес единиц (например, столбцы 2, 5, 6, 7 подтаблиц а и б таблицы 21), из дальнейшего рассмотрения исключаются, как неинформативные.

4. Оставленные отмеченные признаки рассматриваются с точки зрения оценки максимального возможного колебания весов их единиц и нулей. С этой целью для двух столбцов, соответствующих одному и тому же признаку в паре подтаблиц, мысленно или на бумаге производится такая перестановка одноименных строк, при которой столбец одной новой подтаблицы будет содержать максимальное число единиц в верхней половине, а столбец из другой подтаблицы — в нижней (табл. 22).

В рассмотренном в табл. 22 случае показаны подтаблицы основной таблицы, состоящей из четырех классов объектов (1,2; 3,4; 5,6; 7,8; 9,10). Признак К в подтаблицах а и б имеет вес единиц меньший, чем вес нулей, и поэтому после трех стадий селекции сохраняется. Однако выполненная в подтаблицах а₁ и б₁ путем подстановки строк оценка максимального колебания весов показывает, что постоянство преобладания весов нулей над весами единиц в нем не сохраняется. В подтаблице б₁ вес единиц оказывается больше веса нулей. Если при оценке максимальных колебаний веса признака путем перестановки строк обнаруживаются случаи, аналогичные рассмотренному, то подобные признаки также исключаются из дальнейшего исследования. После последней операции таблица объектов-эталонов переписывается таким образом, что в ней сохраняются только информативные признаки (табл. 23). Веса единиц и нулей каждого столбца пересчитываются. Для этого число строк и столбцов в треугольнике увеличивается соответственно с числом объектов-эталонов таблицы. Объектам-эталонам одного класса соответствуют одинаковые строки треугольника, соответственно увеличивается и число одинаковых столбцов.

Селекция признаков, позволяющая среди сотен признаков выделить только информативные, имеет большое значение для дальнейшего процесса обработки информации, резко повышая эффективность этого процесса в силу значительного уменьшения числа исследуемых признаков. Она как бы фокусирует нужную информацию, помогая геологу выбрать из огромного объема всевозможных наблюдений и анализов лишь те данные, которые действительно необходимы для решения поставленной задачи. Так, например, для оценки касситерит-силикатных месторождений Востока СССР из 167 признаков оказались информативными только 17, а касситерит-сульфидных — 11 признаков. Результаты, полученные после селекции, имеют большое геологическое значение и поэтому нуждаются в специальной интерпретации. После селекции признаков следует постараться дать геологическое объяснение установленным в процессе подсчета весов положительным и отрицательным весам признаков. При этом по поводу каждого информативного призна-

нака желательно прежде всего дать ответ, совпадает ли полученный результат с существующими генетическими гипотезами или им противоречит или в рамках этих гипотез воздействие признака на прогнозируемое свойство несобъяснимо. Пример такого обозрения приведен в табл. 24.

Таблица 23

Подсчет весов признаков таблицы объектов-эталонов после ее сокращения

Классы	Номера объектов	Номера информативных признаков				Треугольник Паскаля с количеством одинаковых строк и столбцов, равным числу объектов в каждом классе									
		1	3	4	8										
I	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	3	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
III	5	1	1	1	0	2	2	1	1	0	0	0	0		
	6	1	1	1	0	2	2	1	1	0	0	0	0		
IV	7	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1	0	0		
	8	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1	0	0		
Вес	1	1	4	1	6	Вес единиц по треугольнику Паскаля									
	0	7	2	7	0	Вес нулей по треугольнику Паскаля									

Таким образом, селекция позволяет выявить среди многих признаков лишь информативные, связанные с исследуемым свойством. Однако возможности метода вариационных рядов на этом не исчерпываются. С помощью последующих сравнительно простых операций удастся дать количественную оценку роли каждого информативного признака в решении задачи, т. е. найти разделяющий (информационный) вес признаков, а по суммам этих весов прогнозировать вероятные масштабы исследуемого явления.

Определение разделяющих весов признаков происходит в результате нескольких последовательных операций, главной из которых является поиск тупиковых тесторов.

Графический метод построения тупиковых тесторов

Дальнейшее исследование таблицы эталонных объектов основано на поиске тупиковых тесторов, которые представляют собой как бы минимальные несжимаемые блоки информации, различающие объекты основной таблицы.

Анализ информативных признаков ртутных месторождений
с позиций существующих генетических гипотез
(Тестовый 1971)

Группа признаков	Признаки*	Номера признаков, указывающие на степень увязки с геологическим материалом		
		не противоречащие геологическим данным	требующие изучения	противоречащие геологическим данным
1. Признаки, характерные для крупных месторождений	17—сбросы; 26—структуры экраппирования; 29—согласные линзы; 36—гнезда; 21—зоны межпластовых срывов и расслоения; 27—пересечения благоприятных стратиграфических горизонтов разломом; 84—свинцово-цинковые рудопоявления; 75—дайки диабазов и диабазовых порфиритов; 72—угол падения свыше 70°; 35—одиночные жилы; 9—изоклинальные складки; 18—куполовидные брахискладки; 3—терригенные геосинклинальи; 32—штокверки; 34—жильные зоны; 60—кальцигизация; 74—штоки щелочных сиенит-монзонитов; 80—экструзии среднего состава; 28—пластовые залежи; 92—сурьмяно-полиметаллические рудопоявления; 40—переслаивание глинистых сланцев и кварцитоидных песчаников; 47—кварциты; 7—красные поднятия (на границе с геосинклиналью) платформ и срединных массивов; 64—серпентинизация; 79—тела кварцевых порфиритов; 77—отдельные дайки щелочных базальтоидных пород; 81—сурьмяные рудопоявления; 19—изгибы контактовых поверхностей интрузивных тел; 33—рудные столбы; 73—серпентинизированные ультрабазиты; 5—поздние наложенные субплатформенные впадины; 16—взбросо-надвиги; 43—переслаивание сланцев, известняков и песчаников	26, 29, 36, 21, 27, 9, 18, 32, 34, 60, 28, 40, 47, 19, 33, 73, 16, 43	17, 84, 75, 72, 74, 80, 92, 64, 79, 77, 81, 5, 3, 7	35
2. Признаки, характерные как для крупных, так и для мелких месторождений	49—песчаники с карбонатным цементом; 69—угол падения до 25°; 68—битуминизация; 59—аргиллитизация; 8—линейные складки; 22—трещины отрыва	49, 69, 68, 59, 8, 22		

Группа признаков	Признаки*	Номера признаков, указывающие на степень увязки с геологическим материалом		
		не противоречащие геологическим данным	требующие излучения	противоречащие геологическим данным
3. Признаки, характерные для мелких месторождений	50—углисто-глинистые сланцы; 30—секущие линзы; 82—мышьяковые (реальгар-аурипигментовые) рудопоявления; 48—кварцевые песчаники; 51—алевролиты и аргиллиты; 20—зоны расчленения и трещиноватости; 10—ядра и шарниры антиклиналей; 6—красные разломы на границах зон разновременной складчатости; 70—угол падения от 25 до 50°; 37—минерализованные зоны дробления; 11—крылья антиклиналей; 15—взбросо-сдвиги; 58—окварцевание; 71—угол падения от 50 до 70°; 24—пересечения разноориентированных трещин; 38—минерализованные зоны трещиноватости; 39—переслаивание глинистых сланцев и песчаников	50, 51, 20, 70, 37, 15, 58, 38	30, 82, 6, 71, 24, 39, 11	48, 10

* Номера признаков даны в соответствии со шкалой, приведенной в статье С. В. Яблонского и др. (1971 г.)

Понятие тупиковых тесторов вытекает из понятия о тупиковых тестах, использовавшихся в ранний период развития метода. Под тупиковыми тестами подразумеваются такие наборы столбцов основной таблицы, в которых все строки различны и из которых нельзя удалить ни одного столбца без того, чтобы в наборе не появились одинаковые строки (табл. 25, а). Тупиковые тесты представляют собой минимальные наборы сочетаний признаков, различающих объекты таблицы в том случае, если каждый класс представлен одним объектом.

Отношение числа тупиковых тестов, в которые входит исследуемый признак, к общему числу тупиковых тестов, содержащемуся во всей исходной таблице, называется весом признака по тупиковым тестам.

При исследовании вариационных рядов рассматриваются таблицы, в которых в каждом классе имеется несколько эталонных объектов. В этом случае веса признаков определяются с помощью тупиковых тесторов. Тупиковые тесторы отличаются от тупиковых тестов тем, что в пределах одного класса эталонных объектов строчки одного набора столбцов могут быть одинаковыми, но для разных классов все строчки этого набора

должны различаться (табл. 25, б). Таким образом, набор столбцов, где различными обязательно являются только строчки разных классов и нельзя удалить из этого набора ни одного столбца так, чтобы при этом в разных классах не появились одинаковые строчки, называются тупиковым тестором.

Таблица 25

Примеры тупиковых тестов (а) и тупиковых тестором (б)

а. Таблица эталонных объектов

Номера объектов	Номера признаков				
	1	2	3	4	5
1	1	0	0	1	1
2	1	1	0	1	1
3	1	0	1	1	0
4	1	1	1	0	0
5	0	1	1	0	1
6	0	1	1	1	0

б. Таблица эталонных объектов

Номера классов	Номера объектов	Номера признаков				
		1	2	3	4	5
I	1	0	0	1	0	0
	2	0	0	1	0	0
II	3	1	1	0	1	1
	4	1	1	1	0	1
III	5	1	0	1	0	1
	6	0	1	0	0	1
IV	7	1	1	0	1	0
	8	1	1	0	0	1

Тупиковые тесты таблицы эталонных объектов*

I	II	III
1-2-3-4	1-2-5	2-4-5
1 0 0 1	1 0 1	0 1 1
1 1 0 1	1 1 1	1 1 1
1 0 1 1	1 0 0	0 1 0
1 1 1 0	1 1 0	1 0 0
0 1 1 0	0 1 1	1 0 1
0 1 1 1	0 1 0	1 1 0

Тупиковый тестор таблицы эталонных объектов

Номера классов	Номера объектов	Номера признаков			
		1	2	3	4
I класс	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
II класс	3	1	1	1	1
	4	1	0	0	1
III класс	5	0	1	0	1
	6	0	1	0	1
IV класс	7	1	1	1	0
	8	1	1	0	1

* Римские цифры — номера тестов, арабские — номера столбцов таблицы а. эталонных объектов.

Отношение числа тупиковых тестором, содержащих какой-либо столбец-признак к общему числу тупиковых тестором для всей таблицы, называется весом признака по тупиковым тестором.

Как и при селекции признаков, поиск тупиковых тесторов выполняется в результате нескольких последовательных процедур. Таблица объектов-эталонов, содержащая лишь информа-

Таблица 26

Пример таблицы с одинаковыми и зеркально отраженными столбцами

а. Таблица объектов-эталонов до сокращения

Номера классов	Номера объектов	Номера признаков									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
	2	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
II	3	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
	4	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
III	5	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
	6	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0

Зеркально отраженные признаки: 2—4—7—9; 1—8; 3—10. Одинаковые признаки: 1—5; 3—6.

б. Таблица объектов-эталонов после сокращения

Номера классов	Номера объектов	Номера признаков		
		1—5—8	2—4—7—9	3—6—10
I	1	1	0	1
	2	0	1	1
II	3	1	0	0
	4	1	1	1
III	5	0	1	1
	6	0	0	1

Полужирным шрифтом набраны номера зеркально отраженных признаков.

тивные признаки, просматривается с целью выявления в ней всех столбцов, одинаковых по конфигурации единиц и нулей или так называемых зеркально отраженных (табл. 26, а). Затем эта таблица снова переписывается таким образом, чтобы в ней оставались только различающиеся столбцы. Номера оди-

наковых и зеркально отраженных столбцов выписываются на соответствующими им в новой таблице столбцами. При этом номера зеркально отраженных столбцов отмечаются особо (табл. 26, б). В качестве примера приведем таблицу информа-

Таблица 27

Информативные признаки зональности оловорудных месторождений и их весов, вычисленных по смещенному треугольнику Паскаля.

Номера классов	Номера объектов	Номера признаков по порядку										Смещенный треугольник Паскаля																	
		23	1121. 110. 111. 116. 117	113. 1142	121	122	129	133	144. 150	156	100																		
		Номера признаков по порядку																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																		
I	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
II	3	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III	5	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	7	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	3	3	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	3	3	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		7	1	2	7	1	5	4	0	8	8	Вес единиц по треугольнику																	
		1	0	4	1	7	3	2	3	2	0	Вес нулей по треугольнику																	

Примечания. 1. Номера с буквой «з» обозначают столбцы, имеющие по отношению к столбцу, показанному в таблице, зеркальную конфигурацию единиц и нулей. 2. Расшифровка значений признаков дана в прил. 1-5.

тивных признаков зональности оловорудных месторождений, где объединены столбцы с одинаковым и зеркально отраженным расположением единиц и нулей (табл. 27). Значение признаков приведено в прил. 1-5.

Все строки новой, сокращенной, таблицы сравниваются между собой и для каждой пары строк выписываются номера различающих их столбцов. При этом важно отметить, что сравниваются лишь строки, характеризующие разные классы объектов, строки, относящиеся к одному классу, между собой не сравниваются.

Пример такого сравнения для строк предыдущей сокращенной таблицы информативных признаков зональности оловорудных месторождений дан в табл. 28, в которой для каждой пары строк объектов, принадлежащих к разным классам, выписаны наборы номеров различающих их столбцов.

Наборы номеров различающих столбцов просматриваются и среди них устанавливается минимальный по длине набор

Таблица 28

Наборы признаков, различающих строки таблицы информативных признаков зональности оловорудных месторождений

Строки	Признаки	Ярусы	Строки	Признаки	Ярусы
1—3	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10		2—3	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	
1—4	1, 4, 6, 9		2—4	1, 4, 6, 8, 9	
1—5	3, 4, 6, 10		2—5	3, 4, 6, 8, 10	
1—6	1, 2, 3, 6, 10		2—6	1, 2, 3, 6, 8, 10	
1—7	1, 2, 4, 5, 7, 9, 10		2—7	1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10	
1—8	1, 2, 4, 5, 6, 9, 10		2—8	1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10	
3—5	1, 2, 3, 5, 7, 9		4—5	1, 3, 9, 10	IV
3—6	3, 4, 5, 7, 9		4—6	2, 3, 4, 9, 10	VI
3—7	6	I	4—7	2, 5, 6, 7, 10	
3—8	7	II	4—8	2, 5, 10	III
5—7	1, 2, 3, 5, 6, 7, 9		6—7	3, 4, 5, 6, 7, 9	
5—8	1, 2, 3, 5, 9	VII	6—8	3, 4, 5, 9	V

Примечание. Полу жирным шрифтом набраны вычеркиваемые наборы, в которые в качестве составляющих входят более короткие наборы с номерами, показанными римскими цифрами в графе «ярус».

(обычно содержащий один, два или три номера). После этого вычерчиваются все другие более длинные наборы, содержащие минимальный набор в качестве составляющих. Затем выбирается следующий по длине набор, отмечается и повторяется вычерчивание всех других, включающих его более длинных наборов. Операция сокращения наборов продолжается до тех пор, пока не останутся лишь наборы, не содержащие друг друга в качестве составных элементов (см. табл. 28, 29).

Все оставшиеся после сокращения наборы различающих столбцов выписываются в виде таблицы, где они располагаются в определенном порядке в соответствии с количеством номеров в наборе, т. е. с увеличением их длины. В тех случаях, если есть наборы одинаковой длины, то порядок их расположения в таблице является произвольным.

Дальнейший поиск тупиковых тесторов осуществляется путем построения плоского графа, называемого «деревом».

Метод селекции признаков с помощью смещенного треугольника Паскаля и поиска тупиковых тестов и тесторов путем построения графов, значительно повышающий эффективность исследований, был разработан С. В. Сиротинской (1975). Этот простой и наглядный способ позволил полностью исключить требующие больших затрат машинного времени переборные операции, с помощью которых до сих пор производился подсчет тупиковых тестов и тесторов на ЭВМ.

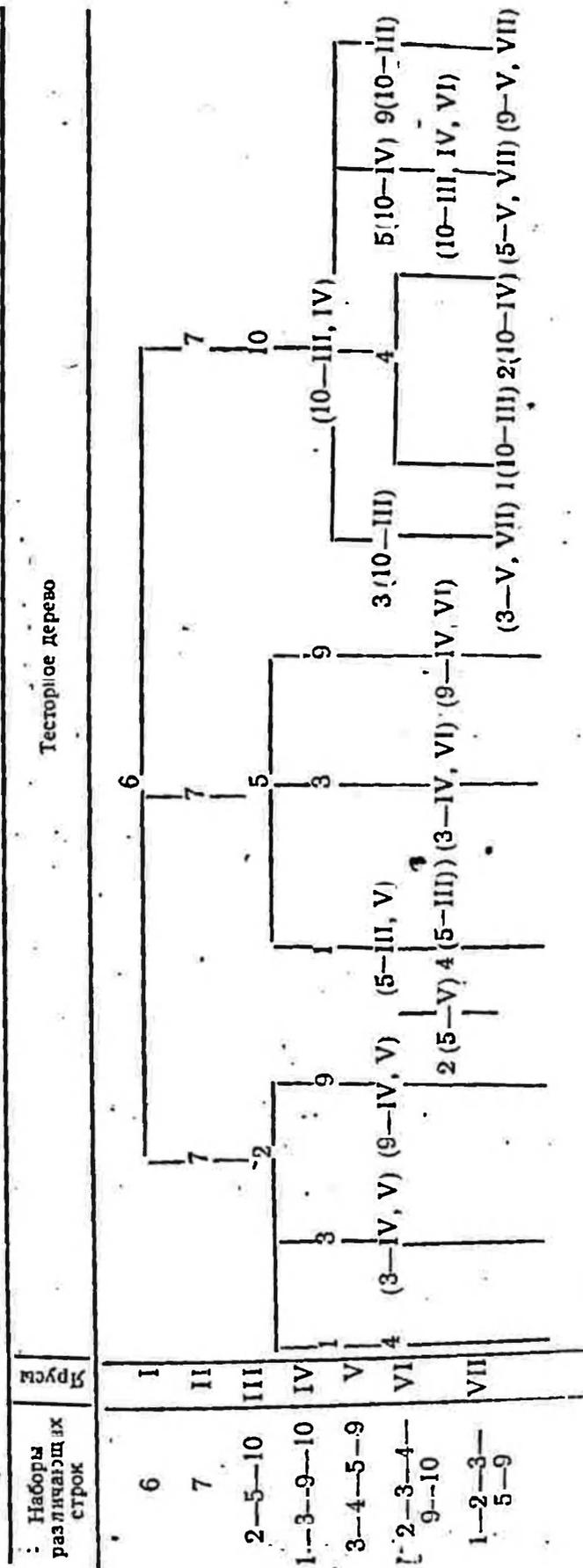
Более того, путь поиска тупиковых тестов и тесторов с помощью графов, предложенный С. В. Сиротинской, позволил решать без применения ЭВМ многие такие задачи, которые раньше требовали длительных вычислительных операций. Такой граф состоит из точек-вершин и соединяющих их прямолинейных отрезков-ветвей. Для каждой пары вершин здесь существует единственная соединяющая их цепь отрезков-ветвей. Первоначально выбранная вершина, от которой затем отходят все ветви, называется корнем дерева. Каждая ветвь такого графа имеет последнюю, конечную, ветвь с конечной вершиной. Вершины деревьев, находящиеся на одинаковом удалении от корня, образуют единый ярус. Установленный после операции сокращения минимальный по длине набор различающихся столбцов выбирается в качестве основания графа тесторного дерева (табл. 29). Если наиболее короткий набор представлен одним столбцом, то номер этого столбца принимается за корень дерева. Если различающихся столбцов в минимальном наборе несколько, то каждая из них образует корень самостоятельного графа-дерева. Можно их рассматривать и как вершины, растущие из единого минимого корня.

При наличии нескольких корней дальнейшее построение ведется для каждого корня отдельно, независимо друг от друга. Если же имеется несколько одинаковых по длине минимальных наборов, то в качестве первого произвольно выбирается любой из них. Таким образом строится первый ярус тесторного дерева.

Дальше построение дерева ведется так, что к каждой вершине предыдущего яруса присоединяются номера различающихся столбцов следующего по длине набора, которые образуют вершины нового яруса. Однако такое присоединение возможно лишь при соблюдении определенных правил.

Среди номеров столбцов у следующего по длине набора необходимо различать встретившиеся впервые, повторившиеся и эквивалентные. Вершины, встретившиеся впервые, присоединяются новыми ветвями к предыдущей вершине без каких-либо ограничений. Повторившимися вершинами называются такие, номера столбцов которых уже встречались ранее в этой же ветви дерева.

Тесторное дерево для информативных признаков зональности оловорудных месторождений



Тупиковые тесторы: 4-1-2-7-6; 3-2-7-6; 9-2-7-6; 2-1-5-7-6; 4-1-5-7-6; 3-5-7-6; 9-5-7-6; 3-10-7-6; 1-4-10-7-6; 2-4-10-7-6; 5-10-7-6; 9-10-7-6.

ской цифрой номер ее яруса. Примерами таких вершин в таблице являются вершина 2 ветвей 5—2—1 и 6—2—1 и вершина 4 ветви 4—3—1. Если подобная вершина повторяется и в следующих наборах, то каждый раз в соответствующем ярусе в скобках записывается арабской цифрой ее номер, а римскими цифрами — номера всех ярусов, в которых она уже встречалась, и номер очередного рассматриваемого яруса. Однако при подсчете тесторов, которые, как будет показано ниже, образуются ветвями тесторного дерева, вершина типа Q не учитывается.

Вершинами типа S называются также повторившиеся вершины, которые, как и вершина типа Q, уже встречались в предыдущих ярусах рассматриваемой ветви, но в отличие от вершины типа Q в новом присоединяемом наборе таких повторившихся вершин не одна, а несколько. Такие вершины не присоединяются, а ветвь от предыдущей вершины проводится через соответствующий новый ярус дерева без перерыва. Вершинами типа S будут вершины 2 и 4 в четвертом ярусе для ветви 4—2—1 тесторного дерева, изображенного на табл. 30.

Если в очередном присоединяемом к данной ветви наборе нет повторившихся вершин, то все номера нового набора проверяются на эквивалентность, т. е. выясняется, не являются ли они эквивалентными вершинами.

Эквивалентными вершинами называются такие, которые соответствуют номерам в новом наборе, уже входившим в какие-либо ранее присоединявшиеся наборы. К эквивалентным вершинам относятся, например, номера 2 и 4 набора 2—4—7 в четвертом ярусе табл. 30, при присоединении этого набора к ветвям 5—3—1 и 6—3—1. Эквивалентными они являются потому, что вершина 4 встречается в третьем ярусе в наборе 4—5—6, а вершина 2 встречается в наборе второго яруса вместе с вершиной 3.

Вершины нового набора, которые после проверки оказываются эквивалентными ранее зафиксированным вершинам рассматриваемой ветви, не записываются, а записываются в качестве новых вершин — остальные, т. е. вершины, соответствующие впервые встретившимся номерам нового набора. Однако из этого правила есть одно важное исключение, о котором речь пойдет ниже.

Чтобы решить, может ли быть присоединена в качестве новой вершина, имеющая номер, уже встречавшийся в предыдущих наборах, т. е. эквивалентная вершина, необходимо проверить, входит ли она в такие предыдущие наборы, у которых хотя бы один номер образует вершины наращиваемой ветви дерева. Если такая связь для эквивалентной вершины устанавливается, то ее присоединять нельзя.

Если же эквивалентности с имеющимися в данной ветви вершинами для исследуемого номера нового набора не уста-

навливается, то проверяется, не образует ли он после присоединения вершину, эквивалентную наборам, содержащим в рассматриваемой ветви повторившуюся вершину типа Q .

Если такие вершины в этой ветви есть, то проверяется, во всех ли наборах, содержащих вершины типа Q , данная эквивалентная вершина присутствует. Если она присутствует во всех этих наборах, то ее присоединять также нельзя. Присоединить ее можно лишь в том случае, когда среди прочих есть наборы с повторившимися вершинами типа Q , в которых эта эквивалентная вершина отсутствует. Тогда эта вершина присоединяется отрезком ветви к соответствующей вершине предыдущего яруса, а рядом с ней в новом ярусе в скобках записываются арабскими цифрами номера вершин типа Q , расположенных в данной ветви, и римскими цифрами — номера ярусов, в которых присоединяемая эквивалентная вершина отсутствует.

В качестве примеров можно привести вершины 2 и 4 ветвей 2—1—5—7—6 и 4—1—5—7—6 тесторного дерева, изображенного в табл. 29.

Следовательно, чтобы решить, можно ли присоединять эквивалентную вершину после того, как выяснено, что обычным вершинам данной ветви она не эквивалентна, нужно проверить, есть ли в данной ветви расположенные в предыдущих ярусах вершины типа Q . Если такие вершины есть, то проверяется, в каких наборах из ярусов, отмеченных рядом с вершинами типа Q римскими цифрами, эквивалентная вершина отсутствует. Если она присутствует во всех этих наборах, то ее присоединять также нельзя. Присоединять эквивалентную вершину можно лишь тогда, когда среди наборов с вершинами типа Q есть наборы, не содержащие присоединяемую эквивалентную вершину. В таком случае номер эквивалентной вершины записывается в новом ярусе и соединяется отрезком ветви с соответствующей вершиной предыдущего яруса. Рядом с номером этой эквивалентной вершины ставятся скобки, в которых арабскими цифрами записывается номер вершины типа Q , а рядом с ней римскими цифрами — номера ярусов, где эти вершины не содержат присоединенной эквивалентной вершины.

Более сложным случаем является наличие в рассматриваемой ветви нескольких различных по номерам повторившихся вершин типа Q . Тогда поиск наборов, в которых номер присоединяемой эквивалентной вершины отсутствует, производится для каждой из вершин типа Q .

В этом случае присоединение эквивалентной вершины возможно лишь тогда, когда в рассматриваемой ветви каждой из различных повторившихся вершин типа Q соответствует хотя бы один набор, не содержащий номер эквивалентной вершины. Если же хотя бы для одной из повторившихся вершин таково-

го набора нет, то рассматриваемую эквивалентную вершину присоединять нельзя.

Кроме того, необходимо учитывать наличие в предыдущих ярусах других эквивалентных вершин. Если такие вершины есть, то на эквивалентность по отношению к новой вершине проверяются лишь те наборы, которые соответствуют ярусам, содержащим вершины типа Q, свободные от последней из предшествующих эквивалентных вершин, т. е. ярусам, обозначенным около этой вершины в скобках римскими цифрами. Лишь тогда, когда в наборах этих обозначенных римскими цифрами ярусов новая эквивалентная вершина отсутствует, она может быть записана и присоединена к вершине предыдущего яруса.

Наконец, возможен случай, когда в новом наборе все вершины оказываются эквивалентными предыдущим и ни одну из них нельзя присоединить к предыдущей вершине в силу тех или иных из перечисленных ограничений. Тогда ни одна из вершин нового набора не записывается, а наоборот, вся ветвь, по отношению к которой рассматривался новый набор, уничтожается до ближайшей развилки дерева, как это показано в табл. 31.

Таблица 31

Уничтожение ветви на тесторном дереве при наличии только эквивалентных вершин



Тупиковые тесторы: 5—2—1; 4—3—1; 5—3—1.

Все сказанное можно сформулировать в виде следующих основных принципов построения, применяемых по отношению к каждой отдельной ветви тесторного дерева.

1. Проверяется, есть ли в присоединяемом наборе номера, уже встречавшиеся в виде вершин в предыдущих ярусах ветви. Если есть один совпавший номер (вершина типа Q), то он за-

писывается в скобках в соответствующем новом ярусе арабской цифрой, а рядом римскими цифрами обозначаются номера ярусов, в которых эта вершина присутствует. Если в присоединяемом наборе есть две или более вершины, присутствующие в уже построенных ярусах (повторившиеся вершины типа S), то новый набор не записывается. В этом случае от предыдущей вершины через ярус, отвечающий новому набору до следующего яруса, проводится сплошная черта — отрезок ветви тесторного дерева.

Таким образом, если в новом наборе есть повторившиеся вершины, то весь набор не записывается. В скобках записываются вершины типа Q , что необходимо для дальнейшего построения тесторного дерева. При подсчете тесторов эти записанные в скобках вершины не учитываются.

2. Если повторившихся вершин в новом наборе нет, то рассматривают отдельно каждую составляющую этого набора. Прежде всего нужно проверить ее на эквивалентность с предшествующими вершинами ветви, т. е. выяснить, не входит ли эта составляющая в единый набор хотя бы с одной из этих вершин. Если она в такой набор входит, то ее присоединять нельзя.

Если проверяемая составляющая нового набора не входит в единые наборы с другими вершинами ветви, то проверяют, входит ли она в единые наборы с записанными в скобках вершинами типа Q , расположенными в данной ветви. Если она входит во все наборы хотя бы одной из разных вершин типа Q , то ее записывать нельзя. Когда для каждой из расположенных в данной ветви различных по номерам вершин типа Q есть наборы, где эта составляющая отсутствует, то она присоединяется, а рядом с ней в скобках записываются номера вершин типа Q и яруса, свободные от присоединяемой эквивалентной вершины.

В последующих наборах новые присоединяемые вершины проверяются на эквивалентность лишь по отношению к наборам ярусов, содержащих вершины типа Q , которые отмечены в скобках у последней по порядку эквивалентной вершины. Если новая вершина присутствует во всех наборах ярусов, отмеченных в этих скобках, то ее присоединять нельзя. Она присоединяется только, если для каждой из отмеченной в этой скобке вершины типа Q есть свободные от нее наборы.

В том случае, если все составляющие нового набора эквивалентны предыдущим и присоединить их по тем или иным перечисленным причинам нельзя, то ветвь, к которой должны были бы быть присоединены новые вершины, уничтожается вплоть до того места, где она ответвляется от вершины, дающей другие развивающиеся ветви.

3. Если составляющая нового набора не встречалась ранее в данной ветви и не входила в предшествующие наборы, то она

связывается отрезком с предыдущей вершиной без каких-либо ограничений.

После того как тесторное дерево построено, выписываются наборы вершин, принадлежащие каждой его ветви. Эти наборы удобнее выписывать по направлению от конца ветви к корню дерева. Полученные таким образом наборы и являются возможными тупиковыми тесторами исследуемой сокращенной исходной таблицы.

После того как составлен список тупиковых тесторов, необходимо проверить, нет ли среди них одинаковых наборов. Если таковые имеются, то это значит, что в построении одной из ветвей дерева допущена ошибка, которую необходимо обнаружить.

Для того чтобы убедиться в правильности решения, полезно бывает построить тесторное дерево два раза, поменяв местами равные по длине наборы различающих столбцов. Окончательный список тупиковых тесторов должен при этом остаться одинаковым.

В табл. 29 показан пример построения тесторного дерева для сокращенной таблицы геологических признаков, с помощью которых предполагалось определить контрастность проявления зональности оруденения на различных оловорудных месторождениях. Примеры построения тесторных деревьев по заданным наборам различающих признаков приведены также в таблицах 30, 31 и в прил. III.

Для того чтобы научиться охарактеризованному методу построения тесторных деревьев, желательно самостоятельно составить их, используя приведенные в этих примерах наборы, а затем сравнить получившиеся результаты с имеющимися.

Определение разделяющих весов признаков

Полученные путем построения тесторного дерева тупиковые тесторы относятся к сокращенной исходной таблице, в которой были объединены одинаковые и зеркально отраженные столбцы. Для того чтобы подсчитать количество тупиковых тесторов для всей таблицы и определить вес признаков по тупиковым тесторам, а затем и их разделяющий (информационный) вес, необходимо бывает проделать следующие операции.

После того как с помощью тесторного дерева найдены тупиковые тесторы (см. табл. 29), составляется следующая таблица (табл. 32). В первом столбце этой таблицы выписываются тупиковые тесторы. При большом их числе они группируются по длине, т. е. по количеству составляющих их номеров столбцов. Затем над теми номерами столбцов, для которых имеются одинаковые или зеркально отраженные аналоги, из основной таблицы выписывается число этих аналогов.

В следующий столбец табл. 32 выписываются результаты перемножения числа аналогов, записанных над тесторами. Эти произведения суммируются между собой и с числом тесторов, в составе которых аналогичные столбцы отсутствуют (единич.

Таблица 32

Подсчет весов признаков по тесторам

Тупиковые тесторы по тесторному дереву таблицы	Число тупиковых тесторов полной таблицы	Номера признаков (в скобках номера по исходной шкале)	Число тесторов, содержащих признак	Вес признака по тесторам
5-10-7-6	1	1(23)	$1+1+5+5=12$	$12:39=0,307$
9-10-7-6	1	2(110, 111, 117, 116, 112з)	$1+1+1+2+1=6$	$6:39=0,154$
5				
2-4-10-7-6	5	3(113, 114з)	$1+1+5=7$	$7:39=0,179$
1-4-10-7-6	1	4(121)	$5+1+1+5=12$	$12:39=0,307$
2				
3-10-7-6	2	5(122)	$1+1+1+2+5=10$	$10:39=0,256$
9-5-7-6	1	6(123)	$1+1+5+1+2+$ $+1+1+2+5+$ $5+10+5=39$	$39:39=1,000$
4-1-5-7-6	1	7(133)	$1+1+5+1+2+$ $+1+1+2+5+$ $+5+10+5=39$	$39:39=1,000$
2				
3-5-7-6	2	8(144, 150)	0	0
5				
2-1-5-7-6	5	9(159)	$1+1+5=7$	$7:39=0,179$
5				
9-2-7-6	5	10(100)	$1+1+5+1+2=10$	$10:39=0,256$
2 5				
3-2-7-6	$2 \times 5 = 10$			
5				
4-1-2-7-6	5			
Всего тесторов	39			

ные тесторы). Полученная сумма (S_n) и будет являться числом тупиковых тесторов для всей таблицы информативных признаков.

Затем выясняется число тупиковых тесторов, в который входит каждый информативный признак (S_i). С этой целью подсчитывается, во-первых, в какое число единичных тесторов входит данный признак; во-вторых, рассматриваются содержащие данный признак тупиковые тесторы со столбцами-аналогами и подсчитывается их количество до умножения. Результаты первого и второго подсчетов суммируются. Найденная сумма равна количеству тупиковых тесторов, содержащих данный признак.

Таблица 33

Подсчет разделяющих (информационных) весов признаков зональности оловорудных месторождений

	Веса отдельных признаков	Номера признаков по шкале						
		23	110	111	117	116	112	113
Вес по смещенному треугольнику Паскаля	1 0	7 1	1 9	1 9	1 9	1 9	9 1	2 4
То же, в %	1 0	87,5 12,5	10,0 90,0	10,0 90,0	10,0 90,0	10,0 90,0	90,0 10,0	33,5 66,5
Вес разницы, %	1 0	75,0 0,0	0,0 80,0	0,0 80,0	0,0 80,0	0,0 80,0	80,0 0,0	0,0 33,0
Вес по тупиковым тесторам		0,307	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	0,179
Разделяющий вес признаков	1 0	0,230 0	0 0,123	0 0,123	0 0,123	0 0,123	0,123 0	0 0,059

	Номера признаков по шкале								
	114	121	122	129	133	144	158	150	100
Вес по смещенному треугольнику Паскаля	4 2	7 1	1 7	5 3	4 2	0 3	8 2	0 3	8 0
То же, в %	66,5 33,5	87,5 12,5	12,5 87,5	62,5 37,5	66,5 33,5	0 100	80,0 20,0	0 100	100 0
Вес разницы, %	33,0 0,0	75,0 0,0	0,0 75,0	25,0 0,0	33,0 0,0	0 100	60,0 0,0	0 100	100 0
Вес по тупиковым тесторам	0,179	0,307	0,256	1,000	1,000	0,0	0,179	0,0	0,256
Разделяющий вес признаков	0,059 0	0,230 0	0 0,192	0,250 0	0,330 0	0 0	0,107 0	0 0	0,256 0

Подсчет весов признаков по тупиковым тесторам заключается в делении количества тупиковых тесторов, содержащих признак (i), на общее количество тупиковых тесторов (S_i) всей таблицы информативных признаков. Естественно, что при

Таблица 34

Проверка результатов решения задачи прогнозирования зональности оловорудных месторождений

Номера ячеек	Номера признаков	Номера признаков															Сумма разделяющих весов по строкам	
		23	110	111	117	116	112	113	114	121	122	129	133	144	158	150		100
I	1		1	1	1	1		1			1							0
	2		1	1	1	1		1			1			1		1		0
II	3	1					1	1		1		1	1				1	2210
	4	1	1	1	1	1		1		1	1	1		1			1	817
III	5		1	1	1	1				1	1	1					1	854
	6	1					1			1	1	1					1	1469
IV	7	1					1	1		1		1			1		1	1960
	8	1					1	1		1		1		1		1	1	1880
Разделяющий вес признаков по 1 и 0	1	230	0	0	0	0	123	0	59	230	0	250	330	0	107	0	256	
	0	0	123	123	123	123	0	59	0	0	192	0	0	0	0	0	0	

Примечание. Расшифровка значений признаков дана в прил. II-5.1

этом веса столбцов, имеющих одинаковую и зеркально отраженную конфигурацию единиц и нулей, оказываются равными.

Последней операцией цикла является подсчет разделяющих (информационных) весов признаков. Она заключается в следующем. Для каждого столбца таблицы, построенной после селекции признаков, были определены две характеристики: веса признаков по смещенному треугольнику Паскаля и веса тех же самых признаков по тупиковым тесторам. Для получения разделяющих весов признаков сначала веса, полученные по треугольнику Паскаля, выражаются в виде процентов (табл. 33). Затем в каждом столбце получается разность этих весов для единиц и нулей. Веса, вычисленные с помощью тупиковых тесторов, умножаются на эту разность и полученные величины принимаются в качестве разделяющих весов или, как его еще называют, информационных весов признаков.

После того как получены разделяющие веса признаков, находят суммы этих весов для каждой строки таблицы объектов-

эталонов (табл. 34). При хорошем решении, зависящем от качества предложенной шкалы признаков и удачного выбора эталонов, суммы разделяющих весов признаков в строках табли-

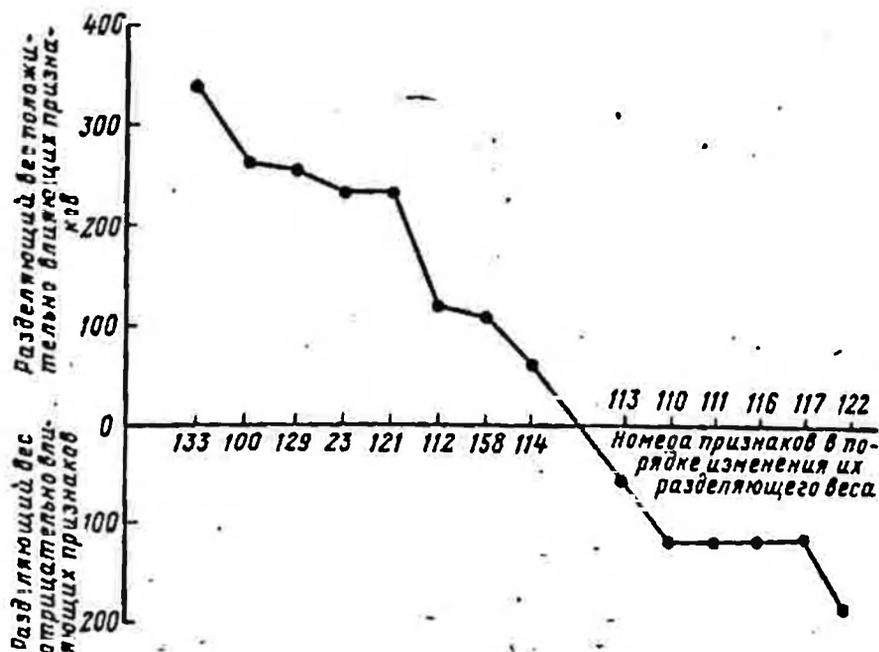


Рис. 3. Разделяющие веса информативных признаков зональности оловорудных месторождений. 1 класс — объекты 7, 8, 10; 2 класс — объекты 1, 2, 3; между 1 и 2 классами — объект 4; 3 класс — объекты 5, 6, 9. Расшифровку значений признаков см. в прил. 1-5

цы должны образовывать такой же вариационный ряд, как и исследуемое прогнозируемое свойство геологических объектов: После этого проверка выполняется путем получения сумм разделяющих весов признаков для контрольных объектов. Если для подавляющего большинства из них (85—95%) эта сумма окажется соответствующей положению действительно занимаемому контрольным объектом в общем вариационном ряду, то задачу можно считать решенной успешно.

После этого можно приступать к прогнозам — подсчитать суммы весов разделяющих признаков для мало изученных объектов и на этой основе дать оценку прогнозируемому свойству.

В рассмотренном выше примере (распознавание зональных и слабо зональных оловорудных месторождений), видимо, не вполне удачно была задана шкала геологических признаков, т. е. в ней оказались недостаточно отраженными факторы, влияющие на зональность. Это привело к ошибочному определению класса одного из эталонных месторождений (объект 3). Ошибочное решение по эталонам составляет в данном случае 12,5%. Дополнительная проверка на контрольных объектах также подтвердила возможность ошибочных определений конт-

растности проявления зональности по принятой шкале признаков. Таким образом, для оценки возможного поведения оловянного оруденения на глубину полученные разделяющие веса признаков могут использоваться лишь весьма условно.

Оформление результатов

Обычно результаты логико-информационной обработки данных отображаются в виде графиков.

На первом графике (рис. 3) отражаются изменения весов информативных признаков. С помощью такого графика можно легко сопоставить влияние различных признаков, а также

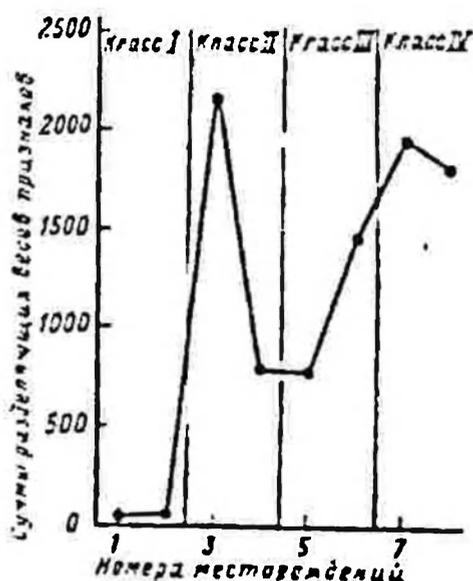


Рис. 4. Расположение оловянных месторождений по суммам разделяющих весов информативных признаков и по классам месторождений, являвшихся эталонами зональности

сравнить, в какой мере принятая шкала охватила положительно и отрицательно влияющие признаки. Как будет показано ниже, такой график очень полезен и для содержательной геологической интерпретации результатов.

На втором графике (рис. 4) откладываются по оси ординат суммы разделяющих весов признаков для объектов-эталон. Этот график позволяет судить о точности результатов решения и выполняемых на их основе прогнозов. Положение на этом графике сумм весов признаков для оцениваемых объектов позволяет судить о масштабах их прогнозируемого свойства.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Правильная интерпретация результатов математической обработки металлогенической информации дает многие дополнительные возможности не только для прогноза рудоносности.

Количественная характеристика роли различных металлогенических факторов и определение силы их связи открывают широкие пути для создания новых эмпирических обобщений, проверки существующих и обоснованию новых металлогенических гипотез.

Опыт показал, что содержательная геологическая интерпретация результатов только логико-информационного решения прогнозных металлогенических задач возможна несколькими способами.

Первый способ — это сопоставление геологических факторов, влияющих на образование крупных рудных месторождений одной рудной формации, но расположенных или в разных регионах, или на различных по масштабам территориях, из которых одна включает другую, при условии сохранения единой шкалы признаков и методов решения.

Результаты, получаемые в этих случаях, можно продемонстрировать на примере сопоставления информативных признаков оловорудных месторождений, с одной стороны, касситерит-сульфидной формации Востока СССР, а с другой, — всего Тихоокеанского рудного пояса (рис. 5). Общей особенностью крупных касситерит-сульфидных месторождений рассматриваемого района и всего Тихоокеанского рудного пояса оказывается приуроченность оруденения к терригенным геосинклиналям, а в их пределах — к синклиориям, глубинным разломам и участкам пересечения последних. Вмещающие породы, чаще всего толщи переслаивающихся песчаников и углисто-глинистых сланцев, смяты в линейные складки, рудные тела имеют углы падения свыше 75° , приурочены к шарнирам и ядрам антиклиналей и локализованы в трещинах двухсистемного свола. Они могут быть представлены как жильными зонами, образовавшимися путем выполнения открытых трещин, так и зонами дробления и минерализации. В пределах рудных полей широко распространены кислые и основные дайки массивов грано-

диоритов и кварцевых диоритов, находящиеся от рудных тел на расстоянии до 3 км, и наблюдается также ассоциация оруднения с кислыми субвулканическими телами. Типичными окорудными изменениями являются серицитизация и турмалинизация.

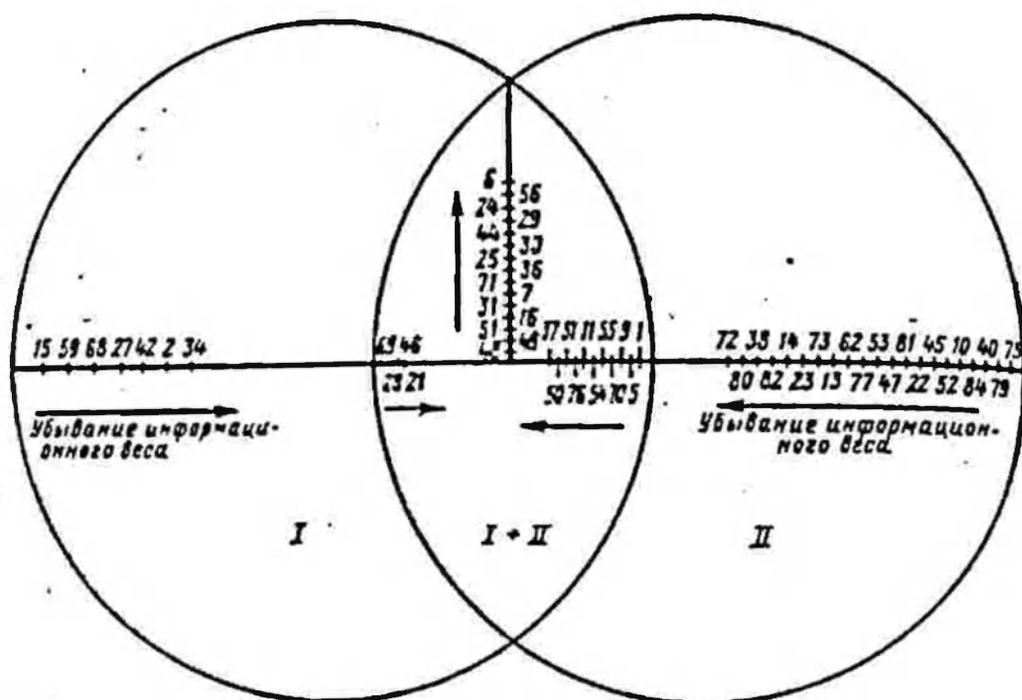


Рис. 5. Геологические факторы, влияющие на появление крупных касситерит-сульфидных месторождений в Тихоокеанском поясе (I) и на Востоке СССР (II).
Расшифровку значений признаков см. в прил. 1-1

зация. На периферии рудных полей возможны проявления свинцово-цинковой и ртутной минерализации. Обычным является зональное распределение рудной минерализации в пределах рудных полей и отдельных рудных тел.

По существу анализ информативных признаков позволяет создать геолого-информационную модель промышленного типа крупного оловянного месторождения касситерит-сульфидной формации, общую и для рассматриваемого района, и для всего Тихоокеанского пояса. Такая модель будет иной, если ее составить только для Тихоокеанского пояса. В этом случае среди типичных признаков окажутся, помимо перечисленных, положение рудных тел в средних массивах и поднятиях внутри антиклинорий, наличие под рудными телами массивов гранитоидов, а в составе вмещающих толщ-прослоев песчаников и граувакк. локализация рудных тел в трещинах односистемного скота и субпараллельных нарушениях неизвестного генезиса, появление грейзенов среди измененных вмещающих пород.

В рассматриваемом районе, в отличие от прочих крупных касситерит-сульфидных месторождений Тихоокеанского пояса,

отмечаются приуроченность рудных тел к флексуобразным перегибам складок и крыльям синклиналей, наличие под рудными телами гранодиоритов и кварцевых диоритов, ассоциация с основными и средними субвулканическими телами, полями лавобрекчий и эффузивов порфиритов и андезитов, внутрирудные дайки порфиритов. Рудные тела могут здесь иметь форму как отдельных жил, так и штокверков, сопровождаться биотитизацией и карбонатизацией, а также рядом других особенностей, отличающих их от наиболее общей геолого-информационной модели.

Сопоставление информативных признаков в таких случаях показывает, что факторы, важные для крупных месторождений одной формации, представленной обобщенной геолого-информационной моделью, могут существенно изменяться в конкретных рудных районах. Наблюдается целая группа местных «провинциальных» факторов, существенно влияющих на появление крупных месторождений, а тем самым и на точность прогнозной оценки, получаемой на основе логико-информационной обработки. Вместе с тем часть признаков сохраняет свое значение (попавшие в область совпадения информативных признаков крупных месторождений из разных регионов) вне зависимости от геологических особенностей исследуемой территории. По-видимому, признаки, сохраняющиеся в разных металлогенических провинциях, могут рассматриваться как главные устойчивые геологические факторы — критерии образования крупных месторождений в рамках данной рудной формации.

Интерпретация результатов логико-информационного анализа с целью выявления постоянных факторов, влияющих на появление крупных месторождений, открывает новые возможности для определения геологических критериев промышленных типов месторождений в рамках отдельных рудных формаций, т. е. позволяет продолжать на новой основе направление, развивавшееся в свое время В. М. Крейтером.

Для группы металлогенических объектов, охарактеризованных в одной шкале признаков, но распространенных на разных территориях, связь между различными факторами рудообразования может быть определена с помощью коэффициента корреляции рангов Спирмена:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d^2}{n^3 - n},$$

где d — разность между рангами, количество которых равно количеству пар сравниваемых признаков; n — количество сравниваемых признаков. Коэффициент корреляции рангов изменяется от $+1$ до -1 . Если все значения d равны нулю, то $\rho = +1$; если же ранги таковы, что признаки 1-й, 2-й, ... n -й по одной совокупности соответствуют признакам n -й, $(n-1)$ -й, ..., 1-й по другой совокупности, то $\rho = -1$. Если несколько при-

Таблица 35

Определение связи между информативными признаками касситерит-сульфидных месторождений Тихоокеанского пояса и Востока СССР с помощью коэффициента корреляции рангов Спирмена

№ п/п	Номера информативных признаков	Вес признаков Тихоокеанского пояса	Вес признаков Востока СССР	Ранг признаков Тихоокеанского пояса	Ранг признаков Востока СССР	d	d ²
1	1	163	439	32,0	52	20,0	400
2	2	163	125	32,0	9	23	529
3	5	163	439	32,0	52	-20,0	400
4	6	128	154	19	11,5	7,5	56,2
5	7	194	215	40	29,5	10,5	110
6	9	172	439	38	52	-14	196
7	10	0	305	9,0	41,5	-32,5	1056
8	11	156	371	27	47	-20	400
9	13	0	211	9,0	25,5	-16,5	272
10	14	0	162	9,0	18	-9	81
11	15	310	0	51	4	47	2209
12	16	207	211	42	25,5	16,5	272
13	21	265	168	49	20	29	841
14	22	0	220	9,0	36,5	-27,5	756
15	23	0	193	9,0	22	-13,0	169
16	24	147	125	23,5	9	14,5	210
17	25	163	211	32,5	25,5	6,5	42
18	27	172	0	38	4	34	1156
19	28	352	159	52	14	38	1444
20	29	415	371	54	47	7	49
21	30	157	177	28	16,5	11,5	132
22	31	196	220	41	36,5	4,5	20
23	81	0	220	9,0	36,5	-27,5	756
24	34	147	0	23,5	4	19,5	380
25	36	170	154	35	11,5	24	576
26	37	130	220	20	36,5	-16,5	272
27	38	0	169	9,0	15	-6,0	36
28	40	0	371	9,0	47	-38	1444
29	42	172	0	38	4	34	1156
30	44	154	189	25	20	5	25
31	45	0	215	9,0	29,5	-20,5	420
32	46	415	340	54	44	10	100
33	47	0	220	9,0	36,5	-27,5	756
34	48	266	215	50	29,5	20,5	420
35	49	211	220	46	36,5	9,5	90
36	50	155	215	26	29,5	-3,5	12
37	51	210	340	45	44	1	1
38	52	0	305	9,0	41,5	-32,5	1056
39	53	0	220	9,0	36,5	-27,5	756
40	84	0	340	9,0	44	-35	1225
41	54	209	439	44	52	-8	64
42	55	208	439	43	52	-9	81
43	56	139	188	22	20	2	4
44	82	0	177	9,0	16,5	-7,5	56
45	59	237	0	48	4	44	1936
46	60	163	0	32	4	28,0	784

№ п/п	Номера информативных признаков	Вес признаков Тихоокеанского пояса	Вес признаков Востока СССР	Ранг признаков Тихоокеанского пояса	Ранг признаков Востока СССР	d	d^2
47	62	160	218	29	32	-3	9
48	68	228	0	47	4	43	1849
49	69	415	211	54	25,5	28,5	812
50	70	19,3	439	18	52	-34	1156
51	71	170	125	35,5	9	26,5	702
52	73	0	196	9,0	23	-14,0	196
53	75	0	439	9,0	52	-43	1849
54	76	134	155	21	13	8,0	64
55	77	0	220	9,0	36,5	-27,5	756

30599,6

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n^3 - n} = 1 - \frac{6 \cdot 30599}{166375 - 55} = 1 - \frac{183594}{166320} = 1 - 1,10 = -0,1$$

наков одной из сравниваемых совокупностей имеют одинаковый вес, то их ранг принимается равным среднему из соответствующих номеров.

На основании работы Р. М. Константинова (1973) была выполнена оценка связи между факторами, влияющими на образование крупных касситерит-сульфидных месторождений Востока СССР и Тихоокеанского рудного пояса (табл. 35). Расчеты показали, что связь весьма незначительная ($\rho = -0,1$), что вытекает и из наблюдаемых различий в весах признаков.

В табл. 35 приведены разделяющие веса, характеризующие влияние одних и тех же геологических признаков на масштабы касситерит-сульфидных месторождений, расположенных во всем Тихоокеанском поясе, и отдельно — для восточных районов СССР. Для определения связи между признаками, влияющими на масштабы месторождений в первом и втором случаях, определяем ранг каждого признака отдельно для Тихоокеанского пояса и для восточных районов СССР. С этой целью выписываем веса признаков Тихоокеанского пояса в порядке их возрастания, указывая в скобках количество признаков, имеющих одинаковый вес. Соответственно получим следующий ряд чисел: 0(17); 19,3; 128; 130; 134; 139; 147(2); 154; 155; 156; 157; 160; 163(5); 170(2); 172(3); 194; 196; 207; 208; 209; 210; 211; 228; 237; 265; 266; 310; 352; 415(3). Затем каждому признаку присваивается ранг, равный порядковому номеру признака в приведенном выше ряду. Поскольку всего имеется 55 признаков (n), информативных для масштабов обеих групп касситерит-сульфидных месторождений, ранги будут меняться от 1

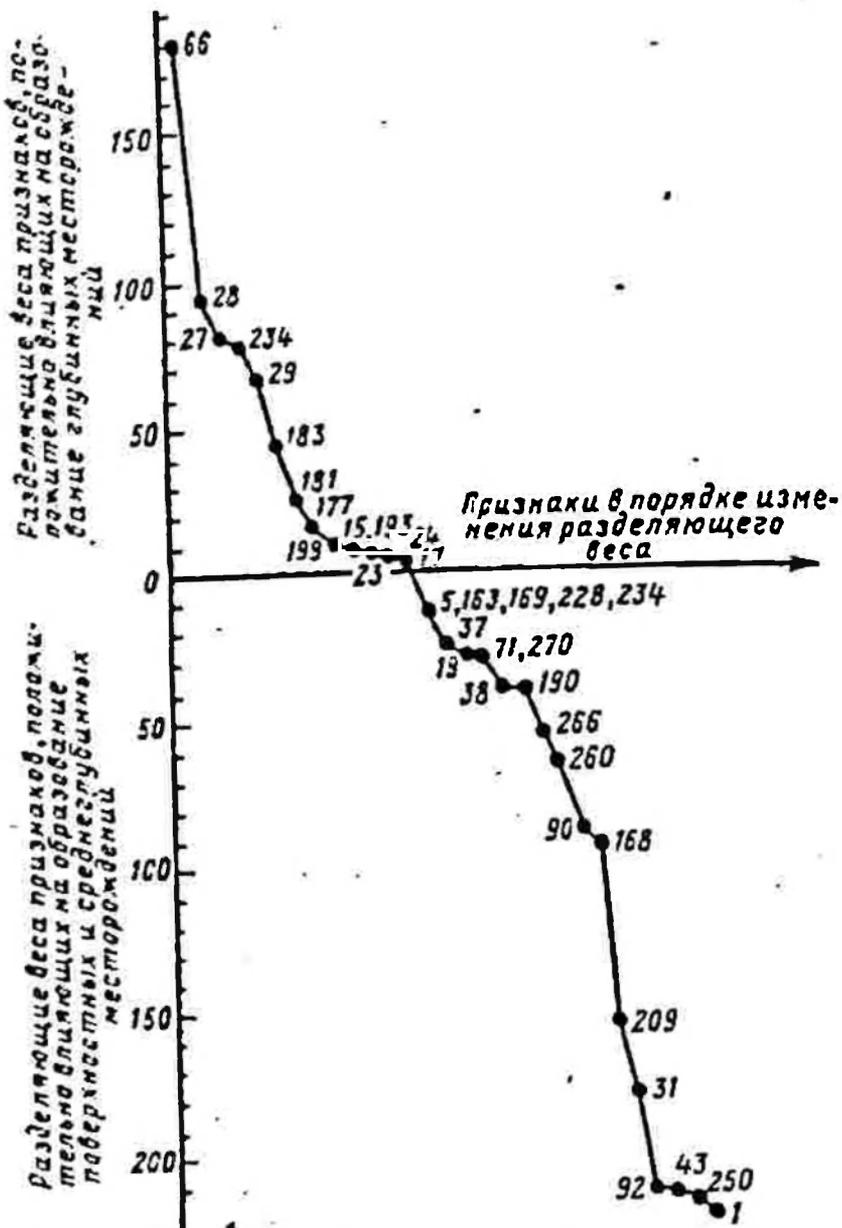


Рис. 6. Разделяющие веса информативных признаков глубинности образования золото-сульфидно-кварцевых месторождений.

Значение признаков дано по Бахтееву, Константинову (1977).
 Признаки, характерные для глубинных месторождений: 66 — участки пород, по составу благоприятные для вмещения; 28 — складки высших порядков; 27 — крылья складок; 234 — окорудные изменения (квартитизация); 29 — зоны смятий, пластического течения; 183 — флюиды в районе месторождения; 191 — кварциты, там же; 177 — кремнистые сланцы, там же; 15 — глубинные разломы; 193 — массивы щелочного состава в районе месторождения; 199 — вмещающие породы рудных тел (кремнистые сланцы); 23 — участки с интенсивной складчатостью; 24 — участки с открытой линейной складчатостью; 17 — синклинали и брахисинклинали.

Признаки, характерные для приповерхностных и среднеглубинных месторождений: 1 — эвгосинклиналильные области; 250 — возраст кайнозойский; 43 — комбинация пологих и крутопадающих разрывов; 92 — скрытое залегание; 31 — моноклинали; 209 — покровы средних и основных эффузиев — вмещающие породы рудных тел; 168 — в рудном поле покровы эффузиев среднего состава; 90 — горизонтальная зональность; 260 — брекчиевые и брекчиевидные текстуры; 266 — сиэрудные тектонические нарушения; 190 — субвулканические тела среднего и основного состава; 38 — зоны крутых разломов; 71 — рудные тела в контактах и эвгосинтактах; 270 — структурная система открытая; 19 — грабен — синклинали — грабены; 27 — блоковое строение рудного поля; 5 — области тектонической активизации; 163 — субвулканические тела кислого состава; 169 — покровы эффузиев основного состава в рудном поле; 228 — каолинизация; 234 — вулканизация

до 55. Признакам, имеющим одинаковый вес, присваивается ранг, соответствующий их среднему порядковому номеру. В результате получим следующие ранги, соответствующие весам признаков: 9; 18; 19; 20; 21; 22; 23,5; 25; 26; 27; 28; 29; 31,5; 35,5; 38; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49; 50; 51; 52; 54. Таким же образом определяем ранги признаков, характеризующих месторождения Востока СССР. Вычитая эти ранги из предыдущих у одноименных признаков, получаем d . Дальнейший расчет производится по приведенной выше формуле.

Второй способ заключается в анализе геологической совместимости информативных признаков. Так, например, оказалось, что в основе иерархии признаков, влияющих на образование близповерхностных и среднеглубинных месторождений золота, находятся несовместимые региональные условия рудообразования, характерные, с одной стороны, для эвгеосинклиналей, а с другой — для областей тектоно-магматической активизации (рис. 6).

После этого была определена сила связи всех остальных информативных признаков близповерхностных и среднеглубинных месторождений, каждый из которых характеризуется столбцом, состоящим из единиц и нулей со столбцами, отражающими, с одной стороны, эвгеосинклинальные области, а с другой — области тектоно-магматической активизации. Связь между признаками выяснялась на основании расстояния по Хеммингу, равного числу разрядов, по которому различаются сравниваемые столбцы. Методика подсчета расстояния по Хеммингу изложена в первом разделе работы, посвященном аналогиям. Подсчеты выполнялись на основании закодированных характеристик 42 золотых месторождений.

В результате выяснилось, что все информативные признаки, связанные с глубиной образования золотых месторождений, довольно отчетливо распадаются на две группы в соответствии с их отношением к рассматриваемым региональным структурам. Для среднеглубинных и малоглубинных месторождений, связанных с ранним геосинклинальным этапом, характерны локализация в зонах крупных разломов, эффузивный магматизм среднего и основного состава, размещение месторождений среди полей эффузивов, адуляризация вмещающих пород. Несколько меньше им свойственны позиция рудных тел на участках открытой линейной складчатости в крыльях складок, на участках пород, благоприятных для замещения, и линзовидная форма рудных тел. Определенную благоприятную роль играли также факторы, как размещение рудных тел в эндо- и экзоконтактах субвулканических тел кислого состава, каолинизация вмещающих пород, появление в разрезе пород района кремнистых сланцев.

Близповерхностные и среднеглубинные месторождения эта-па активизации отличаются тем, что локализируются в грабев-синклиналиях и грабенах при моноклиналином залегании вме-щающих пород, в ассоциации с распространенными в пределах

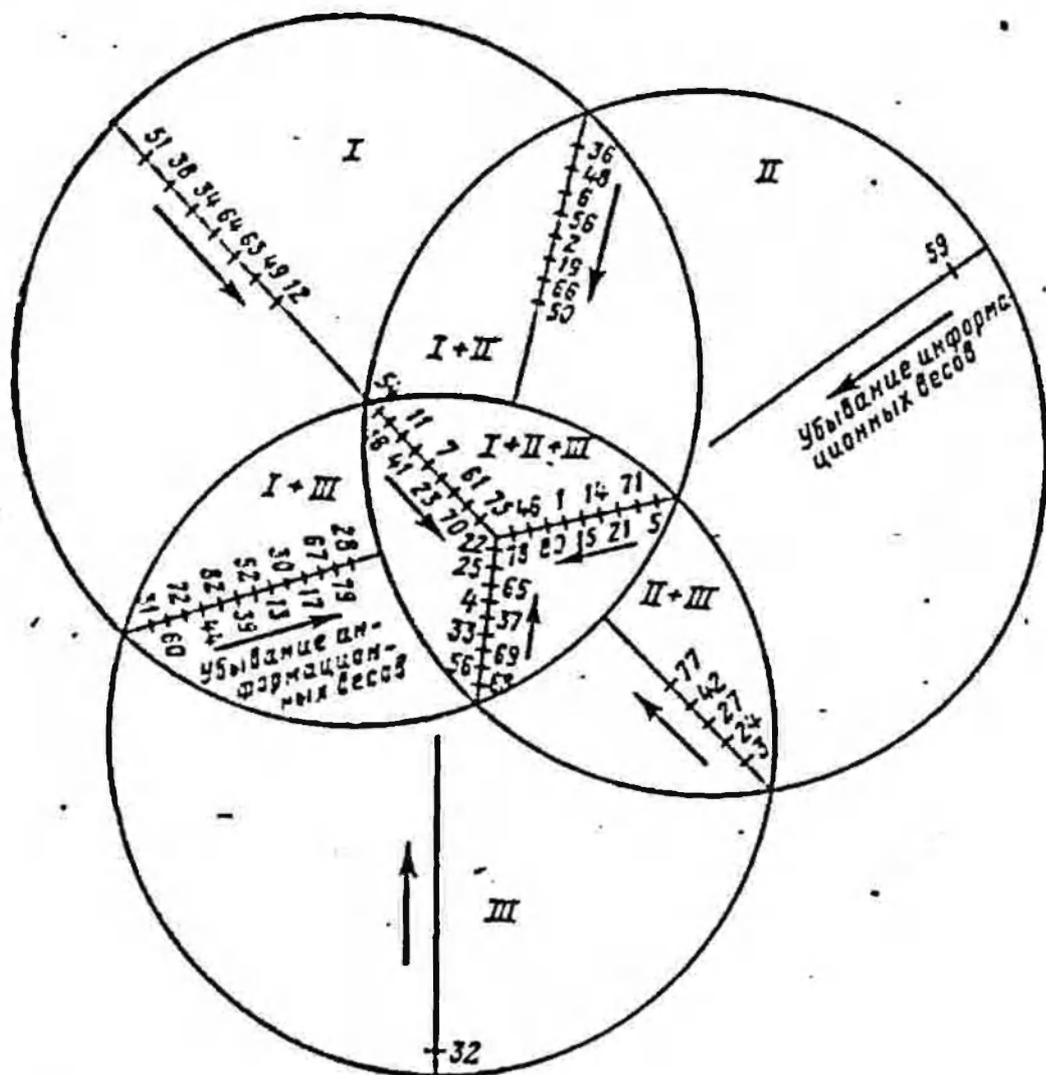


Рис. 7. Сопоставление признаков, информативных для крупных оловорудных месторождений разных формаций: касситерит-сульфидной (I), касситерит-кварцевой (II) и касситерит-силикатной (III). Расшифровку значений признаков см. в прил. I-1

рудного поля субвулканическими телами. Отмечается изменение состава рудных тел в горизонтальном направлении. Для близповерхностных месторождений этого типа особенно характерны локализация в пологих и крутопадающих трещинах, коалинизация вмещающих пород. Рудные тела часто слепые, не выходящие на поверхность. Полученные данные, по-видимому, подтверждают высказывавшиеся Ю. А. Билибиным (1955) предположения о наличии двух этапов формирования мало- и средне-

глубинных золотых месторождений: раннего, связанного с формированием эв- и многоэпиклиналей, и позднего, отвечающего конечным орогенным этапам развития геосинклиналей и тектоно-магматической активизации.

На основании приведенного примера можно полагать, что подход к интерпретации результатов исследований с позиции анализа возможности совместного воздействия всех установленных информативных критериев в некоторых случаях вскрывает конвергентность исследуемой группы геологических объектов.

Третий способ получения ценной информации заключается в сравнении информативных признаков, являющихся, с одной стороны, общими, а с другой, — различными для крупных месторождений одного металла, но разных рудных формаций. При таком подходе более отчетливо вырисовываются факторы, которые, по-видимому, в первую очередь определяют специфику рудного процесса, ведущего к образованию повышенных концентраций данного металла.

Например, как это показано на рис. 7, для всех трех гидротермальных оловорудных формаций (касситерит-кварцевой, касситерит-сульфидной и касситерит-силикатной) общим является возможность размещения их внутри терригенных геосинклиналей, в синклиналиях, в антиклиналиях на участках пересечения скрытых разломов, в ядрах или шарнирах антиклинальных складок, сложенных толщами углисто-глинистых сланцев и алевролитов, песчанников, а также в гранитах, иногда в кислых субвулканических телах, эффузивах и туфах.

Они локализованы в трещинах как отрыва, так и скола и представлены отдельными жилами, штокверками, полностью или частично метасоматическими зонами минерализации. Возможными для всех крупных гидротермальных оловянных месторождений околорудными изменениями являются грейзенизация, альбитизация, турмалинизация, окварцевание и сульфидизация.

Четвертый способ основан на выявлении факторов, играющих особую роль в формировании охарактеризованных в единой системе признаков месторождений одной рудной формации, на основании сравнения роли признаков, полученной разными математическими методами. Такой подход позволяет выделить как бы ядро устойчивых признаков исследуемой рудной формации, не зависящее от формальных особенностей методов. Это будет являться существенным вкладом в рудно-формационный анализ, так как позволяет приблизиться к решению проблемы «устойчивых геологических условий» образования месторождений, принадлежащих к исследуемой формации. Например, сопоставление наборов признаков, информативных для различных оловорудных формаций, выявленных путем применения формулы Байеса и подсчета частот признаков на наиболее типичных эталонных месторождениях (Константинов, 1973), показывает значительное их совпадение.

Пятый способ позволяет внести определенные коррективы в представления об условиях рудообразования путем сравнения вычисленных одним и тем же способом информативностей геологических факторов образования близких по генезису крупных месторождений различных видов минерального сырья (например, олова и ртути). В этом случае те различные условия, которые устанавливались лишь качественно, приобретают наглядное количественное выражение. Эта возможность широкого, на количественной основе, сравнительного изучения факторов рудообразования для различных групп месторождений, открывающаяся при использовании главным образом логико-информационных методов, может превратиться в свое время в самостоятельное научное направление, также развивающееся представления о промышленных типах месторождений. Так, например, логико-информационный анализ имеющегося материала показывает, что основными факторами образования оловянных месторождений касситерит-сульфидной формации являются региональные геологические структуры, особенности пространственного размещения рудной минерализации, тип дизъюнктивных и пликативных дислокаций, ассоциированных с оруденением магматических пород, и околорудные изменения (Логико-информационные..., 1977).

Для ртутных месторождений основными факторами являются морфология рудных тел, тип рудовмещающих трещин и частично состав вмещающих пород.

По-видимому, такие сопоставления, выполненные с привлечением данных о геологическом строении конкретных регионов и геохимии процессов рудообразования, могут помочь внести дополнительные коррективы в существующие представления о геологических факторах, контролирующих образование рудных месторождений разных металлов.

Таким образом, в работе рассмотрены некоторые наиболее простые вероятностно-статистические методы и новый метод определения информативности геологических признаков — логико-информационный анализ многофакторных геологических систем. Эти методы в совокупности позволяют значительно расширить и увеличить эффективность металлогенетических прогнозов, придать им количественный характер. Следует подчеркнуть, что этими сравнительно простыми методами можно пользоваться при решении не только металлогенетических, но и других геологических задач, связанных с прогнозами, проверкой обоснованности геолого-генетических гипотез и построением геолого-информационных и геолого-статистических моделей объектов. Основное достоинство большинства из рассмотренных методов состоит в том, что они позволяют связать результаты точных аналитических исследований объектов с их качественными геологическими описаниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамович И. И., Дуденко Л. Н., Михайлова Ю. И.* Математизация геологии и математический прогноз. — В кн.: Проблемы региональной геологии СССР. Тр. ВСЕГЕИ, нов. сер., т. 178. Л., 1972, с. 103—122 с ил.
- Автоматизированные системы информационного комплекса в геологии.* Гл. редактор В. И. Мошкин. М., «Недра», 1973, 200 с. с ил.
- Алгоритмы и программы для решения типовых геологических задач.* М., ВНИМС, 1972. 128 с. Авт.: Т. Н. Лазарева, Р. И. Коган, Ю. П. Белов, А. Г. Мюллербек.
- Бахтеев Р. Х., Константинов Р. М.* Геологические факторы глубинности образования месторождений золото-сульфидно-кварцевой группы. — В кн.: Логико-информационные методы оценки рудных месторождений. М., «Наука», 1977, с. 84—100 с ил.
- Билибин Ю. А.* К истории колымских приисков. — Избр. труды. Т. 3. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 195—207.
- Билибин Ю. А.* Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. М., Госгеолтехиздат, 1955, 88 с.
- Богацкий В. В., Гаврилин Н. В.* Изменчивость геологических объектов и мера ее количественной оценки. — «Геология и геофизика», 1967, № 5, с. 80—84.
- Боровко Н. Н.* Статистический анализ пространственных геологических закономерностей. Л., «Недра», 1971. 172 с. с ил.
- Бубнов Е. Т.* Новые методы прогнозирования месторождений полезных ископаемых с применением математической статистики и ЭВМ. — В кн.: Применение математических методов и ЭВМ в рудной геологии. Иркутск, Изд-во Ирк. ун-та, 1975, с. 50—89 с ил.
- Бугаец А. Н., Дуденко Л. Н.* Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Л., «Недра», 1976. 257 с. с ил.
- Булкин Г. А., Лепилина О. М.* Дисперсионный анализ при оценке влияния рудоконтролирующих факторов в Никитовском рудном поле. — «Геология рудн. месторождений», 1969, № 3, с. 73—83.
- Васильев В. И.* Распознающие системы. Киев, «Наукова думка», 1969. 292 с. с ил.
- Васильев Ю. Я., Дмитриев А. Н.* Спектральный подход к сравнению объектов, охарактеризованных набором признаков. — «Докл. АН СССР», т. 206, 1972, № 6, с. 1309—1312 с ил.
- Вернадский В. И.* Биосфера. — В кн.: Биосфера. М., «Мысль», 1967, с. 222—348.
- Вистелиус А. Б., Романова М. А., Фасс А. В.* О некоторых факторах, влияющих на концентрацию ртути в месторождениях Северная Плавиковая Гора и Восточная Вершина Хайдарканской группы. — «Геология рудн. месторождений», 1968, № 4, с. 54—68.
- Высокоостровская Е. Б., Зеленецкий Д. С.* О количественной оценке перспектив территории при поисках месторождений рудных полезных ископаемых. — «Сов. геология», 1968, № 8, с. 58—69 с ил.
- Губерман Ш. А., Марипов Т. М.* Оценка перспективности месторождений гидротермальных руд с применением программ распознавания. — «Пр. Моск. ин-та нефтехим. и газ. пром-ти», 1966, вып. 62, с. 126—132.
- Дискретная математика и математические вопросы кибернетики.* Под общ. ред. С. В. Яблонского, О. Б. Лупанова. М., «Наука», 1974. 311 с.

Дубов Р. И. Концентрация химических элементов в ореолах рассеяния. — «Геология и геофизика», 1964, № 12, с. 44—55.

Дубов Р. И. Качественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений. Новосибирск, «Наука», 1974. 277 с. с ил.

Канищев А. Д., Менакер Г. И. Количественная оценка информативности схем металлогенического районирования Центрального и Восточного Забайкалья. — «Геология рудных месторождений», 1973, № 6, с. 95—100 с ил.

Константинов Р. М. Основы формационного анализа гидротермальных рудных месторождений. М., «Наука», 1973. 215 с. с ил.

Константинов Р. М., Джабар-заде Р. М., Сиротинская С. В. О применении электронно-вычислительных машин для классификации рудных месторождений по минеральному составу. — «Пзв. АН СССР, сер. геол.», 1968, № 9, с. 46—51.

Константинов Р. М., Сиротинская С. В. Логико-информационная оценка геологической документации. — «Разведка и охрана недр», 1973, № 1, с. 5—11.

Константинов Р. М., Сиротинская С. В. Логико-информационные исследования эндогенных рудных формаций и вариационные ряды рудных месторождений. — В кн.: Проблемы эндогенного рудообразования. М., «Наука», 1974, с. 68—82.

Константинов Р. М., Щеломов А. Д. Математика и металлогения. — В кн.: Математические методы при прогнозе рудоносности. М., «Наука», 1977, с. 5—17.

Кудрявцева И. Г., Лось В. Л. Количественный анализ связи полиметаллического оруденения с гидротермальными измененными породами. — В кн.: Геология, закономерности и условия локализации месторождений цветных металлов Казахстана. Алма-Ата, КазНМС, 1974, с. 128—135.

Кузлин А. П. Количественный подход к проблеме прогноза полезных ископаемых. — В кн.: Основы научного прогноза месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. Л., ВСЕГЕИ, 1971, с. 173—174.

Логико-математическая обработка геологической информации. Под ред. А. И. Дмитриева. Новосибирск, «Наука», 1975. 190 с.

Лось В. Л. Распределение плотности оруденения по площади Ревнюшпской антиклинальной структуры. — В кн.: Геология, закономерности размещения и условия локализации месторождений цветных металлов Казахстана. Алма-Ата, КазНМС, 1974, с. 109—121.

Математическая статистика. Под ред. проф. А. М. Длинна. М., «Высшая школа», 1975. 398 с. с ил.

Математические методы анализа при изучении закономерностей формирования и размещения углеводородных скоплений. М., ВИЭМС, 1973. 52 с. с ил. Авт.: М. Д. Белонин, Н. П. Иванова, В. Д. Паливкин, Г. П. Сверчков, И. А. Черников.

Миллер Р., Кач Дж. Статистический анализ в геологических науках. М., «Мир», 1965. 482 с. с ил.

Михайлова Ю. И., Иванова А. А. Некоторые аспекты применения метода главных компонент при металлогенических исследованиях. — «Геология рудных месторождений», 1973, № 1, с. 98—102.

Михайлова Ю. И., Иванова А. А. Применение математических методов при региональном прогнозировании флюоритовых месторождений (на примере Забайкалья). — В кн.: Методы количественного прогнозирования (Тезисы докладов, октябрь 1975 г.), Алма-Ата, КазНМС, 1975, с. 38—41.

Неженский И. А. К характеристике типов рудных месторождений сходного минерального состава. — «Докл. АН СССР», т. 174, 1967, № 6, с. 1402—1405.

Неженский И. А. Прогнозная математическая оценка зональности оруденения. — В кн.: Основы научного прогноза месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. Л., ВСЕГЕИ, 1971, с. 147—150.

Неженский И. А., Денисенко В. К. Прогнозное значение количественного описания изменчивости минерализации в пространстве. — В кн.: Основы научного прогноза месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. Л., ВСЕГЕИ, 1971, с. 155—157.

- Овчинников Л. Н. Плутоногенные гидротермальные месторождения. — В кн.: Генезис эндогенных рудных месторождений. М., «Недра», 1968, с. 413—489 с ил.
- Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Закономерности состава и строения порфиридных геохимических ореолов сульфидных месторождений. — В кн.: Научные основы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Ч. 1. Иркутск, 1970, с. 3—36 с ил.
- Овчинников Л. Н., Козан Р. И. О применении методов математической статистики в абсолютной геохронологии. — В кн.: Статистические методы геологических исследований. Вып. 2. М., ИМГРЭ, 1975, 89 с.
- Олейников А. Н., Михайлова Ю. И. Применение перфокарт в геологии. Л., «Недра», 1968. 170 с с ил.
- Организация и обработка геологической информации с помощью ЭВМ на основе построения тупиковых тестов. — В кн.: Логико-информационные решения геологических задач. М., «Наука», 1975, с. 83—128 с ил. Авт.: Л. Н. Дмитриев, Ф. П. Крейделев, А. А. Бишаев, Е. А. Смертин, Т. И. Штатнова.
- Оценка оловорудных и ртутных месторождений с помощью алгоритмов распознавания образов. — В кн.: Математические методы в геологии. Вып. 1. М., ВИМС, 1974, с. 21—28. Авт.: Н. Г. Демидова, Р. Г. Пинеллис, С. Г. Рабинович, И. Д. Савинский.
- Принципы построения автоматизированной информационно-прогнозирующей системы (АИПС). — В кн.: Методика комплексной обработки геол.-геофиз. информации с помощью математических методов и ЭВМ при прогнозировании и оценке месторождений. Вып. 1. М., ВИМС, 1975, с. 7—13. Авт.: В. Ф. Семенов, А. Н. Еремеев, Е. П. Власов и др.
- Прогнозирование рудоносных площадей. Под ред. В. И. Иванова, Г. М. Мейтува. М., «Наука», 1976. 275 с ил.
- Рабинович В. Л. Алхимия как феномен культуры. — «Природа», 1973, № 9, 10, с. 86—97, 83—94 с ил.
- Родионов Д. А., Козан Р. И., Белов Ю. П. Анализ современных математических методов решения типовых задач геологии. — В кн.: Математические методы при прогнозе рудоносности. М., «Наука», 1977, с. 243—269.
- Савинский И. Д. Некоторые вопросы разработки алгоритмов распознавания образов при решении геологических задач и описание алгоритмов «Потенциал» и «БР». — В кн.: Математические методы в геологии. Вып. 1. М., ВИМС, 1974, с. 5—16.
- Сиротинская С. В. Метод вариационных рядов и его применение к исследованию некоторых геологических особенностей оловянно-вольфрамовых месторождений. — В кн.: Логико-информационные решения геологических задач. М., «Наука», 1975, с. 5—82 с ил.
- Сиротинская С. В. Применение графов для поиска тупиковых тестов при решении геологических задач. — В кн.: Логико-информационные решения геологических задач. М., «Наука», 1975, с. 246—252 с ил.
- Слуцкая Т. Л. Алгоритмы вычисления информационных весов признаков. — В кн.: Дискретный анализ. Вып. 12. Новосибирск, «Наука», 1968, с. 1—6.
- Смолянец В. И., Зималина В. Я., Королев В. А. Применение некоторых статистических задач при изучении закономерностей размещения оруденения (методическое пособие). Ташкент, ГИМС, 1972, с. 104 с ил.
- Соловов А. П. Основы теории и практики металлометрических съемок. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1959. 266 с с ил.
- Теоретические основы геохимических методов поисков слепых рудных тел. — В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Ч. 2. Иркутск, 1971, с. 245—297 с ил. Авт.: А. П. Соловов, А. В. Гарагин, В. С. Голубев, А. А. Матвеев.
- Тестовый подход к количественной оценке геолого-структурных факторов и масштабов оруденения. — «Геология рудн. месторождений», 1971, № 2, с. 30—42 с ил. Авт.: С. В. Яблонский, Н. Г. Демидова, Р. М. Константинов и др.

Тонколий М. С. К вопросу прогнозной оценки полиметаллического оруденения по данным геохимического опробования. — В кн.: Геология, закономерности размещения и условия локализации месторождений цветных металлов Казахстана. Алма-Ата, КазНИМС, 1974, с. 144—146.

Уемов А. Н. Аналогия в практике научного исследования. М., «Наука», 1970, 263 с.

Ушаков В. П., Кренделев Ф. П., Воронич В. А. Оценка золоторудных и шеслитовых месторождений. Новосибирск, «Наука», 1976, 101 с. с ил.

Флаке Ш., Бедчер В. А. К вопросу о методах диагностики геологических объектов на примере эндогенного оруденения меди Южного Урала. — В кн.: Второе Сиб. совещание по применению мат. методов и ЭВМ в геологии и геофизике. Новосибирск, «Наука», 1967, с. 101—102.

Гагин М. М. О применении информационных мер при решении задач геологического прогнозирования. — Изв. АН СССР, сер. геол., 1969, № 11, с. 80—86 с ил.

Шарапов Н. П. Применение математической статистики в геологии (статистический анализ геологических данных). М., «Недра», 1965, 260 с. с ил.

Щеглов А. Д. Основы металлогенетического анализа. М., «Недра», 1976, 295 с. с ил.

Geoffroy De J., Wignall T. K. A statistical study of geological characteristics of porphyry-copper-molybdenum geosites in the Cordilleran Belt. Application to the rating of porphyry prospects. — "Econ. Geology", v. 67, № 5, 1972, p. 656—669.

Joyce Alexyn S., Clema John M. An application of statistics to the chemical recognition of nickel gossans in the Jelgarn Block, Western Australia. — "Proc. Australia. Inst. Mining. and Met.", 1974, № 252, p. 21—24 (P. 9A 497—1975).

Klován I. E. Selection of target areas by factor analysis — "West. Miner.", 1968, 41, № 2, p. 41—50.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРИМЕРЫ СОСТАВЛЕНИЯ ШКАЛ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

I-1. Шкала признаков оловорудных месторождений Тихоокеанского рудного пояса и Востока СССР

I. Региональные геологические структуры. 1 — терригенные геосинклинали; 2 — срединные массивы, поднятия внутри антиклинориев; 3 — прогибы с инверсией, кислым вулканизмом и андезито-дацитами; 4 — антиклинории; 5 — синклинории; 6 — глубинные разломы, в том числе скрытые; 7 — пересечения скрытых разломов.

II. Локальные рудовмещающие структуры. 8 — брахи-складки; 9 — линейные складки; 10 — поперечные перегибы складок, флексу-рообразные изгибы; 11 — ядра и шарниры антиклиналей; 12 — крылья антиклиналей; 13 — крылья синклиналей; 14 — трещины отрыва; 15 — трещины од-косистемного скола и субпараллельные нарушения неясного генезиса; 16 — трещины двухсистемного скола и пересекающиеся трещины неясного генезиса; 17 — кольцевая система трещин; 18 — межпластовые срывы; 19 — вулканиче-ские жерла, взрывные брекции; 20 — пересечения трещин; 21 — зоны рассла-цевания и трещиноватости.

III. Морфология рудных тел. 22 — штокверки; 23 — отдельные жилы (простые жилы); 24 — жилные зоны, преимущественно выполнение открытых трещин; 25 — зоны дробления и минерализации (полностью или частично метасоматические); 26 — угол падения до 50° ; 27 — угол падения от 50° до 75° ; 28—29 — угол падения свыше 75° .

IV. Особенности размещения оруденения. 30 — ртутные проявления на флангах; 31 — свинцово-цинковые проявления на флангах; 32 — кварц-касситеритовые проявления; 33 — наличие прожилков аксинита; 34 — рудный интервал больше 200 м; 35 — рудный интервал больше 400 м; 36 — зональность внутри рудных тел; 37 — зональность внутри рудного поля; 38 — столбовое распределение минерализации; 39 — гнезда; 40 — равномерное распределение.

V. Магматические породы, ассоциирующие с орудене-нием. 41 — аляскитовые граниты, порфиоровидные и др. (штоки и массивы в удалении до 3 км); 42 — аляскитовые граниты, порфиоровидные и другие под рудными телами; 43 — аляскитовые граниты вмещают оруденение; 43а — гранодиориты и кварцевые диориты вмещают оруденение; 44 — гранодиориты и кварцевые диориты в удалении до 3 км; 45 — гранодиориты и кварцевые диориты под рудными телами; 46 — кислые субвулканические тела, вмещаю-щие оруденение и в удалении до 3 км; 47 — отдельные дайки порфиритов, гранодиорит-порфиритов, андезито-базальтов, спессартитов, диоритовых порфи-ритов, андезитов, диабазовых порфиритов, андезитов, диабазовых порфиритов; 48 — основные и средние субвулканические тела, вмещающие оруденение

и в удалении до 3 км; 49 — дайковые поля порфиритов; 50 — отдельные дайки кварцевых порфиров, гранит-порфиров, фельзитов, липаритов; 51 — дайковые поля кварцевых порфиров; 52 — внутрирудные порфириты; 53 — внутрирудные кварцевые порфиры; 54 — лавобрекчия и эффузивы порфиритов, андезитов вблизи от рудных; 54а — лавобрекчия, пгнимбриты кварцевых порфиров вблизи рудных тел.

VI. Вмещающие породы. 54б — песчаники; 55 — сланцы углистые и глинистые, алевроляты; 56 — переставление песчаников и углистых глинистых сланцев; 56а — переставление песчаников и сланцев в тектонической зоне — «тектониты»; 57 — известняки; 58 — линзы известняков и известковистых пород в песчано-сланцевой толще; 59 — прослой конгломератов и глаувак в песчано-сланцевой толще; 60 — биотитовые и другие роговики; 61 — кислые эффузивы и их туфы; 62 — средине и основные эффузивы; 63 — дайки кислого состава; 64 — дайки основного и среднего состава; 65 — гранитные массивы и штоки; 66 — кристаллические сланцы, филлиты.

VII. Околорудные изменения. 67 — скарпирование; 68 — грейзизация; 69 — серицитизация; 70 — окварцевание; 71 — турмалинизация; 72 — карбонатизация; 73 — биотитизация; 74 — сульфидизация; 75 — пропилитизация; 76 — хлоритизация; 77 — каолинизация; 78 — вльбитизация; 79 — стадии минерализации больше трех; 80 — стадии минерализации меньше трех и три.

1-2. Шкала признаков для характеристики геологических условий, влияющих на содержания золота в рудных телах. Составлена Р. М. Константиновым и С. В. Сяротнянской

I. Характер контактов рудного тела с вмещающими породами. 1 — контакт всячего бока четкий; 2 — то же, извилистый; 3 — контакт лежащего бока четкий; 4 — то же, извилистый.

II. Мощность рудного тела*. 5 — 0,1—0,5 м...; 8 — 1,5—2 м; 9 — 2—2,5 м; 10 — 2,5—3 м; 11 — 3 м.

III. Элементы залегания рудного тела. А. Контакт всяческого бока. Азимут падения: 12 — 290—300°; ... 18 — 350°; угол падения: 19 — до 20°; 20 — 20—30°; 21 — 30—40°; 22 — 40—50°; Б. Контакт всяческого бока: Азимут падения: 23 — 290—300°; ...; 27 — 330—340°; 28 — 310—350°; 29 — 350 до 25°; Угол падения: 30 — до 20°; 31 — 20—30°; ...

IV. Цвет кварца. 34 — светло-серый, серовато-белый до белого; 35 — серый; 36 — темно-серый; 37 — молочно-белый.

V. Текстуры кварца. 38 — массивная; 39 — полосчатая.

VI. Строение рудного тела и некоторые его особенности. 40 — тонкое чередование различных разновидностей кварца (максимальная мощность полос кварца до 0,2 м); 41 — грубое чередование различных разновидностей кварца (минимальная мощность полос кварца 0,2 м); ...; 46 — серый кварц в всяческом боку жилы; 47 — серый кварц в лежащем боку жилы; ...; 55 — пустоты выщелачивания в жильном кварце; ...; 60 — прожилки, гнезда, апофизы темно-серого кварца во вмещающей породе; 61 — раздвоение жилы.

VII. Минеральный состав (макроскопический). 62 — видимое золото; 63 — галенит; 64 — пирит; 65 — сфалерит; 66 — халькопирит; 67 — карбонаты; 68 — малахит; 69 — азурит.

VIII. Особенности распределения минералов в рудном теле. А. Распределение видимого золота: 70 — золото в трещинах; 71 — золото на контакте ксенолитов вмещающих пород в кварце; ...; Б. Распределение сульфидов: 74 — гнезда от 0,5 до нескольких сантиметров в поперечнике; 75 — густая вкрапленность; 76 — редкая вкрапленность или отсутствует; 77 — преимущественно выполняют трещинки.

* Здесь и далее многоточием обозначены пропущенные в тексте промежуточные интервалы.

IX. Ориентировка трещиноватости в кварце. Азимут падения и угол падения: 78 — аз. падения $80-100^\circ$, $<50-65^\circ$; 79 — аз. падения 85° , $<45^\circ$, ...; 87 — аз. падения $350-320^\circ$, $<30-40^\circ$; 88 — аз. падения 250° , $<70^\circ$.

X. Характер трещиноватости в рудном теле (трещины без выполнения). 89 — отдельные крупные трещины в рудном теле, иногда с глиной трещины; 90 — серия сближенных одинаково ориентированных выдержанных трещин в рудном теле; ...

XI. Вмещающие породы. 93 — измененные метаморфические породы плотные; ...; 97 — известняки с прослоями роговиков.

XII. Ориентировка трещиноватости во вмещающей породе. 98 — аз. падения $0-30^\circ$, ... $<70^\circ$; 99 — аз. падения $70-90^\circ$, $<80-90^\circ$, ...; 104 — аз. падения $330-350^\circ$, $<65-70^\circ$.

1-3. Шкала признаков эндогенных месторождений золото-сульфидно-кварцевой группы рудных формаций. Составлена Р. Х. Бахтевым, Р. М. Константиновым, И. В. Петровской и Ю. Г. Сафоновым

I. Региональные геологические структуры.

A. 1 — эвгеосинклинальные области-системы; 2 — миогеосинклинальные области-системы; 3 — срединные массивы; 4 — активизированные платформы (древние); 5 — области тектонической активизации («молодые» платформы); 6 — вулканические пояса.

Б. 1 — антиклинории; 2 — синклинории; 3 — сводовые поднятия; 4 — краевые швы, зоны; 5 — приподнятые блоки, прогибы, впадины, грабены, синеклизы; 6 — глубинные разломы.

В. 1 — антиклинали — брахантиклинали; 2 — синклинали — брахисинклинали; 3 — горст-антиклинали — горсты; 4 — грабен-синклинали — грабены; 5 — купольные структуры; 6 — мульды проседания (вулканогенные); 7 — долгоживущие разломы, их сочленения, пересечения.

II. Локальные рудовмещающие структуры.

A. Пликативные: 1 — участки с интенсивной сжатой складчатостью; 2 — участки с открытой линейной складчатостью; 3 — участки с приразломной складчатостью; 4 — осевые зоны, шарниры складок; 5 — крылья складок; 6 — складки высоких порядков; 7 — зоны смятия, пластического течения; 8 — флексурные изгибы; 9 — моноклинали; 10 — изгибы складок по простиранию; 11 — участки ундуляции осей.

Б. Дизъюнктивные: а) соскладчатые: 1 — трещины отслоения; 2 — межпластовые межформационные срывы; 3 — зоны расслаивания; б) посткладчатые: 1 — линейные блоки; 2 — неправильные блоки; 3 — зоны крупных разломов; 4 — крылья крупных разломов; 5 — изгибы зон крупных разломов; 6 — сочленения разломов; 7 — крутопадающие нарушения нескольких систем; 8 — комбинация пологих и крутопадающих разрывов; 9 — система крутопадающих разрывов; 10 — система пологих разрывов; 11 — отдельные нарушения; 12 — трещины оперения крупных разломов; 13 — сколовые нарушения; 14 — отрывные нарушения; 15 — зоны дробления, брекчирования; 16 — зоны мелкой трещиноватости; 17 — согласные со складчатостью; 18 — посткладчатые нарушения; 19 — унаследованные нарушения; 20 — согласные нарушения; 21 — секущие нарушения; 22 — прототектонические трещины; 23 — кольцевые радиальные системы трещин; 24 — веерообразные трещины; 25 — пучки разрывов; 26 — простые разрывы; 27 — сложные разрывы; 28 — контакты пород (с различными физико-механическими свойствами и составом); 29 — участки относительно более хрупких пород в толще пластичных; 30 — участки более хрупких пород среди менее хрупких (более прочных, вязких); 31 — участки переслаивания пород с различными физико-механическими свойствами среди более однородных; 32 — участки пород, по составу благоприятных для замещения; 33 — ксенолиты осадочных или метаморфических пород среди интрузивных массивов; 34 — участки с малой проницаемостью пород надрудной

толщи; 35 — участки с высокой проницаемостью пород надрудной толщи; 36 — рудные тела залегают в экзо- и эндоконтакте; 37 — рудные тела залегают в экзоконтакте; 38 — рудные тела залегают в эндоконтактах интрузив; 39 — рудные тела экранируются дайками.

III. Морфология рудных тел и условия залегания. 1 — штокверки; 2 — отдельные жилы; 3 — жильные зоны; 4 — зоны прожилков; 5 — лестничные жилы; 6 — зоны минерализации; 7 — седловидные залежи (согласные со складчатостью); 8 — пластообразные жилы; 9 — линзовидные залежи; 10 — трубообразные залежи; 11 — метасоматические зоны и залежи; 12 — простирание жил параллельно простиранию вмещающих пород; 13 — угол падения до 30°; 14 — угол падения 30—70°; 15 — угол падения 70—90°.

IV. Особенности размещения оруденения внутри рудного поля. 1 — зональность структуры: а) имеется в вертикальном направлении, б) имеется в горизонтальном направлении; 2 — эрозионный срез: а) погребенное залегание, б) скрытое залегание, в) слабый срез, г) средний срез, д) значительный срез.

V. Магматические породы, распространенные на участке.

А. Состав интрузивов: 1 — породы занимают более 1/3 площади выхода массивов: а) граниты, гранит-порфиры, б) плагнограниты, в) гранодиориты, г) кварцевые диориты, д) адамеллиты, е) диориты, ж) монзониты, з) граносиениты, и) сиеениты, к) габбро-диориты, л) габбро; 2 — породы занимают менее 1/3 площади выхода массивов: а) граниты, гранит-порфиры, б) плагнограниты, в) гранодиориты, г) кварцевые диориты, д) адамеллиты, е) монзониты, ж) граносиениты, з) сиеениты, и) габбро-диориты, к) габбро.

Б. Состав даек: 1 — кислые дорудные дайки: а) граниты, б) аплиты, в) пегматиты, г) плагнограниты, д) березиты, е) нордмаркиты; 2 — дорудные дайки среднего и основного составов: а) протеробазы, б) оливниновые диабазы, в) диабазы, г) диабазовые порфириты, д) диоритовые порфириты, е) долериты, ж) габбро-диабазы, з) габбро-диориты, и) одниты, к) габбро, л) оливниновые габбро, м) малахиты; 3 — пострудные дайки среднего и основного составов: а) протеробазы, б) оливниновые диабазы, в) диабазы, г) диабазовые порфириты, д) диоритовые порфириты, е) долериты, ж) габбро-диабазы, з) габбро-диориты, и) одниты, к) габбро, л) оливниновые габбро, м) малахиты; 4 — дорудные дайки щелочного состава и группы лампрофиров: а) монзонитовые порфиры, б) сиеенит-порфиры, в) вогезиты, г) сиеениты, д) кварцевые сиеениты, е) лампрофиры-спессартиты, ж) керсантиты; 5 — пострудные дайки щелочного состава и группы лампрофиров: а) монзонитовые порфиры, б) вогезиты, в) сиеенит-порфиры, г) сиеениты, д) кварцевые сиеениты, е) лампрофиры-спессартиты, ж) керсантиты.

В. Вулканические образования: 1 — кислые субвулканические тела; 2 — субвулканические тела среднего состава; 3 — субвулканические тела основного состава; 4 — щелочные пластовые интрузии; 5 — покровы эффузивных пород кислого состава; 6 — покровы эффузивных пород среднего состава; 7 — покровы эффузивных пород основного состава.

Г. Взаимотношения между рудными и магматическими телами: 1 — наличие магматических тел под рудными телами; 2 — наличие пострудных магматических тел; 3 — наличие внутрирудных магматических тел.

VI. Вмещающие породы.

А. Вмещающие породы района месторождения: 1 — песчаники; 2 — глинистые сланцы; 3 — алевролиты; 4 — аргиллиты; 5 — кремнистые сланцы; 6 — известняки; 7 — доломиты; 8 — кристаллические сланцы; 9 — кварциты; 10 — амфиболиты; 11 — покровы кислых эффузивов и их туфов; 12 — покровы средних и основных эффузивов; 13 — покровы щелочных эффузивов; 14 — субвулканические тела кислого состава; 15 — субвулканические тела среднего и основного состава; 16 — гранитоидные интрузивы; 17 — массивы и штоки пород среднего и основного состава.

Б. Вмещающие породы рудных тел: 1 — песчаники; 2 — глинистые сланцы; 3 — алевролиты; 4 — аргиллиты; 5 — кремнистые сланцы; 6 — известняки; 7 — доломиты; 8 — кристаллические сланцы; 9 — кварциты; 10 — амфиболиты.

ты; 11 — покровы кислых эффузивов и их туфов; 12 — покровы средних и основных эффузивов; 13 — покровы щелочных эффузивов; 14 — субвулканические тела кислого состава; 15 — субвулканические тела среднего и основного состава; 16 — дайки; 17 — гранитоидные интрузивы; 18 — массивы и штоки пород среднего и основного состава.

VII. Околорудные изменения. 1 — скарирование; 2 — грейзенизация; 3 — серицитизация; 4 — окварцевание; 5 — турмалинизация; 6 — карбонатизация; 7 — биотитизация; 8 — пропилитизация; 9 — сульфидизация; 10 — хлоритизация; 11 — каолинизация; 12 — альбитизация; 13 — листовицизация; 14 — березитизация; 15 — анкеритизация; 16 — алуинитизация; 17 — адуляризация; 18 — пиррофилитизация; 19 — доломитизация; 20 — калишпатизация; 21 — оталькование; 22 — амфиболитизация; 23 — серпентинизация.

VIII. Характер рудного процесса. 1 — число общих стадий минерализации: а) до трех, б) до шести, в) больше шести; 2 — количество продуктивных стадий больше одной; 3 — признаки переотложения; 4 — многоэтапный.

IX. Возраст. 1 — PR; 2 — PZ; 3 — MZ; 4 — pJ; 5 — J.

X. Минеральный состав. 1 — альбит; 2 — амфибол; 3 — анкерит; 4 — антимонит; 5 — апатит; 6 — аргентит; 7 — арсенопирит; 8 — блеклые руды; 9 — борнит; 10 — висмут самородный; 11 — висмутит; 12 — галенит; 13 — гематит; 14 — герсдорфит; 15 — гранат; 16 — доломит; 17 — кальцит; 18 — киноварь; 19 — клиноцоизит; 20 — кубанит; 21 — магнетит; 22 — марказит; 23 — молибденит; 24 — мусковит; 25 — нефелин; 26 — пирит; 27 — пирротин; 28 — рутил; 29 — серебро самородное; 30 — серицит; 31 — серпентин; 32 — сидерит; 33 — сфалерит; 34 — энаргит; 35 — эпидот.

XI. Сопутствующие компоненты. 1 — Ag; 2 — Pb; 3 — Zn; 4 — W; 5 — Mo; 6 — Cu; 7 — Sb; 8 — Hg.

XII. Текстуры руд. 1 — брекчиевые и брекчиевидные; 2 — сетчатые; 3 — массивные; 4 — колломорфные; 5 — вкрапленные.

XIII. Тектонический режим формирования месторождений. 1 — основные тектонические деформации: а) дорудные, б) синрудные, в) пострудные; 2 — преобладание надвиговых, взбросовых надвижек на разломы; 3 — преобладание сдвиговых, взбросовых надвижек на разломы; 4 — преобладание сбросовых надвижек на разломы; 5 — значительные амплитуды перемещений; 6 — малые амплитуды перемещений; 7 — структурная система — открытая — выполнения полости; 8 — структурная система ограничено открытая — выполнение и замещение; 9 — структурная система слабо открытая — замещение.

1-4. Шкала признаков, определяющих формационный тип свинцово-цинковых месторождений. Составлена Д. Н. Горжевским и Р. М. Константиновым

Регионально-тектонические закономерности размещения свинцово-цинковых месторождений.

I. Приуроченность к геотектоническим элементам земной коры:

1. *Вулканогенно-осадочные и осадочные формации* (составляются на основании равнения и сопоставления серии стратиграфических колонок и разрезов отложений определенного структурного этажа или яруса данной структурно-формационной зоны):

А. Соотношение вулканогенных (включая и обломочные вулканиты) и осадочных отложений: а) вулканогенные породы слагают 25% разреза; б) то же 25—50% разреза, в) то же, 50% разреза.

Б. Соотношение состава кислых и средних эффузивных пород:

а) кислые эффузивы слагают 25% (от суммарной мощности кислых и средних эффузивов), б) то же, 25—50%, в) то же, 50—75%, г) то же, 75%.

В. Соотношение состава кислых и основных эффузивов: а) кислые эффузивы слагают 25% (от суммарной мощности кислых и основных эффузивов), б) то же, 25—50%, в) то же, 50—75%, г) то же, 75%.

Г. Соотношение состава кислых, средних, основных и смешанных обломочных вулканитов в процентах от общей суммы пирокластических пород (так же по группам пород и в процентах распространенности).

Д. Соотношение кремнистых, карбонатных и терригенных отложений (в процентах от суммарной мощности всех осадочных отложений).

Е. Соотношение молассовых и других терригенных отложений: а) молассовые отложения составляют 25% (от суммарной мощности всех терригенных отложений), б) то же, 25—50%, в) то же, 50—75%, г) то же, 75%.

2. Степень дислоцированности отложений:

А. Средние углы падения пластов 30°; Б. То же, 30—60°; В. То же, 60—70°.

3. Характер складчатых структур:

А. Среднее отношение длины и ширины складок 10:1;

Б. То же, от 10:1 до 5:1; В. То же, 3:1.

4. Интенсивность накопления осадочных и вулканогенных пород в процессах:

А. На каждый 10 млн. лет 5000 м. Б. То же, 5000—2500 м; В. То же, 2500—1000 м; Г. То же, 1000—500 м; Д. То же, 500 м.

5. Роль пород фундамента в строении структурно-формационных зон:

А. Породы фундамента составляют 10% (от площади всей зоны);

Б. То же, 10—25%; В. То же, 25—50%; Г. То же, 50—75%. Д. То же, 75%.

6. Состав пород фундамента:

А. Роль гнейсов, кристаллических и метаморфических сланцев кислого состава и гранитоидов: а) породы составляют от площади выходов всех пород фундамента 25%, б) то же, 25—50%, в) то же, 50—75%, г) то же, 75%.

Б. Роль гнейсов, кристаллических и метаморфических сланцев основного состава, амфиболитов и интрузивных пород основного и ультраосновного состава в составе фундамента: а) породы составляют 25% пород фундамента, б) то же, 25—50%, в) то же, 50—75%, г) то же, 75%.

В. Роль карбонатных пород в составе фундамента: а) породы составляют 25%, б) то же, 25—50%; в) то же, 50—75%, г) то же, 75%.

7. Относительное значение групп интрузивных пород данного структурного этажа, выраженное в % к площади выходов всех массивов интрузивных пород данного структурного этажа:

А. Гипербазиты. Б. Породы основного и ультраосновного состава. В. Дюриты. Г. Кварцевые дюриты, гранодюриты, адамелиты, плагнограниты. Д. Адамелиты и граниты. Е. Субщелочные и щелочные породы.

8. Региональные разломы, которые рассматриваются как рудоконтролирующие.

А. Представлены: а) зонами кливажа течения, б) зонами кливажа разлома, в) зонами милонитизации, г) зонами брекчирования, д) системами отдельных трещин.

Б. Имеют падение: а) пологое 30°, б) среднее 30—60°, в) крутое 60—90°, г) вертикальное 90°.

В. Контролируют размещение: а) гипербазитов, б) массивов пород основного и ультраосновного состава, в) массивов пород среднего состава, г) массивов кварцевых дюритов, гранодюритов, адамелитов, плагногранитов, д) адамелитов и гранитов, е) субщелочных и щелочных пород, ж) даек диабазов и диабазовых порфиритов, з) даек андезитовых порфиритов, и) даек порфиров, к) даек аллитов, л) даек пегматитов.

Г. Вышзующие породы метаморфизованы: а) эклогитовая фация, б) гранулитовая фация, в) вьльмандино-амфиболитовая фация, г) зеленосланцевая фация, д) практически не метаморфизованы.

9. Расположение месторождений по отношению к региональным рудоконтролирующим разломам:

А. На расстоянии больше 10 км; Б. То же, 5—10 км; В. То же, 5—1 км; Г. То же, 1 км.

10. Региональный рудоконтролирующий разлом выражен следующим образом:

а) сброс; б) взброс или надвиг; в) сдвиг; г) испытал многократные движения различного знака; д) характер движений не ясен; е) пересечения разломов; ж) сопряжения разломов.

11. Распределение месторождений в стратиграфическом разрезе осадочных и осадочно-вулканогенных отложений:

А. Равномерное. Б. Неравномерное (50—75% месторождений приурочены к одной-двум определенным свитам. В. Крайне неравномерное (75% месторождений приурочены к одной-двум определенным свитам).

12. Распределение оруденения в стратиграфических разрезах регионов:

Докембрий. Кембрий. Нижний ордовик. Средний ордовик. Верхний ордовик. Ордовик (точнее не определен). Нижний силур. Верхний силур. Силур (точнее не определен). Нижний девон. Средний девон. Верхний девон. Девон (точнее не определен). Нижний карбон. Средний карбон. Верхний карбон. Карбон (точнее не определен). Нижняя пермь. Верхняя пермь. Пермь (точнее не определена). Триас. Нижняя юра. Средняя юра. Верхняя юра. Юра (точнее не определена). Нижний мел. Верхний мел. Мел (точнее не определена). Неоген. Палеоген. Четвертичный период. Нет данных.

13. Связь с определенными магматическими формациями и комплексами и ее характер.

А. Формации малых интрузий: парагенетическая связь, пространственная связь.

Б. Трапповая (толентовая) формации: парагенетическая связь, пространственная связь.

В. Другие магматические формации: парагенетическая связь, пространственная связь.

Г. Связь с определенным магматическим комплексом (в описании указать с каким комплексом): парагенетическая связь, пространственная связь.

Д. Связи с определенными магматическими формациями и комплексами не устанавливаются.

14. Состав и физико-химические свойства вмещающих пород.

Химический состав

1. Содержание ведущих компонентов, %: Рb — свыше 4; от 2 до 4; от 1,2 до 2; ниже 1,2. Рb+Zn — свыше 7; от 4 до 7; ниже 4.

2. Содержание второстепенных компонентов:

Sp, % — свыше 3; от 3 до 1; меньше 1.

Cd, % — свыше 0,01; от 0,01 до 0,002; меньше 0,002.

Ag, г/т — свыше 100; от 100 до 30; меньше 30.

Au, г/т — свыше 5; от 5 до 3; меньше 3.

As, % — свыше 1; от 1 до 0,2; меньше 0,2.

Sb, % — свыше 0,01; от 0,01 до 0,001; меньше 0,001.

Bi, % — свыше 0,1; от 0,1 до 0,01; меньше 0,01.

Sn, % — свыше 0,5; от 0,5 до 0,2; меньше 0,2.

Co, % — свыше 0,1; от 0,1 до 0,01; меньше 0,01.

In, % — свыше 0,01; от 0,01 до 0,002; меньше 0,002.

15. Структурно-текстурные особенности руд.

Структуры: крупнозернистая; среднезернистая; мелкозернистая; коллоидная; эмульсионная; графических сростаний; оолитовая.

16. Способ выполнения пространства в процессах рудообразования.

17. Зональность оруденения.

Тип зональности, степень изменчивости минерального состава на глубину (на 50 м) и по горизонтали (на 50 м).

А. Типы зональности: а) пульсационная; б) отложения; в) комбинированная.

Б. Масштабы проявления зональности (степень изменчивости):

а) на глубину изменения в минеральном составе оцениваются по блокам, расположенным друг над другом, в сечениях этих блоков, удаленных на расстоянии 50 м. В каждом сечении количества минералов оцениваются в про-

Тип вмещающих пород	Плотность	Эффективная пористость	Распространенность в рудном поле, % (до 20, от 20 до 50, от 50 до 70, от 70 до 100)
Осадочные породы			
Конгломераты глибовые валунные крупногалечные среднегалечные мелкогалечные гравийники Песчаники граувакковые аркозовые кварцевые полимиктовые Аргиллиты Глинистые сланцы Известково-глинистые сланцы Известняки (мраморы) Доломиты Мергели			
Метаморфические породы			
Сланцы метаморфические кварц-серицитовые кварц-серицит-карбонатные кварц-серицит эпидотовые Филлиты Серицитовые кварциты Кварциты			
Эффузивные породы			
Кварцевые порфиры Риолиты Липариты Трахиты Дацинты Андезиты Другие типы Туфы кварц-порфиров риолитов липаритов трахитов дацитов андезитов			

Тип вмещающих пород	Плотность	Эффективная пористость	Распространенность в рудном поле. % (до 20, от 20 до 50, от 50 до 70, от 70 до 100)
Гипабиссальные и субвулканические породы			
Аллиты			
Гранит-порфиры			
Лампрофиры			
Монцопит-порфиры			
Диоритовые порфириты			
Диабазы			
.....			
Интрузивные породы			
Граниты			
Гранодиориты			
Адамеллиты			
Монциты			
Кварцевые диориты			
Диориты			

V. Типы околорудных изменений и их взаимоотношения с оруденением

Метасоматический процесс	Главные (свыше 40%)	Второстепенные (меньше 40%)	Дорудные	Сингенетические с оруденением
Известковое скарнообразование				
Калишпатизация				
Альбитизация				
Грейзенизация				
Пропилитизация				
Образование вторичных кварцитов				
Березитизация				
Аргиллитизация				

VI. Вещественный состав руд
 Минеральный состав

Минералы	Содержание, об. % от массы рудного тела				
	свыше 50%	от 50 до 25%	от 25 до 5%	от 5 до 1%	меньше 1%
Галенит					
Сфалерит					
Вюртцит					
Пирит					
Халькопирит					
Бурнонит					
Булакижерит					
Арсенопирит					
Пирротин					
Марказит					
Блеклые руды					
Магнетит					
Гематит					
Висмутин					
Самородный висмут					
Гринокит					
Золото					
Серебро					
Аргентит					
Сульфосали серебра					
Теллуриды золота					
Теллуриды серебра					
Другие рудные минералы					
Кварц					
Кальцит					
Серпент					
Барит					
Гипс					
Флюорит					
Гранат					
Пироксен					
Амфиболы					
Хлорит					
Эпидот					
Родонит					
Волластонит					
Аксинит					
Альвант					

ентах и по пятибалльной системе (4—главные минералы; 3—распространенные; 2—мало распространенные; 1—редкие минералы; 0—минерал, отсутствующий в других блоках, в данном блоке отсутствует). Изменчивость содержания различных компонентов характеризуется отношением средних содержаний в расположенных друг над другом блоках;

Текстура	Распространенность в рудных телах, %		
	0—30	30—60	60—100
Прожилковая			
Вкрапленная			
Прожилково-вкрапленная			
Брекчиевая			
Брекчиевидная			
Пятнистая			
Брекчиевидно-пятнистая			
Полосчатая			
Ритмично-полосчатая			
Симметрично-полосчатая			
Кокардовая			
Массивная			

б) по горизонтали изменения в минеральном составе и в содержаниях различных компонентов руд характеризуются таким же образом, как и на глубину.

Способ выполнения	Распространенность в рудных телах, %			
	от 0 до 30	от 30 до 50	от 60 до 70	от 70 до 100
Метасоматоз				
Выполнение пустот				
Перекристаллизация				

Х. Структуры рудных полей и месторождений

Складчатые структуры

Шариры антиклиналей

Флексуры

В контактах согласных интрузий

Брахисинклинали

Зона перехода от антиклинали к синклинали

Пласты благоприятных пород, залегающие моноклинно

углы падения пород
на крыльях складок
от 0 до 20°; от 20
до 40°; свыше 40°

Дизъюнктивные структуры

Тип структуры (межпластовые срывы, надвиги, сбросы, сдвиги, трещины отрыва, трещины односистемного скола и отрыва, пересечения трещин, зоны мелкой трещиноватости, зоны расщепления, контакты секущих интрузий, трубки взрыва, участки пересечения трещин с пластами благоприятных пород).

Тип выполнения трещин: а) дайки изверженных пород (а₁ — кислых пород, а₂ — средних пород, а₃ — основных и ультраосновных пород), б) брек-

ции вмещающих пород (b_1 — с кварцевым цементом, b_2 — с карбонатным цементом).

XI. Формы рудных тел (линзы, пластообразные тела, жиллообразные тела, штоки, жилькообразные залежи неправильной формы, трубообразные тела, гнездообразные тела, залежи неправильной формы, жилы, штокверки).

XII. Формационные и минеральные типы месторождений^{*}.

1. Галенит-сфалеритовая и галенит-сфалерито-колчеданная формации в карбонатных породах, в той или иной степени скарированных в связи с неглубокими кислыми интрузивами или эффузивами мезо-кайнозоя.

2. Касситерит-галенит-сфалеритовая и касситерит-станныно-сфалеритовая формации с сульфосолями свинца и серебра в связи с неглубокими кислыми интрузивами или эффузивами мезо-кайнозоя.

3. Галенит-аргентит-карбонатно-кварцевая формация с сульфосолями серебра в пропилитизированных третичных лавах и туфах.

4. Галенит-сфалерит-колчеданная и галенит-сфалерит-барит-колчеданная формации в измененных вулканогенных породах мезо-кайнозоя.

5. Золото-галенит-сфалерит-арсенопирит-кварцевая и галенит-сфалерит-колчеданно-кварцевая формации (в вулканогенных и осадочных породах мезо-кайнозоя).

6. Галенит-сфалеритовая и галенит-сфалерит-колчеданная формации (в частично скарированных карбонатных породах, генетически связаны с палеозойскими гранодиоритами).

7. Серебро-галенит-сфалерит-сидерит-кварцевая и галенит-сфалерит-колчеданно-барит-кварцевая формации в осадочных и изверженных породах в связи с гранодиоритами палеозоя.

8. Аргентит-арсенидная, с сульфидами никеля и кобальт-галенит-карбонатная формация (в изверженных и неметаморфических породах).

9. Галенит-сфалерит-флюорит-баритовая формация (преимущественно в осадочных породах).

10. Галенит-сфалерит-колчеданная, сфалерит-халькопирит-колчеданная и галенит-сфалерит-кварц-баритовая формации в сильно метаморфизованных вулканогенных породах палеозойского и более древнего возраста.

11. Галенит-сфалерит-колчеданная формация (в метаморфизованных сланцах и мраморах более древнего возраста).

12. Галенит-сфалеритовая формация (в зонах сильной трещиноватости) и галенит-сфалерит-колчеданная формация (в древних карстовых полостях) в карбонатных породах преимущественно палеозойского возраста.

13. Галенит-сфалеритовая формация спорного генезиса (пластовые тела среди прибрежно-морских и лагунных отложений).

XIII. Запасы.

^{*} Формационные и минеральные типы месторождений могут быть выделены после соответствующей обработки всей собранной информации. Тем не менее настоящая рубрика введена для получения сведений о типах месторождений в рамках существующих классификаций. Классификация дается по Е. В. Захарову (1966).

1-5. Шкала геологических признаков зональности оловорудных месторождений Востока СССР. Составлена П. Н. Антоновым, Р. М. Константиновым, В. В. Лаврик и И. Н. Ильченко

Номера признаков	Признаки
Пликативные структуры	
Складчатость II порядка	
1	Синклиналь
2	Антиклиналь
3	Опрокинутая складка
4	Моноклиналь
5	Угол падения крыла складки до 45°
6	Угол падения крыла складки свыше 45°
7	Простираение складки субмеридиональное
8	Простираение складки субширотное
9	Простираение складки северо-западное
10	Простираение складки северо-восточное
11	Амплитуда складки до 5 км
12	Амплитуда складки 5—10 км
13	Амплитуда складки больше 10 км
14	Наличие флексур
Складчатость высших порядков	
15	Ядро антиклинали
16	Ядро синклинали
17	Крылья синклинали (антиклинали)
18	Простираение субмеридиональное
19	Простираение субширотное
20	Простираение северо-западное
21	Простираение северо-восточное
22	Число складок — до 2
23	Число складок — свыше 2
Дизъюнктивные структуры	
Субмеридиональные нарушения (крупные)	
24	Отклонение простираения к востоку
25	Отклонение простираения к западу
26	Падение западное; угол падения более 75°
27	Падение западное; угол падения 75—60°
28	Падение западное; угол падения менее 60°
29	Падение восточное; угол падения более 75°
30	Падение восточное; угол падения 75—60°
31	Падение восточное; угол падения менее 60°
32	Длина до 500 м (не менее 200 м)
33	Длина от 500 до 1000 м
34	Длина более 1000 м
35	Мощность до 1 м
36	Мощность 1—10 м
37	Мощность более 10 м
38	Число нарушений до трех
39	Число нарушений свыше трех

Номера признаков	Признаки
Северо-западные нарушения (крупные)	
40	Отклонения простирания к субмеридиональному
41	Отклонение простирания к субширотному
42	Падение северо-западное; угол падения более 75°
43	Падение северо-западное; угол падения 75—60°
44	Падение северо-западное; угол падения менее 60°
45	Падение юго-восточное; угол падения более 75°
46	Падение юго-восточное; угол падения 75—60°
47	Падение юго-восточное; угол падения менее 60°
48	Длина до 500 м (не менее 200 м)
49	Длина от 500 м до 1000 м
50	Длина более 1000 м
51	Мощность до 1 м
52	Мощность 1—10 м
53	Мощность свыше 10 м
54	Число нарушений до трех
55	Число нарушений — свыше трех
Северо-восточные нарушения	
56	Отклонение простирания к субмеридиональному
57	Отклонение простирания к субширотному
58	Падение северо-западное; угол падения более 75°
59	Падение северо-западное; угол падения 75—60°
60	Падение северо-западное; угол падения менее 60°
61	Падение юго-восточное; угол падения более 75°
62	Падение юго-восточное; угол падения 75—60°
63	Падение юго-восточное; угол падения менее 60°
64	Длина до 500 м (не менее 200 м)
65	Длина 500—1000 м
66	Длина более 1000 м
67	Мощность до 1 м
68	Мощность 1—10 м
69	Мощность более 10 м
70	Число нарушений до трех
71	Число нарушений свыше трех
Субширотные нарушения	
72	Отклонение простирания к северу
73	Отклонение простирания к югу
74	Падение северное; угол падения более 75°
75	Падение северное; угол падения 75—60°
76	Падение северное; угол падения менее 60°
77	Падение южное; угол падения более 75°
78	Падение южное; угол падения 75—60°
79	Падение южное; угол падения менее 60°
80	Длина 200—500 м
81	Длина 500—1000 м
82	Длина более 1000 м
83	Мощность до 1 м
84	Мощность 1—10 м
85	Мощность более 10 м

Номера
признаков

Признаки

- 86 Число нарушений до трех
87 Число нарушений свыше трех

Характер магматизма в рудном поле

Штоки и штокообразные интрузии

- 88 Биотитовые граниты в удалении до 5 км с площадью менее 1 км²
89 Биотитовые граниты в удалении до 5 км с площадью 1—5 км²
90 Биотитовые граниты в удалении до 5 км с площадью более 5 км²
91 Кислые порфировые породы в удалении до 5 км с площадью менее 1 км²
92 Кислые порфировые породы в удалении до 5 км с площадью 1—5 км²
93 Кислые порфировые породы в удалении до 5 км с площадью более 5 км²
94 Кварцевые диориты, диориты в удалении до 5 км с площадью менее 1 км²
95 Кварцевые диориты, диориты в удалении до 5 км с площадью 1—5 км²
96 Кварцевые диориты, диориты в удалении до 5 км с площадью более 5 км²
97 Гранодиориты в удалении до 5 км с площадью менее 1 км²
98 Гранодиориты в удалении до 5 км с площадью 1—5 км²
99 Гранодиориты в удалении до 5 км с площадью более 5 км²

Дайки

- 100 Наличие даек кислого состава
101 Наличие даек среднего состава
102 Протяженность даек (максимальная) до 200 м
103 Протяженность даек (максимальная) 200—500 м
104 Протяженность даек (максимальная) 500—1000 м
105 Протяженность даек (максимальная) более 1000 м
106 Мощность даек (максимальная) до 3 м
107 Мощность даек (максимальная) 3—10 м
108 Мощность даек (максимальная) 10—50 м
109 Мощность даек (максимальная) более 50 м
110 Максимальное число даек в пределах изученного участка (рудного поля) от единичных даек до пяти
111 Максимальное число даек в пределах изученного участка (рудного поля) от 5 до 10
112 Максимальное число даек в пределах изученного участка (рудного поля) более 10
113 Дайки образуют линейное поле (одна система трещин)
114 Разноориентированные дайки

Вмещающие породы

- 115 Известняки и другие карбонатные породы
116 Песчаники
117 Алевриты и сланцы
118 Флиш (переслаивание песчаников и сланцев)
119 Кислые магматические породы
120 Средние и другие магматические породы

Номера приляков	Признаки
Изменения вмещающих пород Региональные	
121	Бяотитизация
122	Пропилитизация
Предрудные	
123	Серицитизация
124	Хлоритизация
125	Турмалинизация
126	Скарпирование
127	Грейзенизация
Околорудные	
128	Окварцевание
129	Серицитизация
130	Грейзенизация
131	Эпидотизация
132	Хлоритизация
133	Турмалинизация
134	Сульфидизация
135	Карбонатизация
Возраст вмещающих пород	
136	Кембрий
137	Пермь
138	Триас
139	Юра
140	Нижний мел
141	Верхний мел
Условия залегания рудных тел	
142	Простирание рудных тел в одном направлении
143	Простирание рудных тел в двух направлениях
144	Простирание рудных тел более чем в двух направлениях
145	Угол падения рудных тел менее 50°
146	Угол падения рудных тел 50—75°
147	Угол падения рудных тел более 75°
148...151	Длина рудных тел
152...156	Мощность рудных тел
157	Число рудных тел менее 5
158	Число рудных тел 5—10
159	Число рудных тел более 10
Ведущие минеральные ассоциации	
160	Кварц-касситеритовая (пирит + арсенопирит + вольфрамит) главная
161	Кварц-касситеритовая (пирит + арсенопирит + вольфрамит) второ- степенная
162	Колчеданная (пирротин + пирит + сфалерит + арсенопирит и др.) главная

Номера признаков	Признаки
163	Колчеданная (пирротин + пирит + сфалерит + арсенопирит и др.) второстепенная
164	Сульфидная (галенит + сфалерит + пирит + халькопирит и др.) главная
165	Сульфидная (галенит + сфалерит + пирит + халькопирит и др.) второстепенная
166	Карбонатная главная
167	Карбонатная второстепенная

ПРИЛОЖЕНИЕ II.

ТАБЛИЦЫ НЕКОТОРЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН

II-1. Значения χ^2 для различных q и K

Число степеней свободы K	Уровень значимости q		Число степеней свободы K	Уровень значимости q	
	0,05	0,01		0,05	0,01
1	3,8	6,6	11	19,7	21,7
2	6,0	9,2	12	21,0	26,2
3	7,8	11,3	13	22,4	27,7
4	9,5	13,3	14	23,7	29,1
5	11,1	15,1	15	25,0	30,6
6	12,6	16,8	16	26,3	32,0
7	14,1	18,5	17	27,6	33,4
8	15,5	20,1	18	28,9	34,8
9	16,9	21,7	19	30,1	36,2
10	18,3	23,2	20	31,4	37,6

II-2. Значения функции $Z(t)$

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	3089	3089	3089	3088	3086	3084	3082	3980	3977	3973
0,1	3070	3065	3061	3056	3051	3045	3039	3932	3925	3918
0,2	3010	3002	3004	3005	3076	3067	3057	3847	3836	3825
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2987	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	2120	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1972	1845	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	989	973	957
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551

Примечание. Все значения увеличены в 10^4 раз.

И-3. Значения информационных весов для различных соотношений I_1/I_2 при использовании алгоритма «БР». По И. Д. Савинскому (1974)

I_2	I_1											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1,41	1,15										
2	2,00	1,41	1,21									
3	2,83	1,79	1,41	1,23								
4	4,00	2,31	1,70	1,41	1,25							
5	5,66	3,03	2,10	1,66	1,41	1,27						
6	8,01	4,00	2,63	1,98	1,63	1,41	1,28					
7	11,3	5,33	3,34	2,41	1,91	1,51	1,41	1,29				
8	16,0	7,16	4,28	2,97	2,27	1,85	1,59	1,41	1,29			
9	22,6	9,67	5,53	3,70	2,74	2,17	1,81	1,58	1,41	1,30		
10	32,0	13,1	7,20	4,66	3,34	2,57	2,10	1,78	1,57	1,41	1,30	

Примечание. Если $I_1 > I_2$, то значению веса признака придается знак «+», если $I_1 < I_2$ то знак «-».

III-2. Пример построения тесторного дерева

Наборы	Ярусы	Тесторное дерево
2 3 8 6-9 7-10 5-7-10 5-6-7	I II III IV V VI VII	
Тесторы: 7-6-8-3-2; 10-6-8-3-2; 7-9-8-3-2; 5-10-9-8-3-2.		

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Подготовка исходной геологической информации	8
Вероятностно-статистические методы металлогенического прогнозирования	15
Краткий обзор вероятностно-статистических методов металлогенического прогнозирования	15
Некоторые простые методы обработки металлогенических данных с помощью математической статистики	27
Проверка статистической обоснованности гипотез о связях металлогенических факторов	27
Проверка допустимости гипотезы о закономерном расположении геологических объектов	33
Вероятностный подход к созданию эмпирических обобщений и металлогенических прогнозов	40
Металлогеническое прогнозирование на основе логико-информационного анализа многофакторных геологических систем	45
Металлогеническое прогнозирование на основе аналогии	45
Определение степени аналогии с помощью расстояния Хемминга	48
Определение сходства металлогенических объектов по косинусу угла между их характеристиками-векторами	49
Классификация металлогенических объектов на основании показателей их сходства по аналогии	51
Прогнозная оценка металлогенических объектов с помощью алгоритма «БР»	55
Исследование вариационных рядов геологических объектов	60
Особенности подготовки геологических данных	62
Способы обработки геологических данных	65
Селекция информативных признаков и определение их весов с помощью смещенного треугольника Паскаля	65
Графический метод построения тупиковых тесторов	71
Определение разделяющих весов признаков	85
Оформление результатов	90
Геологическая интерпретация результатов математической обработки металлогенической информации	91
Список литературы	101
Приложения	
Приложение I. Примеры составления шкал геологических признаков для решения прогнозно-металлогенических и других геологических задач	105
Приложение II. Таблицы некоторых статистических величин	122
Приложение III. Примеры графического построения тупиковых тесторов	124

ИБ 2206

Рэм Михайлович Константинов

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
КОЛИЧЕСТВЕННОГО ПРОГНОЗА
РУДОНОСНОСТИ**

Редактор издательства Л. М. Старикова
Обложка художника К. В. Говикова
Художественный редактор Е. Л. Юраевская
Технические редакторы Б. А. Нансова, Л. Н. Шичанова
Корректор Т. С. Суворова

Сдано в набор 09.10.78. Подписано в печать 26.03.79.
Т-0046. Формат 69x90¹/₁₆. Бумага № 3. Гарнитура литер.
Печать высокая. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 8,42.
Тираж 200 экз. Заказ 1393/013—14. Цена 1 р. 10 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательства,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, 103051, Цветной бульвар, 26.

1 р. 10 к.

НЕДРА