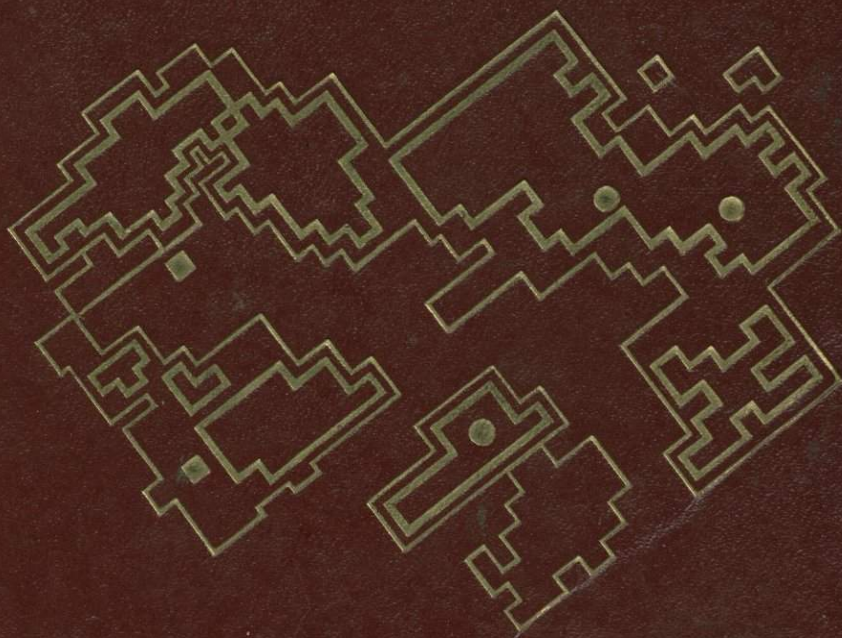


В. В. МАРЧЕНКО

ЧЕЛОВЕКО-  
МАШИННЫЕ  
МЕТОДЫ  
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ



В. В. МАРЧЕНКО

ЧЕЛОВЕКО-  
МАШИННЫЕ  
МЕТОДЫ  
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ



Москва "Недра" 1988



1854  
4981

ББК 26.3

М 30

УДК 550.812.12:553:45

Рецензент д-р техн. наук Е.Е. Ширяев

**Марченко В.В.**

М30 Человечно-машинные методы геологического прогнозирования.—  
М.: Недра, 1988. — 232 с.: ил.  
ISBN 5-247-00121-4

Освещена актуальная проблема дальнейшего повышения качества геологического прогнозирования. Разработаны человеко-машинные методы анализа и комплексной интерпретации геологической, геофизической и геохимической информации на основе системно-информационного подхода. Приведены примеры практической реализации человеко-машинных методов геологического прогнозирования, построенных на основе диалогового взаимодействия геолога с вычислительными системами. Уделено внимание вопросам создания нового направления в геологической науке — прикладной геоинформатики.

Для геологов, геофизиков, а также сотрудников вычислительных центров.

М  $\frac{1904010000 - 121}{043(01) - 88}$  41-88

ББК 26.3

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Марченко Вячеслав Васильевич

**ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

Заведующий редакцией *Р.В. Добровольская*  
Редактор издательства *Н.В. Венгерцева*  
Обложка художника *В.И. Казакова*  
ИБ № 6801

Художественный редактор *Г.Н. Юрчевская*  
Технический редактор *Н.С. Анашкина*  
Корректор *Л.В. Зайцева*  
Оператор *Н.Я. Новикова*

Подписано в печать 09.02.88. Т-05783. Формат 60 x 88<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная № 2. Набор выполнен на наборно-пишущей машине. Гарнитура "Пресс-роман". Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,21. Усл. кр.-отт. 14,21. Уч.-изд. л. 16,20. Тираж 3 230 экз. Заказ 6367/995-1. Цена 1 р. 10 к.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",  
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография имени А.А. Жданова" "Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
113054, Москва, Валовая, 28.

ISBN 5-247-00121-4

© Издательство "Недра", 1988

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Результаты деятельности геологов находят свое отражение главным образом в различных геологических картах. По емкости они не имеют аналогов и несут информацию о времени, пространстве и материи.

Одной из наиболее сложных проблем, препятствующих эффективному применению ЭВМ для анализа картографической геоинформации, является несоответствие в "восприятии" такой информации ЭВМ и человеком. Если ЭВМ "видит" лишь обстановку в какой-либо конкретно указанной элементарной площадке (точке), то человек, рассматривая эту же точку, подсознательно оценивает и особенности пространственного расположения разных факторов, признаков, окружающих данную точку. Это — принципиальное различие. Поэтому машинный анализ исходной картографической геоинформации значительно уступает по эффективности содержательному анализу геологических карт, осуществляемому специалистом-геологом.

В предлагаемой работе изложен подход, позволяющий в значительной мере преодолеть отмеченное несоответствие в восприятии геоинформации человеком и ЭВМ. Для этого карты геологического содержания преобразуются в дискретный вид, пригодный для формирования территориальных баз данных и последующего человеко-машинного анализа. Такое преобразование геоинформации осуществляется ЭВМ.

На основе рассмотренного подхода появляется возможность разработки человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации геологической, геофизической, геохимической, аэрокосмической и другой картографической и цифровой геоинформации. Эти методы реализуются с помощью современных технических средств в виде проблемно-ориентированных диалоговых систем. Их применение позволяет резко повысить производительность творческого труда геологов при разработке вариантов прогнозных решений, улучшить качество и достоверность прогнозов, создать новые, неизвестные ранее методы анализа геоинформации. Данный подход не единственно возможный; уже сейчас видны пути его дальнейшего развития и совершенствования.

Важным результатом исследований является создание и широкая практическая апробация метода эвристического моделирования, позволяющего объединить опыт, знания и интуицию геологов с вычислительными возможностями ЭВМ. В книге приведены многочисленные примеры использования этого метода в различных геологических ситуациях.

Автор благодарит С.В. Емельянова, Б.А. Чумаченко, Э.А. Немировского, А.А. Сапункова, В.А. Яковлева за консультации и помощь при подготовке работы.

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей особенностью научно-технической революции нашего времени является то, что она нацелена на повышение производительности творческого труда человека на основе применения методов информатики. Это понятие синтезирует современные достижения математики, логики, кибернетики, вычислительной техники и успехи в конкретной области прикладной деятельности человека. Вычислительные машины уже нельзя рассматривать только лишь в качестве средства для расчетов, как 20—25 лет назад. Сегодня это универсальные комплексы машин и системы для накопления и анализа самой разнообразной информации: числовой, текстовой, графической и др. На наших глазах они превращаются в "советующие" системы, помогающие специалистам самых различных отраслей. Создаются уже не только базы данных, но и банки знаний специалистов (в том числе и геологов). Разрабатываются различные "экспертные" системы. Область знания, связанная с этим направлением, называется в английской литературе "компьютерной наукой" (Computer science). Многие отечественные ученые (А.А. Дородницын, Ф.В. Широков и др.) определяют это направление как информатику. Видимо, этот термин более полно отражает современное состояние процесса применения математических методов и ЭВМ в прикладных науках.

В настоящей работе рассмотрены некоторые возможности использования информатики в прикладной геологии. То, чего удалось уже сейчас добиться с помощью ЭВМ третьего и четвертого поколений, показывает большие перспективы познания геологических закономерностей при дальнейшем развитии рассматриваемого направления. Естественно, реализация этого подхода потребует значительных усилий, новой техники, новых устройств общения человека с вычислительной системой; наконец, освоения геологами навыков работы с таким инструментарием. Перспективы, открывающиеся на этом пути перед прикладной геологией, необычно велики. Именно информатика станет той основой, которая послужит фундаментом для нового этапа развития прикладной геологии и познания закономерностей размещения полезных ископаемых в земной коре.

Как известно, в 1981 г. в Японии был опубликован проект создания вычислительных систем пятого поколения. Особенностью этих систем явится то, что в них будет встроен "искусственный интеллект" и они будут ориентированы на технологию обработки знаний. Эти системы позволяют обрабатывать "гносеоинформацию"; будут охватывать три сферы: сферу человека и прикладных задач, сферу аппаратуры и связующих ее средств и сферу программного обеспечения. Предусмотрено обращение пользователя к ЭВМ на естественном языке. В системы пятого поколения встраиваются "гносеобазы" в области языка, графич-

ков, изображений конкретной области науки и техники. Скорость вычислений доводится до 10–12 млрд. операций в секунду, а память — до десятков и сотен гигабайт.

Применение персональных компьютеров огромной мощности и производительности буквально "перевернет" наши сегодняшние представления о возможностях творческого труда человека; в десятки раз ускорит производительность проектирования, расчет вариантов прогнозных решений (в том числе геологических).

Поэтому в настоящее время особо важное значение приобретает проблема детального изучения традиционных подходов к геологическому прогнозированию, исследование их как процессов творческих, понимание роли опыта, знаний и интуиции геологов при разработке ими вариантов прогнозных решений. Это позволит установить место наиболее эффективного использования средств вычислительной техники в целях резкого ускорения процесса геологического прогнозирования и повышения надежности прогноза геологических ситуаций, благоприятных для оруденения.

За последние 30–40 лет добыча рудных полезных ископаемых возросла в 4–5 раз. Соответственно увеличились затраты и на геологические поиски и разведку. Вместе с тем возможности экстенсивного развития геологических исследований за счет дальнейшего роста объемов работ не безграничны. Поэтому проблема повышения эффективности геологических поисковых работ приобретает в настоящее время исключительную актуальность. За последние 30 лет резко расширилась техническая база геологической отрасли, увеличилась скорость бурения, многократно возросли его объемы. Стремительно растет производство физических и химических анализов, широко применяются новые геофизические методы, активно используются материалы космических исследований. Однако комплексный анализ всей этой информации, ее геологическая интерпретация и составление прогнозных заключений осуществляются большинством геологов на традиционной основе. Общее число геологов, занятых поисками твердых полезных ископаемых, возросло за последнюю четверть века лишь немногим более чем в два раза. Следовательно, дальнейшее увеличение физических объемов работ не может привести к эквивалентному повышению геологической результативности, так как коэффициент полезного использования информации, получаемой человеком, снижается по мере роста ее объема. Повышение производительности творческого труда геологов в условиях ускорения научно-технического прогресса определяет один из возможных путей решения проблемы увеличения эффективности геологических исследований на интенсивном пути развития, за счет более глубокого и многостороннего использования имеющихся данных.

С точки зрения информационного подхода геологоразведочные работы включают в себя многоступенчатую систему последовательных

операций сбора и переработки разнородной геологоструктурной, минералого-геохимической, геофизической и другой информации. Эффективность всего цикла этих работ существенно зависит от качества процессов накопления, хранения и обработки собираемой информации и формирования на ее основе геологических прогнозных заключений. Вместе с тем применение математических методов и ЭВМ не может полностью заменить традиционные методы составления геологических прогнозов. Поэтому дальнейшее повышение эффективности использования ЭВМ в прикладной геологии связано с более полным учетом теоретических знаний, опыта и интуиции геологов на основе применения человеко-машинных методов. Это и определяет тенденцию соединения творческого потенциала геологов с огромными возможностями современных ЭВМ по формально-логической обработке многофакторной информации при решении задач геопрогноза. Необходимость такого синтеза обуславливается еще и тем, что часть геологических понятий и определений имеет слабоформализованный характер, а сама проблема геологического прогнозирования является слабоструктурированной, т.е. такой, решение которой возможно лишь при получении дополнительной информации от человека.

На необходимость картографо-кибернетического моделирования указывал Е.Е. Ширияев [48]. А.Б. Каждан развивает направление геолого-математического моделирования [6, 7]. Р.М. Константинов обосновывает необходимость создания нового направления — количественной металлогении [12]. М.А. Фаворская предполагает, что скоро будут разработаны количественные подходы к анализу геологической картографической информации, что позволит выделять "геологические аномалии" [44]. На целесообразность человеко-машинного анализа картографической информации указано в работах [20, 45, 52, 53].

Быстрыми темпами реализуются различные системы накопления и обработки геологической информации. Созданы и реально действуют на современных ЭВМ человеко-машинные системы обработки геологических данных (АСОД, ПРОГНОЗ, КОМПАК, РЕГИОН, СКАНДИНГ, и др. — СССР; СИМСАГ, ДЖИАПП и др. — Канада; НЧАРАН, ПРОСПЕКТОР и др. — США).

Имеется опыт преобразования основного геологического материала — карт геологического содержания — в дискретный вид, пригодный для машинного хранения и человеко-машинного анализа [20].

Все эти факты свидетельствуют о том, что в настоящее время происходит процесс формирования нового научного направления, которое может быть определено как прикладная геоинформатика. Это направление интегрирует достижения смежных наук (информатики, математики, логики, кибернетики, различных методов геологического анализа и т.п.), являясь, по существу, современным средством, многократно увеличивающим творческие возможности геологов при анализе

ими различной информации и составлении вариантов прогнозных решений о перспективах рудоносности отдельных регионов, территорий и площадей.

Видимо, в недалеком будущем геоинформатика позволит геологам более оперативно осуществлять решение таких задач, как моделирование геологических процессов и явлений в глобальном и локальном масштабе; исследование количественных закономерностей локализации оруденения (включая оценку прогнозных ресурсов), оценку геологических гипотез и концепций, моделирование вариантов альтернативных стратегий перспективного развития минерально-сырьевой базы и другие важные задачи теоретической и прикладной геологии.

В настоящей работе рассмотрены лишь некоторые подходы, реализующие современную информационную технологию геологического прогнозирования. Она состоит из средств технического (диалоговые системы) и методического обеспечения (человеко-машинные методы анализа и комплексной интерпретации геологической, геофизической, геохимической, аэрокосмической и другой информации). Эта технология реализует решение задач геопрогноза в "диалоговом режиме" геолог — ЭВМ.

Практическое использование человеко-машинных методов анализа геоинформации на основе проблемно-ориентированных систем (РЕГИОН и др.) позволило успешно решить ряд задач прикладной геологии и научно-методических исследований на разных стадиях геологоразведочного процесса в масштабах от 1:25 000 до 1:1 000 000 на различные рудные полезные ископаемые в самых разнообразных геологических регионах.

# Глава 1. ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ГЕОЛОГИИ

В течение последних 15–20 лет в геологических исследованиях активно используются математические методы и ЭВМ. Рассматривая этот процесс, Т. Лаудон отмечает, что применение ЭВМ во многом меняет устоявшуюся практику геологоразведочных работ [18]. В связи с этим он указывает на необходимость решения самостоятельной задачи — определения тех областей деятельности человека, в которых ЭВМ может принести наибольшую пользу. Решение этой задачи он определяет как системный анализ. Типичная схема последовательности процесса системного анализа применительно к геологии, по Т. Лаудону, состоит в следующем: 1) выявление объектов; 2) определение рассматриваемой системы; 3) анализ отдельных компонент системы с учетом их действия и взаимодействия; 4) рассмотрение той части системы, в которой возможно применение ЭВМ, а также тех модификаций системы, которые могут быть результатом применения ЭВМ; 5) проектирование, внедрение и закрепление тех аспектов системы, которые связаны с ЭВМ.

В работе [10] применительно к решению задач управления в геологоразведке определены следующие главные взаимосвязанные принципы системного подхода: 1) полнота исследования системы управления и внешней среды; 2) рассмотрение функционирования каждого элемента с точки зрения цели, стоящей перед системой в целом; 3) выделение главных задач управления и сосредоточение на них основных ресурсов для достижения главной цели.

Системный подход применительно к изучению недр определяется [6] как методический принцип познания материального мира, при котором объект исследования рассматривается как система, состоящая из множества условно неделимых структурных элементов (элементы неоднородности), объединяемых между собой совокупностью внутренних связей.

Принципиальные особенности применения системного метода в геологии [5] предусматривают три компонента: 1) четкое формулирование конечных целей; 2) определение альтернативных путей достижения этих целей; 3) анализ внешних условий с последующим выявлением ограничений, при которых целесообразна реализация тех или иных решений.

Одной из важнейших особенностей прикладной геологии является то, что конечным результатом исследований будут новые геологические

данные (информация) о строении недр, запасах полезных ископаемых и т.п. Таким образом, процессы накопления, хранения, анализа и интерпретации разнообразной информации имеют в геологической науке и практике первостепенное значение. Это определяет необходимость применения современных средств обработки информации в целях повышения эффективности геологоразведочных работ. Как известно, в геологии многие понятия, определения и закономерности сформулированы только качественно, хотя в последние годы наблюдается тенденция к более широкому использованию количественных геологических характеристик. Это направление стимулирует необходимость применения информатики для информационного моделирования, структуризации исследуемых проблем и их формализации, т.е. активно содействует развитию системно-информационного или системно-кибернетического образа мышления у геологов. Кибернетика — это прежде всего научно-методическое направление, рассматривающее весь объективно существующий мир с одной, а именно информационной, точки зрения. При этом информация понимается не в узком "шенноновском" смысле, а более широко, как сведения, знания, факты — все то, что используется для принятия решений по управлению. Этой методологической направленностью — "кибернетическим мировоззрением" и определяется значение кибернетических представлений и их проникновение во все сферы деятельности [8].

При анализе процесса геологоразведочных работ мы будем рассматривать в качестве главной цели повышение их эффективности на основе использования современных средств обработки и анализа многофакторной информации. При проведении такого рода анализа необходимо сочетать системность геологических исследований (с учетом иерархии рудных объектов в недрах — целей геологоразведочных работ на разных стадиях) и информатику (как методологическую основу управления процессами получения, обработки и анализа геологических данных). Как указывалось в работе [10], для такого рода информационно-кибернетических систем характерно то, что количество информации в системе контролируемо и конечно, а материальные и энергетические потоки рассматриваются только в качестве носителей информации. Такое представление упрощает задачу анализа системы управления и позволяет моделировать ее элементы с помощью входов и выходов.

Таким образом, анализ информационной системы сводится к исследованию системных объектов (вход, процесс, выход, обратная связь, конечная цель и т.д.) и моделированию информационных связей между ними и окружающей средой.

Рассмотрим теперь с учетом изложенного существующую ситуацию в геологоразведочных работах с целью выявления возможностей дальнейшего повышения эффективности геологических исследований и их интенсификации на основе применения современных средств информатики.

В настоящее время совершенствование способов обработки и анализа геологических данных немислимо без привлечения математических методов и современной вычислительной техники. С внедрением этих средств информатики в значительной мере связан прогресс геологии как науки. Одной из самых актуальных и важных с практической точки зрения задач геологического производства является геологическое прогнозирование перспективных площадей. При выполнении системно-информационного анализа геологоразведочных работ под геологическим прогнозированием мы будем понимать процесс составления геологами научно обоснованного заключения о геологической перспективности исследуемых территорий на определенные виды минерального сырья и оценке их прогнозных ресурсов. Реализация этого процесса на основе математического и эвристического моделирования с помощью ЭВМ позволит в широких масштабах производить оперативную обработку данных, решать те задачи, которые традиционными способами обычно не решаются из-за большой трудоемкости, с использованием всего имеющегося фактического материала. Возможности широкого применения ЭВМ ограничиваются не только сложностью получения строгих решений на математической основе, но и сложностью самих геологических процессов в целом, сложностью взаимоотношений между отдельными элементами этих процессов. Геология в значительной степени остается наукой, основанной на наблюдениях, которые содержат большую долю неопределенности.

Для решения задач, связанных с изучением сложных слабоформализованных проблем, важна методология системного анализа. В частности, одним из наиболее важных методов исследования сложных процессов и систем является имитационное моделирование — метод системного анализа, основанный главным образом на теории вычислительных систем, теории вероятностей, статистике и использующий фактическую информацию, а также методы анализа той области науки, для решения которой он применяется. Использование рассматриваемого моделирования для системного анализа в самых различных областях науки и техники дало многочисленные положительные результаты. Применение его для решения задач геологического производства представляется в настоящее время также весьма перспективным. Наличие огромного фактического материала, накопленного в геологической отрасли, фундаментальные работы по применению математических методов обработки геологической информации, наконец, возросшая техническая база — благоприятные объективные предпосылки для разработки современных систем обработки информации, предназначенных для широкого использования в практической геологии. Такие системы позволяют автоматизировать основные процессы выработки и обоснования вариантов решений о наиболее целесообразных направлениях геологических исследований на различных этапах и стадиях геологоразведочного процесса,

что определяет в итоге, эффективность геологоразведочной отрасли в целом. Построение подобных систем представляется возможным лишь на базе системно-информационного подхода. Поэтому необходимым условием повышения геологической эффективности является анализ структуры геологоразведочного процесса, разработка его системно-информационной модели и выявление основных звеньев, определяющих конечную эффективность геологоразведки.

## СТАДИЙНОСТЬ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ КАК СЛОЖНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА

При проведении геологических исследований в пределах отдельных территорий обычно используют определенную стadiйность работ, заключающуюся в последовательной детализации площадей и уменьшении размеров исследуемых участков. Впервые общие положения такого построения геологоразведочных работ описаны и обоснованы в фундаментальном труде В.М. Крейтера. В дальнейшем эти идеи наиболее полное развитие получили в работах А.Б. Каждана [6 и др.]. Им впервые четко сформулировано целевое назначение всех стadiй геологоразведочного процесса путем введения категории прогнозных запасов  $D$  (в настоящее время категории  $P$ ):  $D_3$  — рудоносные провинции и районы;  $D_2$  — рудные поля и узлы;  $D_1$  — глубокие горизонты и фланги месторождений. Кроме того, в отдельную стadiю им выделяются разведочные работы на эксплуатируемых месторождениях. Всего в общем геологоразведочном процессе А.Б. Каждан выделял четыре стadiи: геологопрогностическую, поисковую, разведочную и геологоразведочные работы в условиях действующего предприятия. При этом первые три стadiи разделяются на две подстadiи каждая.

В работах [6, 7] предлагается системная иерархия геологических рудных объектов, которая может быть использована для построения информационной модели геологоразведочного процесса. В систематизированном виде эти сведения приведены в табл. 1.

Рассматривая существующее состояние решения перспективных и текущих проблем в сырьевой отрасли, В.А. Ларичкин отмечает, что стadiи работ и подготовка к ним запасов полезных ископаемых с определенной степенью изученности являются взаимосвязанными элементами сложного процесса геологоразведочного производства, одним из главных принципов которого остается принцип последовательных приближений в изучении недр. Учитывая важность оценок прогнозных запасов на начальных стadiях геологических исследований, он предлагал оценивать на этапе региональных геологосъемочных работ масштаба 1:200 000 (1:100 000) возможные запасы полезного ископаемого по категории  $D_2$  (100%), а на этапе поисково-съемочных работ масштаба 1:50 000

Таблица 1. Системные иерархии геологических рудных объектов [6, 7]

Рудоносные участки недр	Площадь объектов, км <sup>2</sup>	Ориентировочные масштабы исследований
Рудные районы	$n \cdot 10^3$	1:1 000 000
Рудные узлы	$n \cdot 10^2$	1: 200 000
Рудные поля	$n \cdot 10^1$	1:50 000
Месторождения полезных ископаемых	$n \cdot 10^0$	1:10 000
Продуктивные рудные зоны	$n \cdot 10^{-1}$	1:2000
Продуктивные рудные залежи	$n \cdot 10^{-2}$	1:500
Участки (блоки) залежей и локальные рудные обособления	$n \cdot 10^{-3}$	1:100

(1:25 000) — категории  $D_1$  ( $D_2$  — 50–80 %,  $D_1$  — 20–50 %). Весь процесс геологических исследований В.А. Ларичкин подразделял на шесть стадий, заканчивающихся эксплуатационной разведкой. Работы этих и других авторов сыграли положительную роль в издании новой инструкции по запасам, в которой в особую группу выделены прогнозные ресурсы категорий  $P_3$ ,  $P_2$  и  $P_1$ .

Анализ рассмотренных и ряда других схем стадийности геологоразведочного процесса (в том числе и официально действующей схемы, утвержденной Мингео СССР) показывает, что хотя особенности поисков конкретного вида минерального сырья или другие причины могут влиять на структуру геологоразведочного процесса, общие принципы его построения остаются неизменными.

С системных позиций весь процесс геологоразведочных работ в пределах исследуемой территории представляет собой последовательность взаимосвязанных стадий, имеющих сходное внутреннее содержание. Действительно, на каждой стадии осуществляются в принципе два процесса. Во-первых, на основе анализа имеющейся геологической, геофизической и геохимической информации геологами составляется обоснованное заключение о перспективности тех или иных районов (участков, месторождений, рудных тел) и принимается решение о направлении дальнейших исследований. Во-вторых, на выделенных площадях проводят полевые работы, собирают новую, более детальную информацию и обобщают ее. Впервые это принципиальное положение было отмечено в работе [45]. Основным отличием предложенной в этой работе схемы от рассмотренных ранее является то, что на каждой стадии выделены две подстадии, соответствующие выполнению двух различных по характеру процессов: аналитического — прогнозного (обработка и анализ информации, принятие решения о проведении работ) и производственно-

го (проведение полевых работ). К аналогичному выводу о значении геологического прогнозирования как важной межстадийной процедуры (естественных звеньев геологоразведочного процесса) пришли А.И. Кривцов и В.А. Нарсеев [14]. Однако следует учитывать, что любые схемы стадийности геологоразведочного процесса являются лишь частью системы более высокого уровня — системы разработки альтернативных вариантов стратегий перспективного развития минерально-сырьевой базы страны с учетом необходимых потребностей возможных ресурсов и определенных ограничений [21].

Системно-информационный анализ геологоразведочного производства предполагает построение модели, достаточно полно отражающей структуру процесса поисково-разведочных работ и уровни его управления. В то же время разработка совершенно точной модели, исчерпывающе описывающей моделируемый процесс, привела бы к значительным трудностям при ее анализе. Таким образом, возникает необходимость создания такой системно-информационной модели, которая бы учитывала многочисленные особенности геологического производства, а также была бы достаточно простой для анализа. Решением этой задачи является иерархическое описание процесса.

Для построения системно-информационной модели геологического производства необходимо определить основную цель геологических исследований и тип, к которому эта модель может быть отнесена. Основная цель геологических исследований следующая: выявление наиболее перспективных геологических рудных объектов различных уровней системной иерархии для последующего проведения комплекса полевых работ, обеспечивающих развитие минерально-сырьевой базы в соответствии с потребностями народного хозяйства.

Модель геологического производства может быть отнесена к изоморфному типу, поскольку она обеспечивает лишь сходство по форме и структуре отдельных, составляющих частей (стадий). Для разработки схематизированной модели такого рода обычно осуществляют разделение модели всего процесса (мегасистемы) на некоторое количество более мелких частей (систем и подсистем), описывающих весь процесс с точки зрения различных степеней детальности. При этом звено, которое являлось подсистемой в модели более высокого уровня общности, оказывается системой в более детальной модели.

Рассмотренные ранее различные схемы стадийности, с точки зрения иерархического подхода, можно в некотором смысле считать системными моделями геологоразведочного процесса наиболее высокого уровня общности (мегасистемами). Системами в этих моделях являются отдельные стадии поисково-разведочных работ, обеспечивающие постепенное увеличение детальности исследований при уменьшении размеров изучаемых территорий геологических рудных объектов. В этом случае подстадии геологического прогнозирования и проведения полевых работ будут представлять собой подсистемы процесса.

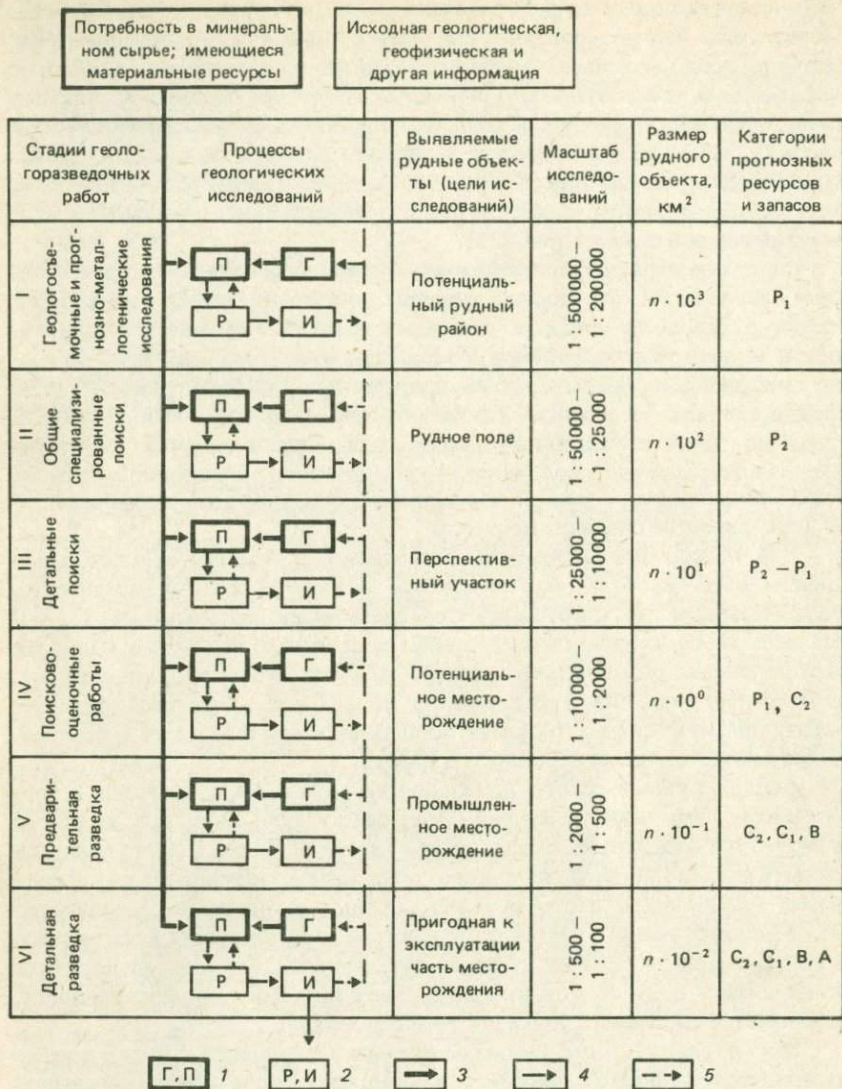


Рис. 1. Системно-информационная модель геологоразведочного процесса. Составлена с использованием работ [6, 14, 45 и др.].

1 — процедуры принятия решений (Г — геологическое прогнозирование; П — планирование работ); 2 — процессы (Р — проведение полевых работ, И — составление отчета о проведении работ); 3 — управляющие воздействия; 4 — последовательность процессов; 5 — передача информации. Масштаб исследований и размеры рудных объектов могут изменяться в зависимости от типа рудных объектов

Такого рода системно-информационная модель (мегасистема) показана на рис. 1. Модель содержит шесть систем (стадий) геологоразведочных работ, проводимых в пределах определенного региона. Общим входом модели являются: потребность в сырье, денежные, материальные и людские ресурсы, геологическая, геофизическая, геохимическая, аэрокосмическая и экономическая информация, а также информация, полученная в результате проведения региональных исследований и из других источников; выходом — материалы разведочных работ в виде отчета, содержащего сведения о количестве разведанных запасов. Подсистемы планирования определяют эффективность геологоразведочного процесса на основе экстенсивного развития: за счет увеличения физических объемов работ на исследуемых территориях. В отличие от них подсистемы геологического прогнозирования позволяют повысить эффективность геологических исследований на основе интенсификации процесса, т. е. за счет более полного использования информации и принятия оптимального решения при выборе объектов поисковых работ (снижение ошибок первого и второго рода).

#### ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Приведенная выше схематическая системно-информационная модель геологического процесса позволила выделить подсистему геологического прогнозирования как одну из основных в планировании и управлении геологическим производством. Это вполне закономерно, так как прогнозирование в определенном смысле является конечной целью науки и подтверждение прогнозов — главный критерий правильности ее теорий и эффективности ее методов. Определяя геологическое прогнозирование как подсистему на высшем уровне общности, мы его можем рассматривать также и как систему на более низком иерархическом уровне. Р. Шеннон дает следующее определение системы: система — группа или совокупность объектов, объединенных некоторой формой регулярного взаимодействия или взаимозависимости для выполнения заданной функции.

Переходя к системно-информационной модели процесса прогнозирования, мы абстрагируем его из реальной среды, тем самым получая более упрощенную структуру его представления. В самом общем виде эту структуру можно описать выражением  $E = F(x_i, y_j)$ , где  $E$  — результат прогнозирования в виде перспективных площадей и участков с оценкой их прогнозных ресурсов;  $x_i$  — переменные и параметры системы, которыми исследователь (геолог) может управлять;  $y_j$  — переменные и параметры, которыми исследователь не может управлять;  $F$  — функциональная зависимость между  $x_i$  и  $y_j$ , определяющая результат прогнозирования.

Такого рода представление о структуре модели прогнозирования показывает зависимость функционирования системы как от контролируемых, так и от неконтролируемых переменных.

Рассмотрим основные определения, характеризующие геологическое прогнозирование как систему: компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, целевая функция.

Под компонентами мы понимаем составные части (элементы), которые при соответствующем объединении образуют систему. Для сложной системы — модели геологического прогнозирования — эти элементы могут быть ее подсистемами. Параметры — величины, которые при экспериментировании на модели выбирают произвольно, а значения переменных определяются видом функции. Вообще говоря, если рассматривать некоторую группу данных или статистическую совокупность, то величины, определяющие тенденцию поведения этой совокупности (например, среднее значение, медиана или мода), будут ее параметрами.

Функциональные зависимости описывают поведение переменных и параметров в пределах компонентов или выражают соотношения между компонентами системы. Геологическое прогнозирование можно рассматривать как задачу принятия решения в условиях неопределенности, обусловленной недостатком информации. Поэтому соотношения в рассматриваемой системе являются, как правило, стохастическими, хотя некоторые из них можно представить как детерминистские.

Ограничения представляют собой устанавливаемые пределы изменения значений различных переменных. Для рассматриваемой модели они либо могут вводиться самим исследователем (искусственные ограничения), либо возникают в системе вследствие присущих ей свойств (естественные ограничения). Важно учитывать, что ограничения одного типа обусловлены неизменными законами природы, в то время как ограничения другого типа являются результатом воздействия исследователя и, следовательно, могут подвергаться изменению.

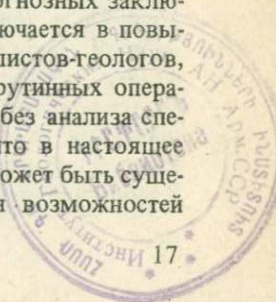
Целевая функция (функция критерия) — это точное отображение целей и задач системы и необходимых правил оценки их выполнения. Целевой функцией системы геологического прогнозирования является оптимальное выделение перспективных площадей под более детальные работы следующей стадии в условиях подавления (минимизации) ошибок первого и второго рода. Таким образом, функция критерия (целевая функция) — органическая составная часть системно-информационной модели "геологического прогнозирования", и весь процесс разработки этой модели необходимо направлять на удовлетворение указанного выше критерия.

Традиционные способы составления геологических прогнозных заключений о потенциальных источниках минеральных ресурсов выполняются, как правило, на основе следующих принципов: последовательных приближений, аналогии и выборочной детализации. Эти исследова-

ния осуществляются с использованием методов экспертных оценок. Нельзя недооценивать их значение; достаточно вспомнить, что именно таким путем было обеспечено мощное развитие минерально-сырьевой базы Советского Союза. Вместе с тем очевидны возрастающие трудности использования традиционных способов, обусловленные значительным исчерпанием фонда "легкооткрываемых" месторождений, залегающих неглубоко от поверхности, увеличением глубины и комплексности исследований, резким увеличением объема анализируемых данных и т.п. Нельзя уже отрицать необходимость поиска новых путей составления прогнозных заключений на основе активного использования современных способов анализа и комплексной интерпретации многофакторной информации. Такое разумное дополнение традиционных способов геологического прогнозирования не вызывает возражений у большинства специалистов.

Геологическая наука и ее основные теоретические направления, связанные с познанием закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых (геодинамические построения, металлогения, формационный анализ, рудогенез и др.), будут и впредь оставаться основными источниками наших знаний об окружающем материальном мире и его объективных геологических законах. В связи с этим следует подчеркнуть, что геологическое прогнозирование является творческим процессом, в котором ведущую роль играют опыт и знания специалистов. Вместе с тем достижения современной научно-технической революции позволяют поставить вопрос о дальнейшем повышении эффективности составления геологических прогнозных заключений на основе использования современных технических средств обработки и анализа информации.

С учетом изложенного рассмотрим цели и задачи совершенствования процессов геологического прогнозирования, возможные технические, системные и информационные средства, необходимые для решения поставленной цели, и отдельные составляющие, обеспечивающие успешное использование отмеченных средств. Основная цель при этом заключается в повышении эффективности геологического прогнозирования как главного звена, определяющего оптимальное управление процессами перспективного развития минерально-сырьевой базы. Одной из составляющих, обеспечивающих достижение цели, является улучшение надежности, обоснованности, достоверности и детальности прогнозных заключений, т.е. повышение качества прогноза. Другая, заключается в повышении производительности творческого труда специалистов-геологов, максимальном освобождении их от вспомогательных рутинных операций по предварительной обработке информации. Даже без анализа специальных вопросов геологической теории очевидно, что в настоящее время качество составления геологических прогнозов может быть существенно повышено за счет использования имеющихся возможностей



(например, математических методов принятия оптимальных решений при неполной информации об объекте исследования, реализованных в виде соответствующих системных программных комплексов; внедрения унифицированных методик составления прогнозных заключений с применением современных ЭВМ; привлечения аэрокосмических данных и комплексной интерпретации их с материалами наземных геологических, геофизических, геохимических и других съемок).

Повышение производительности творческого труда специалистов при составлении геологических прогнозных заключений (без ущерба для их качества) также представляется вполне реальным при широком использовании территориальных машинных банков геологических данных (картографической и числовой информации) с применением методов эвристического моделирования, имитационного моделирования с помощью ЭВМ и при внедрении хорошо отлаженных человеко-машинных методов и технологий обработки и анализа имеющихся исходных данных, доступных для использования широким кругом геологов.

Применение перечисленных выше средств, реализованных на основе человеко-машинной (диалоговой) системы как современного технического инструмента обработки и комплексного анализа имеющейся информации, позволит значительно расширить возможности геологов по содержательному анализу различных исходных материалов; увеличить полноту извлечения полезных данных, содержащихся в имеющейся информации; снизить влияние субъективизма отдельных исследователей. В свою очередь, открываются возможности выполнения многоцелевого использования данных, получения количественных оценок информативности отдельных геологических признаков, закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых и выбора на этой основе оптимальных прогнозно-поисковых комплексов [14 и др.]. Оказывается реальным выполнение имитационного моделирования, в принципе возможен оперативный сопоставительный анализ конечных результатов прогнозов, составленных специалистами различных геологических направлений, и т.п. Более того, принципиально выполнима оценка компетентности отдельных специалистов.

Таким образом, весьма важным вопросом представляется разработка принципов частичной формализации (алгоритмизации) процесса геологического прогнозирования и принципов составления прогнозных заключений специалистами-геологами. Это позволит определить необходимые и допустимые требования для такого рода частичной формализации. Наличие таких принципов и требований в настоящее время крайне необходимо в связи с развитием работ по созданию человеко-машинных методов и систем геопрогноза. В отличие от материальных процессов (которые осуществляются в результате переноса и преобразования вещества, энергии) геологический прогноз является только информационным процессом, т.е. процессом получения, передачи, хране-

ния, переработки и выдачи информации. Следовательно, управлять процессом геологического прогнозирования — означает управлять информационными процессами, позволяющими анализировать существующую геологическую ситуацию и путем синтеза разнообразных геологических факторов (в соответствии с решаемой задачей) определять вероятность обнаружения представляющего интерес рудного объекта. Создание и использование человеко-машинных методов и систем геологического прогнозирования означает применение информатики в помощь специалистам-геологам, поскольку именно она занимается процессами, протекающими в информационных системах управления. Управление не может осуществляться без наличия критериев оценки его воздействия. Следовательно, необходимо четко определить требования к прогнозным картам и заключениям, выявить критерии, которые могут лечь в основу эффективности управления геолого-прогнозными работами [45].

При формировании любого прогнозного заключения геолог должен избежать ошибок двух видов. Он стремится отстоять территорию, в пределах которой может находиться прогнозируемый объект — перспективный участок. По принятой в теории вероятностей терминологии это означает, что он стремится обезопасить себя от ошибки первого рода. Однако стремление к увеличению размеров площадей, выделяемых в качестве перспективных, соответственно приводит к отнесению некоторого числа бесперспективных площадей к перспективным, т.е. к появлению ошибки второго рода. Поскольку прогноз всегда имеет вероятностный характер, то исключить ошибки первого и второго родов в принципе невозможно. Можно лишь их минимизировать. Следовательно, необходимо найти компромиссное решение между уровнями ошибок первого и второго родов. Для нахождения такого компромисса нужно знать цену каждой из этих ошибок, причем цены эти различны. Цена ошибки первого рода складывается из потерь, которые возникают в результате пропуска искомого рудного объекта вследствие ошибочной забрковки перспективной площади. Цена ошибки второго рода характеризуется теми потерями, которые возникают в результате изучения ошибочно выделенной перспективной площади, которая в самом деле бесперспективна для обнаружения рудного объекта.

Исходя из этого требования, следует определить некоторый нижний уровень вероятности обнаружения прогнозируемого объекта. Естественно, что этот уровень будет зависеть от масштаба осуществляемых прогнозных исследований, так как при различных масштабах меняется объект прогнозирования (рудная зона, поле, район, месторождение и т.д.), следовательно, будет также меняться и цена ошибок первого и второго родов.

К настоящему времени созрели все необходимые предпосылки для реализации изложенного подхода. Благодаря основополагающим трудам

советских и зарубежных ученых процесс создания человеко-машинных методов и систем геологического прогнозирования вступает сейчас в стадию перехода от теоретических разработок к созданию целостных технологий анализа геологической информации.

## **Глава 2. ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ**

### **ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ – СЛОЖНАЯ СЛАБОСТРУКТУРИЗОВАННАЯ ПРОБЛЕМА**

До последнего времени применение математических методов в прикладной геологии развивалось главным образом по пути использования классических подходов, которое было ограничено определенными типами распределения классов в многомерном пространстве признаков. Такой подход применялся при решении широкого круга задач, несмотря на несоответствие характера исходных данных условиям успешного использования отдельных алгоритмов. Известно, что в геологии большинство определений носит трудноформализуемый характер либо вообще не поддается формализации.

В зависимости от глубины проработки отдельных вопросов и возможности применения формальных методов математики для обработки и анализа информации при решении различных проблем Г. Саймон предложил следующую их классификацию: 1) хорошо структурированные проблемы или количественно сформулированные, в которых существенные зависимости выяснены настолько хорошо, что они могут быть выражены в числах или символах, получающих численные оценки; 2) неструктурированные проблемы или качественно выраженные, содержащие лишь описание важнейших признаков и характеристик, количественные зависимости между которыми совершенно неизвестны; 3) слабоструктурированные проблемы или смешанные, которые содержат как качественные, так и количественные элементы, причем преобладают качественные и неопределенные стороны.

В соответствии с определениями [17] для слабоструктурированных проблем характерны следующие особенности: принимаемые решения относятся к будущему; широк диапазон альтернатив; решения зависят от неполноты знаний; принимаемые решения содержат элементы риска; не полностью установлены требования, определяющие стоимость и время решения проблемы; проблема внутренне сложна вследствие того, что для ее решения необходимо комбинирование различных ресурсов.

Все требования могут быть полностью отнесены и к проблеме геологического прогнозирования. А.Б. Каждан и Н.Н. Соловьев [6] отметили, что геологические объекты представляют собой классические, плохо организованные системы, не поддающиеся количественному описанию. Часто понятие закона при их описании заменяется понятием модели.

Важнейшей особенностью слабоструктуризованных проблем является то, что их модель может быть построена только на основании дополнительной информации, получаемой от человека, участвующего в решении проблемы. При этом исчезает возможность построения беспристрастных, формальных моделей [17].

Поскольку граница между классами хорошо- и слабоструктуризованных проблем нечеткая и однозначная, отдельные исследователи переоценивали возможности формальных методов при решении этих проблем. Это обстоятельство может быть распространено и на проблему геологического прогнозирования, что и приводило к отдельным неудачам и недостаточной эффективности в применении различных формальных моделей при решении некоторых задач прикладной геологии. Впервые обратил внимание на это несоответствие акад. В.И. Смирнов, отметив, что, если математику нельзя игнорировать, ее нельзя и считать первоосновой научного мышления геолога. При наличии противоречий между геологическими и математическими выводами истина, по его мнению, скорее лежит в геологической сфере. Р.М. Константинов подчеркивал, что при решении металлогенических задач методом аналогий геологические знания исследователя, его интуиция играют решающую роль, а значение математических методов здесь пока минимально [12]. Вместе с тем многие геологи считают целесообразным использование математических методов для обобщения имеющейся информации. При этом, как отметил А.Б. Каждан, формализация подвергается не вся геологическая наука, а только объект непосредственного анализа в соответствии с поставленной задачей [6 и др.]. Такой процесс рассматривается им как геолого-математическое моделирование. В то же время это ни в коей мере не исключает необходимости дальнейшей формализации понятийного аппарата геологии, как основы ее последующего научного развития.

Анализируя причины недостаточного применения математических методов в геологии, Ю.А. Воронин [4] отмечает слабое математическое образование геологов, отсутствие примеров построения удачных математических моделей решения принципиально важных геологических задач (в частности, геологического прогнозирования) и инерционность мышления исследователей. Одна из причин такого положения объясняется прежде всего тем, что в начальной стадии внедрения математики в геологию попытались применить формально-аналитические методы анализа информации для решения слабоструктуризованной проблемы, точнее, проблемы геологического прогнозирования.

На необходимость систематизации соответствия геологических и математических задач указывали Г.А. Папазоглу и другие исследователи [23]. Они считали, что на этой основе могут быть созданы технологические линии обработки информации для последующего принятия решений.

Следует отметить также, что применение главной методологической основы геологического прогнозирования — принципа аналогии — теоретически предполагает максимальное использование всевозможных признаков сопоставляемых объектов и явлений. На практике, однако, имеется тенденция выделения при геологическом прогнозировании на традиционной основе минимального количества так называемых "информативных признаков". По-видимому, относительно небольшое число признаков обуславливает недостаточную эффективность применения этого принципа при геологическом прогнозировании. Скорее всего, это объясняется, с одной стороны, собственно геологическими причинами (недостаточная информация об объектах прогноза), а с другой — ограниченными аналитическими возможностями человека (исследователя). Как показывает структурная лингвистика, число составляющих "глубоких фраз" языка обычно не бывает более семи. Опыты психологов свидетельствуют также, что кратковременная память человека имеет небольшую емкость и содержит семь структурных единиц информации. Поэтому задачи сравнения (анalogии) с оценками по многим критериям сложны для человека. В то же время человек стремится делать такой выбор, который впоследствии может быть легче оправдан [23].

Как отмечает А.А. Дородницын, информатика внесла два основных метода в решение задачи прогнозирования (диагностирования) явлений, изучаемых описательными науками: метод математического моделирования и метод распознавания образов. Однако критериев априорной оценки полноты системы признаков пока нет. Это еще дело интуиции. Распознавание образов более успешно используется при значительном количестве признаков (многие десятки и сотни), но такие возможности анализа информации уже не под силу человеку, не вооруженному современной вычислительной техникой.

Таким образом, применение ЭВМ в дополнение к традиционным методам сопоставительного анализа геологических рудных объектов на основе принципа аналогии позволит увеличить количество сопоставляемых факторов и признаков и тем самым будет отвечать главному условию эффективного использования этого принципа при решении задач геологического прогнозирования. Увеличение числа сравниваемых характеристик позволит более полно извлекать косвенную информацию о геологических закономерностях локализации рудных объектов. Поскольку геологическая информация имеет не всегда достаточно формализованный вид, более широкое применение при геологическом прогнозировании эвристического подхода, находящегося на стыке формальных

Таблица 2. Типы проблем, методы и системы, используемые для их решения

Проблемы	Процессы	Модели	Методы решения	Поле деятельности человека	Системы, используемые для решения
Хорошо структурированные	Формализованные	Математические, физические, инженерные	Формально-математические	Алгоритмизация, анализ (интерпретация, подсчет запасов, изучение статистик и т. п.)	Автоматические, автоматизированные
Слабоструктурированные	Частично формализованные	Эвристические, имитационные, математические	Геолого-математические, графоаналитические, логико-информационные, человеко-машинные	Творческое исследование, моделирование, анализ, геологическое прогнозирование	Автоматизированные, человеко-машинные (информационно-прогнозирующие и экспертные)
Неструктурированные	Неформализованные	Эвристические, имитационные	Логико-информационные	То же	То же

и неформальных методов, в настоящее время вполне оправданно. Человеко-машинные методы как раз и помогают реализовать этот подход, объединяя в одном методологическом ключе опыт, знания и интуицию человека с возможностями хранения, обработки и формально-логического анализа больших объемов многофакторной информации с помощью ЭВМ. В табл. 2 приведена краткая характеристика хорошо-, слабо- и неструктурированных проблем применительно к задачам геологического прогнозирования.

Как следует из табл. 2, человеко-машинные методы являются аппаратом (инструментарием) творческого исследования, моделирования и анализа слабоструктурированных проблем.

На первых этапах развития прикладной геологии задачи геологического прогнозирования решали, как правило, отдельные исследователи, а прогнозные заключения носили характер индивидуальных рекомендаций. В дальнейшем такие заключения стали чаще составлять на основе коллективных выводов. Развитие и внедрение математических методов в практику геологических исследований привели к появлению различных формальных постановок задач геологического прогнозирования (регрессионная, статистико-игровая, информационная, кластерная, распознавание образов и другие модели).

Понимание сложности решения проблемы геологического прогнозирования в условиях слабоформализованной информации приводит к необходимости учета знаний и опыта специалиста, как лица, принимающего решение (ЛПР) в сочетании с использованием ЭВМ. Следовательно, мы подходим к тому, с чего начиналось решение задач геологического прогнозирования — к использованию опыта и интуиции геологов, но уже на качественно новом уровне: с частичной формализацией понятий, с переходом на количественные оценки отдельных параметров, с применением современных технических средств, многократно увеличивающих творческие возможности геологов по анализу и комплексной интерпретации разнородной информации.

Решение слабоструктуризованных проблем, осуществляемое в человеко-машинном режиме, связано самым непосредственным образом с типом и характером мышления человека. Известны два типа научного мышления: интуитивное и систематическое [23].

Видимо, следует подчеркнуть, что применение интуитивных методов в прикладной геологии не только оправдано, но и необходимо. Интуиция — это накопленный специалистом в процессе практической деятельности подсознательный опыт, умение по отдельным фрагментам представлять конечный образ. В соответствии с этим геологическое прогнозирование должно осуществляться как на интуитивной, так и на систематической основе. В свою очередь, систематическое мышление бывает образным или логическим. При решении геолого-прогнозных задач интуитивный подход может реализоваться с помощью методов экспертных оценок, эвристического моделирования и т.д. Систематический подход предполагает использование наряду с этим разнообразного математического аппарата, построенного главным образом на статистическом анализе, распознавании образов и т.д., а также применение логико-информационных методов. Основой составления геологических прогнозных заключений остается во всех случаях принцип аналогии.

При интуитивном подходе в качестве эталонных аналогов используют эмпирические модели и представления геологов; на основе образного подхода в качестве аналогов могут применяться математические модели. Наконец, генетический подход предполагает в качестве исходных объектов-аналогов фактические объекты или логические модели. Таким образом, во всех случаях при решении задач геологического прогнозирования используются (или предполагаются для использования) в качестве исходного объекта-аналога (образа) геологические рудные объекты различных уровней системной иерархии. Цель исследований — добиться создания моделей (образов) позиций, в которых решающая роль принадлежит рудоконтролирующим факторам [6, 13, 37, 47 и др.]. Иными словами, процесс геологического прогнозирования немислим без использования аналогов (природных или теоретических). Все это позволяет лучше представить и увязать проявление единства таких противоположностей, как системно-структурный и генетико-исторический под-

ходы, взаимно дополняющие друг друга при решении задач геологического прогнозирования.

Геологическое прогнозирование, являясь слабоструктуризированной проблемой, определяет тем самым сложность принятия в последующем решений по результатам прогноза выбора единственного решения. По современной терминологии, такого рода решения носят название "проблем уникального выбора" [17]. Им свойственны: уникальность, неповторяемость ситуации выбора решения; сложный для оценки характер рассматриваемых материалов; недостаточная определенность последствий принимаемых решений; наличие совокупности разнородных факторов, которые следует принимать во внимание; наличие лица или группы лиц, ответственных за принятие решения (ЛПР). В ситуациях принятия уникальных решений всегда существует нехватка информации, восполнить которую можно лишь верой в одну из возможных гипотез.

Геологические рудные объекты — это очень сложные природные системы, и в силу этого их исследование необходимо осуществлять на основе системно-информационного анализа, который не подменяет содержательный анализ геологических процессов в их сложной взаимосвязи, а, наоборот, дополняет его, являясь методологией изучения сложных проблем и явлений. Поэтому представляется весьма перспективным использование для целей прогноза минеральных ресурсов человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации геологической информации, что позволяет учитывать при выработке вариантов решений наряду с формальными данными также неформализованные или слабоформализуемые сведения о рудогенезе, отражаемые в виде опыта и интуиции специалистов. Однако это требует освоения геологами навыков построения системно-информационных моделей природных геологических объектов и умения работы с диалоговыми системами в интерактивном режиме.

Таким образом, в современных условиях дальнейшее совершенствование традиционных методов геологического прогнозирования как слабоструктуризированной проблемы возможно на основе дополнения классических методов анализа геологической информации человеко-машинными методами.

Решение содержательных геологических задач должно производиться по информации, сохраняемой в территориальной машинной базе геологических данных, на основе сочетания различных методических схем (формальных и неформальных) обработки и анализа исходного материала. Характерная особенность процесса решения слабоструктуризованных проблем — это непосредственное участие геолога-интерпретатора, который в процессе решения конкретной задачи геологического прогнозирования анализирует промежуточные результаты и в диалоговом режиме вносит необходимые коррективы, не допуская, например, абстрактных или абсурдных результатов. Смысл такого диалога состоит также и в том, что специалист, постепенно осваивая возможности цело-

веко-машинных методов, получает инструмент, резко увеличивающий возможности формально-логического анализа исходных данных, т.е. повышающий производительность его творческого труда.

## АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В прикладной геологии долгое время прогнозирование считалось составной частью металлогенического анализа. Благодаря основополагающим трудам советских ученых (Ю.А. Билибина, В.И. Смирнова, Е.Т. Шаталова, А.Д. Щеглова и др.) геологический прогноз в настоящее время признан в качестве самостоятельного научного направления.

Вопросы методики геологического прогнозирования рассматривались в работах В.В. Белоусова, М.И. Котляра, В.Е. Хаина и др. (металлогения регионов); Ф.И. Вольфсона, А.Б. Каждана, Н.П. Лаверова, П.А. Шехтмана и др. (методические аспекты прогнозирования рудных полей и месторождений полезных ископаемых).

Успешному использованию математических методов при геологическом прогнозировании во многом способствовали работы Ю.И. Журавлева, Р.М. Константинова, Д.А. Родионова, И.Д. Савинского и многих других исследователей и ученых. Большое значение для создания систем геологического прогнозирования имели научные труды А.П. Куклина, В.В. Ломтадзе, А.А. Сапункова, В.А. Яковлева и других специалистов. Активно используются в последнее время при решении задач геологического прогнозирования информационный, кибернетический и системный подходы Л.Н. Дуденко, А.Н. Еремеева, Э.А. Немировского, Б.А. Чумаченко и др. Таким образом, к настоящему времени имеются необходимые предпосылки для создания методов, которые позволили бы осуществить автоматизацию (хотя бы частичную) процесса геологического прогнозирования месторождений рудных полезных ископаемых, т.е. некоторую формализацию отдельных процедур и использования для этих целей ЭВМ.

Рассматривая металлогению как совокупность проявлений металлического оруденения, осмысленных с точки зрения тех геологических закономерностей, которые управляют их распределением во времени и пространстве, Ю.А. Билибин определил прогнозирование как составную часть металлогенических исследований. Основополагающее значение для развития работ по геологическому прогнозированию имели работы В.И. Смирнова, который впервые охарактеризовал металлогению территории СССР. Е.Т. Шаталовым в качестве задач металлогении определены: выявление закономерностей распределения рудоносных площадей в пространстве и времени; изучение критериев связи оруденения с комплексом геологических условий, влияющих на процессы минерализации,

систематизацию типовых особенностей рудоносных площадей и прогнозирование новых рудоносных площадей.

П.А. Шехтман и В.А. Королев определяют прогнозирование размещения полезных ископаемых в земной коре как естественный результат металлогенических исследований разных направлений и любой детальности [47]. При этом крупные гидротермальные месторождения рассматриваются в качестве составной части рудогенерирующей системы.

Анализируя последовательность решения задач при прогнозно-металлогенических исследованиях, Д.В. Рундквист выделяет следующие четыре основных этапа [37]: 1) выделение перспективных структурно-металлогенических зон, определение рудоносных геологических и рудных формаций; 2) оконтуривание металлогенических и рудных зон, определение главных типов оруденения на основе анализа связей геологических и рудных формаций; 3) локализация перспективных площадей до выделения рудных зон и рудных полей на основе анализа рудоконтролирующих факторов и критериев прогнозирования отдельных формационных типов месторождений; 4) количественная оценка прогнозных ресурсов минерального сырья в пределах зон, районов и полей с выявленными признаками минерализации.

А.Н. Еремеев [5] сформулировал необходимость выделения применительно к общему процессу геологоразведочных работ иерархических уровней, соответствующих стадиям этого процесса. Вместе с тем он считает целесообразным отказаться от термина "прогноз" в прикладной геологии, заменив его термином "оценка" или "перспективы" какого-либо объекта.

Рассматривая с позиций системного подхода геологические объекты прогноза, поиска и разведки редкометалльного оруденения, А.Б. Каждан [6] предлагает использовать четкую системную иерархию геолого-структурных уровней: рудная провинция, рудный район, рудный узел, рудное поле, рудное месторождение и т.д. Он подчеркивает, что эти геолого-структурные уровни рудоносных образований земной коры отражают только общую тенденцию к размещению рудных скоплений в земной коре и что полная иерархия всех рудоносных структурных уровней наблюдается лишь в пределах крупных и сложных по строению металлогенических единиц (таксонов). А.Б. Каждан приходит к исключительно важному выводу, что крупные масштабы оруденения возможны лишь при совпадении благоприятных глобальных, региональных и локальных рудогенерирующих факторов. Такое совместное (телескопированное) влияние факторов следует учитывать особо при геологическом прогнозировании. Он подчеркивает, что игнорирование этого принципа при геологическом прогнозировании и в геологической практике приводит к отрицательным результатам.

Э.Я. Островский, А.А. Урсов и Р.С. Конторович [32] под прогнозом понимают решение задач двух типов: 1) интерпретацию или определение "прошлых" состояний среды (системы, процесса) в интервалах между

координатами, в которых эти состояния известны; 2) экстраполяцию или определение "будущих" состояний среды вне указанных координат. При геологических исследованиях такими координатами являются те участки месторождений или рудопроявлений, на которых были проведены различные геологоразведочные работы с целью прямой индикации какого-либо целевого признака: концентрации полезного компонента, формы нахождения его в породах, рудоконтролирующих факторов и т.д.

Б.Г. Башкиров и Ю.В. Попов определяют прогнозирование как начальный этап поисков, этап научного обоснования их [1]. Они считают, что если в других науках прогнозирование является индуктивным процессом, при котором действительность и знание общих законов развития позволяют моделировать будущее, то в геологии основой прогнозирования являются дедуктивные исследования, при которых конечное — это действительность, и использование законов геологии и фундаментальных наук (физики, химии, математики, механики и др.) позволяет создавать модели прошлого. Эти авторы также выделяют этапы глобального, регионального и локального прогнозирования.

А.И. Кривцов и В.А. Нарсеев [14] рассматривают прогнозные исследования как естественные звенья геологоразведочного процесса, занимающие "межстадийное положение", замыкающие каждую стадию (подстадию) с целью обоснования возможностей перехода к более детальным работам. Такая постановка является, по существу, дальнейшим развитием и конкретизацией идей о значении процедуры геологического прогнозирования и ее месте в геологоразведочном процессе, опубликованных в работе Б.А. Чумаченко, Е.П. Власова и В.В. Марченко [45].

— Сознвая, что в рамках настоящей работы практически невозможно проанализировать все имеющиеся подходы к проблеме геологического прогнозирования, и, ограничившись рассмотренными выше подходами, попытаемся с точки зрения главной цели нашего исследования — разработки методологических основ и приемов — определить принципы, использование которых позволило бы обеспечить рациональное сочетание знаний, опыта и интуиции геологов с возможностями современных средств накопления, обработки и анализа данных, т.е. создать основы человеко-машинных методов геопрогноза.

Во-первых, подчеркнем необходимость соблюдения принципа системности, т.е. определение и формулирование четких конечных целей геологического прогнозирования на каждой стадии геологоразведочного процесса. Во-вторых, следует определить методологические основы (принцип) анализа информации геологами при разработке вариантов прогнозных решений. Наконец, необходимо изучить внутреннюю структуру геологического прогнозирования на каждой отдельной стадии с точки зрения возможности "встраивания" в данный процесс, где это

целесообразно, методов формально-логического анализа с использованием ЭВМ.

Наиболее полно основные методологические принципы геологического прогнозирования сформулированы А.Б. Кажданом [6 и др.].

1. Принцип последовательных приближений, обеспечивающий системный подход к изучению недр, т.е. изучение на первых порах (стадиях) геологоразведочного процесса геологических рудных объектов высших уровней системной иерархии: металлогенических провинций, областей, рудных районов, а на последующих и конечных этапах — объектов более низких уровней (рудных полей, месторождений, залежей). В соответствии с этим принципом весь геологоразведочный процесс естественно разделяется на ряд стадий, при реализации которых осуществляется изучение исследуемых территорий, начиная от мелкомасштабных и кончая крупномасштабными работами, при этом последовательно отбраковываются бесперспективные территории, площади, участки и т.д.

2. Принцип аналогии является основополагающим в случае применения геологической информации при прогнозировании. Использование его обуславливается тем, что при оценке геологических рудных объектов специалисту, как правило, приходится принимать решения о перспективности тех или иных объектов в условиях дефицита информации об объекте исследования. Большую помощь при этом могут оказать эталонные объекты-аналоги: известные рудные объекты соответствующего уровня системной иерархии или теоретические представления и опыт геологов. Как правило, чем меньше их (т.е. исследуемых рудных объектов, — *В.М.*) размеры и меньше расстояния между ними, тем больше сходства проявляется в таких геологических рудных объектах.

3. Принцип выборочной детализации, позволяющий в процессе геологоразведочных работ осуществлять более детальное изучение отдельных, наиболее типичных и представительных участков, с тем чтобы обеспечить высокую экономическую эффективность затрат на выявление новых месторождений. При этом важное значение приобретает правильный выбор эталонных участков для выполнения детальных работ на их аналогах.

Необходимость соблюдения этих положений признается большинством исследователей. Нами предпринята попытка обобщить рекомендации отдельных авторов и на их основе сформулировать цели геологического прогнозирования на некоторых стадиях геологических исследований применительно к рудным объектам различных уровней системной иерархии (табл. 3). Методология геологического прогнозирования основывается на использовании металлогенического, историко-геологического, структурного, генетического и многих других методов геологического анализа.

При этом для разработки вариантов прогнозных решений используются логические построения, основанные главным образом на принципе аналогии. Р.М. Константинов [12] отмечал, что прогнозы, сделанные на

Таблица 3. Основные цели и объекты геологического прогнозирования на начальных стадиях геологоразведочного процесса (для рудных ископаемых)

Стадии	Выделение перспективных площадей	Оценка прогнозных ресурсов	Иерархические уровни рудных объектов	Объекты прогноза и их размеры, км <sup>2</sup>
Региональные геологосъемочные и геофизические работы масштаба 1: 200 000 (1: 50 000)	Для проведения поисково-съёмочных работ	В пределах крупных территорий P <sub>3</sub> (100%)	Рудная формация	Рудные районы, n · 10 <sup>2</sup>
Поисково-съёмочные работы масштаба 1: 50 000 (1: 25 000)	Для проведения детальных поисков	В пределах оконтуренных рудных узлов и полей P <sub>3</sub> (50–80%), P <sub>2</sub> (20–50%)	Рудоносная формация	Рудные поля, n · 10 <sup>1</sup>
Поисково-оценочные работы масштаба 1: 25 000 (1: 10 000)	Обоснование постановки предварительной разведки и отбраковка рудопроявлений, не имеющих промышленного значения	Предварительная оценка запасов в пределах геологически обоснованных границ благоприятных структур P <sub>1</sub> (50–80%), P <sub>2</sub> (20–50%)	Рудовмещающая формация	Месторождения, n · 10 <sup>0</sup>

основании аналогий, явились первыми металлогеническими заключениями. Под аналогией в кибернетике понимается наличие в двух объектах и более общих условий (например, свойств, отношений и т. п.), позволяющих переносить информацию об одном объекте (модели) на другой (прототип). Определение правил вывода по аналогии является трудной проблемой в области логики науки. При этом, оценивая вывод общности одних свойств и других, полагают, что такой вывод будет тем более правомерным, чем больше свойств установлено у модели и прототипа.

В теории познания аналогия определяется как умозаключение, в котором из сходства некоторых признаков и явлений делается вывод о сходстве других признаков и явлений. В логике под аналогией понимается умозаключение от уже выясненного частичного сходства между предметами группы и отдельным предметом к более полному и глубокому сходству между ними.

Л.Б. Розовский, рассматривая использование аналогии в области геологических наук, определил метод аналогии (или сравнительно-геологический), как метод исследования и прогноза с помощью природ-

ных аналогов. Им введены понятия атрибутивного аналогизирования (моделирование по качественным оценкам) и критериального аналогизирования (моделирование по количественным оценкам) [23].

Р.М. Константинов [12] указывает некоторые общие правила, применение которых повышает точность выводов по аналогии применительно к геологическим объектам: 1) число геологических признаков, используемых для сравнения эталонного и прогнозируемого объектов, должно быть возможно бóльшим; 2) сходные (сопоставимые) признаки должны иметь существенное значение в металлогенической характеристике объектов; 3) сходные признаки должны быть по возможности более разнородными, т.е. должны характеризовать различные группы основных 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.

Рассмотрим на примере некоторых подходов методическую схему процесса геологического прогнозирования, как последовательность разработки геологом вариантов прогнозных решений на отдельной стадии.

Е.Т. Шаталов, А.В. Орлова и К.В. Яблоков приводят следующую этапность работ при металлогеническом исследовании рудного района: 1) определение типа рудного района, особенностей минерализации оруденения и закономерностей размещения рудных объектов; 2) выявление главнейших рудоконтролирующих факторов на размещение оруденения в пределах рудного района данного типа; 3) сопоставление установленных рудоконтролирующих факторов на основе генетической, временной и пространственной связи с ними проявлений минерализации; 4) проведение металлогенического районирования, являющегося основой для оценки перспектив различных частей изучаемого рудного района; 5) составление прогнозной карты и оценка перспектив рудного района и отдельных его частей на основе карты совмещения благоприятных рудоконтролирующих признаков [23].

По П.А. Шехтману, В.А. Королеву и др. [47], при геологическом прогнозировании эндогенных месторождений последовательно решаются следующие задачи: 1) изучение условий размещения и картирование эндогенной минерализации; 2) выявление рудоконтролирующих факторов, их количественное изучение, установление характера и меры их связи с минерализацией; определение границ их оптимального, благоприятного, нейтрального и неблагоприятного значения; оценка их относительной значимости; 3) составление объемной структурной модели исследуемого объекта, ее анализ, определение этапов рудоотложения; 4) графическое размещение всех рудоконтролирующих факторов в их ранговых значениях и выделение геологически (структурно) однородных участков; выявление компактно расположенных благоприятных однородных участков на перспективных площадях (объемах); 5) соб-

ственно геологическое прогнозирование — сопоставление перспективных площадей с фактически установленным размещением минерализации; анализ совпадающих площадей и оценка новых перспективных площадей.

Процесс геологического прогнозирования, по Б.Г. Башкирову и Ю.В. Попову [1], состоит из следующих операций: 1) подразделение исследуемой территории по заданной системе признаков на отдельные блоки (по степени пригодности для прогнозирования); 2) описание в этой же системе признаков эталонных площадей (объектов) с известными месторождениями; выполнение эталонного прогноза и выделение участков с максимальным сходством; 3) анализ геологоструктурных условий перспективных участков на основе генетических гипотез; 4) составление карты прогноза с количественным показателем перспективности. При этом они подчеркивают, во-первых, необходимость участия в процессе специалиста-геолога, который определяет последовательность хода процесса прогнозирования, и, во-вторых, полагают бесперспективным выполнение геологического прогнозирования без наличия эталонов.

По модели коллектива авторов ВСЕГЕИ [41 и др.], геологическое прогнозирование состоит из двух главных этапов: 1) формулирование задачи прогнозирования с учетом изученности, сбор имеющегося информационного материала и его синтез в рациональной геологической форме. На этом этапе важное значение имеют информационные методы; 2) аналитическое исследование, предусматривающее определение типовых геологических обстановок проявления промышленных месторождений и критериев прогнозирования; выделение прогнозных площадей; сравнительную оценку перспективных площадей; количественный подсчет прогнозных ресурсов.

На этом этапе наиболее целесообразно применение математических методов для количественных оценок значимости рудоконтролирующих факторов и выделения перспективных площадей. По мнению исследователей, это позволит значительно повысить качество и эффективность прогнозных исследований.

Рассматривая прогнозно-поисковые работы с позиций системного подхода, В.В. Иванов и Г.М. Мейтув предлагают использовать непосредственно наблюдаемые признаки и опираться не на генетические концепции (во многом спорные у различных авторов), а на достоверные, статистически установленные пространственные взаимосвязи. Такой подход позволил им широко использовать методы математической статистики для раскрытия закономерностей локализации оруденения в некотором статистически-вероятностном интервале пространства: расстояние, площадь, объем и т.д. На основе такого рода вероятностной статистической взаимосвязи комплекса многих переменных (геологических и других

признаков и факторов), по их мнению, можно успешно осуществлять прогнозирование оруденения.

Применительно к некоторым рудным объектам В.В. Иванов и Г.М. Мейтув дали вероятностную систему палеотектонических и геологостатистических оценок, позволяющую определить местоположение месторождений различных металлов и типов в участках земной коры определенной истории развития. Они установили перечень и порядок важности рудоконтролирующих границ, а также пределы расстояний месторождений различных металлов и их типов относительно этих границ.

Такой подход весьма перспективен для применения современных средств информатики при решении задач геологического прогнозирования: он апробирован на практике в различных геологических ситуациях и показал устойчивые результаты. По-видимому, это одна из первых попыток использования картографической геологической информации для получения и практического применения статистических характеристик геологических рудных объектов. Однако "ручная" реализация подхода ограничивала его распространение.

Рассматривая возможные пути формирования основ прогноза и поисков, А.И. Кривцов и В.А. Нарсеев [14] считают, что при любых прогнозных построениях исходными (базисными) являются наблюдаемые обстановки нахождения месторождений. Однако в этом случае неясно, как быть с возможностью обнаружения новых типов рудных объектов. Переходы от известных месторождений, по их мнению, могут быть осуществлены тремя путями: 1) эмпирическим, основанным на учете опыта проведения геологических исследований в конкретных районах. Главный недостаток этого подхода — отсутствие надежных критериев отличия рудных аномалий от нерудных и ограниченные возможности предсказания масштабов оруденения. Все эти недостатки обусловлены качественным характером анализа имеющейся информации; 2) изучением закономерностей размещения месторождений, что предполагает использование значительного количества статистического материала, как результата обобщения фактических данных. Этот путь предполагает использование количественного (хотя бы частично) подхода при прогнозировании рудных месторождений. Заметим, что перевод карт геологического содержания в дискретный вид создает благоприятные предпосылки для получения значительных объемов такого рода статистических данных [20 и др.]; 3) прогнозированием на основе моделей рудогенеза. Такого рода модели строятся непосредственно геологом и учитывают механизм транспортировки и накопления рудного вещества. Недостаточную эффективность этого подхода авторы объясняют тем, что любые генетические построения носят субъективный характер, в то время как главным целям прогноза отвечает лишь часть элементов (факторов) процесса рудогенеза. Оценивая все эти пути, авторы в качестве наиболее

перспективного (базисного) определили процесс изучения закономерностей объектов прогноза, т.е. второй подход.

С учетом рассмотренных выше различных методических схем процесса геологического прогнозирования можно сделать естественный вывод, что геологическое прогнозирование во многом имеет характер творческого научного исследования, отдельные составные части которого могут быть частично формализованы. Геологический прогноз — это одновременно и реализация определенных теоретических представлений, взглядов, гипотез на природу и процесс рудообразования. Оттого, насколько эти представления соответствуют реальной действительности, в конечном счете и зависит качество прогнозных оценок. В ряде случаев прогнозные построения осложняются наличием нескольких, подчас взаимоисключающих взглядов на генезис. Возникает необходимость сопоставления и сравнения альтернативных гипотез с точки зрения их адекватности реальной геологической ситуации, обоснованности и пригодности для описания и объяснения особенностей изучаемого процесса по результатам наблюдений и итоговым прогнозным картам, составленным по идентичной методике. Подобный анализ можно провести методом воссоздания картины процесса рудообразования в его развитии путем конструирования моделей.

При формировании геологических прогнозов Л.В. Оганесян выделяет этапы ретроспективного анализа, диагноза и собственно прогноза [45]. Этап ретроспективного анализа начинается с момента получения задания на прогнозирование и завершается созданием гипотетической модели объекта прогнозирования и выбором метода реализации прогноза. К диагностическим относятся задачи, цель которых — изучить причины и содержание возникающих ситуаций. На этапе диагноза проводится анализ геологической ситуации путем расчленения сложных геологических факторов на отдельные, более простые единицы. В геологической практике к такому типу относятся задачи по изучению геологоструктурных условий локализации месторождений, характера геологических процессов, задачи, связанные с выявлением геологических особенностей рудных объектов различных иерархических уровней, определением закономерностей размещения полезных ископаемых и т.д. Диагностика позволяет уточнить созданную при ретроспективном анализе гипотетическую модель объекта геологического прогноза. Этап собственно прогноза заключается в практическом приложении выбранных методов прогнозирования. При этом определяются направление действия и условия, осуществление которых может привести к появлению прогнозируемого события. На этом этапе должны быть сформулированы критерии для оценки осуществления прогнозируемого события.

Геологический прогноз можно считать прогнозом только в том случае, если в зависимости от поставленных целей предусмотрены варианты действий, которые могут привести к осуществлению прогнозируемо-

го события. Прогноз — это предплановая разработка многовариантных моделей плана. План в отличие от прогноза содержит однозначно определенные сроки и условия осуществления прогнозных решений. Этапы анализа, прогноза и оперативного управления должны находиться в постоянном взаимодействии и характеризоваться наличием развитых обратных связей. При геологических исследованиях необходимо четкое разграничение постановок задач и целей на различных этапах прогнозирования. В настоящее время многие задачи, которые по сути являются диагностическими, часто стремятся решать с целью прогнозов и в результате делаются ошибочные заключения об их необоснованности, хотя на самом деле эти задачи не могли быть решены по критериям, предъявляемым к прогнозам. В результате многие ценные диагнозы не доводятся до стадии прогноза (а тем более планов), получив отрицательную оценку при ошибочном рассмотрении их в качестве прогнозов. Логическая строгость и непротиворечивость вывода и его соответствие основным законам природы являются единственным критерием оценки правильности прогнозного заключения в случае прогнозирования событий, не имеющих аналогов среди известных и прогнозирование которых не может быть обосновано принципом аналогии.

В общем виде проблема прогнозирования геологических рудных объектов (особенно не выходящих на дневную поверхность) может рассматриваться как поиск в геометрическом пространстве участков со значительными прогнозными ресурсами, позволяющими предполагать наличие промышленных концентраций полезных компонентов. Такого рода поиск может осуществляться и при анализе материалов комплексной интерпретации совокупности косвенных геологических, геохимических, геофизических и других признаков рудной минерализации. Данная проблема может быть также сведена к решению ряда частных задач отыскания математических моделей связи между перечисленными косвенными параметрами геологических рудных объектов и масштабностью оруденения. Геологической предпосылкой для постановки подобных задач является представление о существовании вокруг рудных объектов анизотропного околорудного пространства, формирование отдельных свойств которого причинно связано с процессом рудообразования. Процесс рудообразования, как и любой геологический процесс, является многофакторным и протекает в условиях открытой системы, где основными управляющими моментами являются геологическая ситуация, существовавшая в момент рудообразования, и физико-химические условия, определяемые вмещающей средой, типом рудообразующих растворов и т.д. Как отмечается в работе [7], полная иерархия всех структурных уровней прослеживается только в пределах крупных по масштабам и сложных по строению металлогенических единиц. Реализация этих условий при становлении месторождений приводит к неоднородности околорудного и рудного простран-

ства, характеризующегося комплексом косвенных признаков. Сходная макронеоднородность, по-видимому, сохраняется на уровне рудных полей, формаций и металлогенических провинций при значительных вариациях микронеоднородностей.

Пространственные ореолы косвенных признаков локализации оруденения характеризуются специфическим сочетанием геологических, геофизических, геохимических и других факторов; они охватывают все околорудное пространство и включают в себя все геологические рудные объекты. Естественно, что каждый иерархический системный уровень геологических рудных объектов характеризуется специфическим набором такого рода косвенных признаков, отражающих, по существу, геологическую историю становления и развития данного участка земной коры.

Выделение и исследование ореолов косвенных геологических признаков (геологических аномалий, по М.А. Фаворской) на современном этапе развития науки и техники представляются такими же оправданными, как, например, выделение ореолов гидротермальных изменений вмещающих пород.

Таким образом, можно считать, что одним из путей дальнейшего повышения эффективности составления геологических прогнозных заключений является изучение комплексных ореолов косвенных геологических признаков на основе использования методов информатики.

#### **СИСТЕМНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИНФОРМАЦИОННО-ПРОГНОЗИРУЮЩИМ СИСТЕМАМ**

В настоящее время конечным результатом процесса геологического прогнозирования полезных ископаемых в большинстве случаев является составление прогнозных карт различного масштаба в зависимости от детальности проводимых исследований. Прогнозная карта отражает степень перспективности изучаемых площадей на основе прогнозно-минералогических, формационных и других исследований и содержит основные рекомендации по проведению дальнейших геологопоисковых, оценочных и разведочных работ. Металлогенические и прогнозные карты рудных районов, рудных зон и рудных узлов предназначены для выявления закономерностей размещения полезных ископаемых на их территории и служат для прогнозного выделения рудных полей, а иногда месторождений, в том числе скрытых, не выходящих на поверхность. Общепринятые методы и принципы геологического прогнозирования не позволяют избежать большого разнообразия и неоднозначности составляемых различными авторами прогнозных карт. Такое положение обусловлено, по-видимому, огромным многообразием геологических ситуа-

ций, объектов прогнозирования и возникающих при этом связей, которые необходимо анализировать.

На различных стадиях поисково-разведочных работ процесс геологического прогнозирования (как слабоструктурированная проблема) методологически одинаков и состоит в общем виде из следующих процедур. После того как поставлена и сформулирована задача прогнозирования, специалисты изучают имеющуюся по данному району информацию, определяют ее достоверность и представительность, проводят предварительный отбор данных, необходимых для получения прогнозного заключения. Особое внимание уделяется анализу данных по известным рудным объектам, обнаружение которых в пределах исследуемой территории возможно по принципу аналогии. При этом возможны следующие условия, при которых осуществляется прогнозирование: 1) исследуемая территория является определенным геологическим рудным объектом более высокого уровня системной иерархии и имеет объекты, которые могут быть использованы в качестве эталонных; 2) в пределах изучаемой территории отсутствуют эталонные объекты. В таких случаях эталонный образ может быть составлен либо по аналогии с моделью рудных объектов других территорий (статистические модели эталонов), либо на основе теоретических представлений и опыта геологов (эвристические модели эталонов).

На основе имеющейся информации специалисты восстанавливают историю геологического развития исследуемой территории, выявляют место и время возможного образования оруденения. Изучая металлогенические особенности района, специалисты стараются определить эмпирическую связь между отдельными геологическими факторами и масштабами оруденения и разрабатывают поисково-оценочные критерии.

Значительное место занимает ознакомление с металлогенией района, с известными рудными месторождениями и рудопроявлениями; тщательно изучаются особенности расположения месторождений в геологических структурах, геофизических полях, геохимических аномалиях и т.д. Сравнение потенциально рудоносных площадей проводится в соответствующем масштабе исследований с учетом системной иерархии геологических рудных объектов, потому что прямых аналогов в природе нет. Сравнительный анализ, например, рудных районов (в масштабе исследований 1:500 000—1:200 000) выполняют на основе изучения геологических и магматических формаций, вмещающих те или иные объекты гравимагнитных аномалий, размеров в сотни квадратных километров. Сравнение площадей в пределах выделенных рудных районов осуществляют по иной совокупности данных (фациальный состав толщ, гидротермально-метасоматические изменения, непосредственно предшествующие рудоотложению, первичные и вторичные ореолы рассеяния и т.п.). Далее, используя разработанные поисково-оценочные критерии, проводят содержательный геологический анализ исследуемой террито-

рии с целью выделения участков сочетания критериев, благоприятных для локализации оруденения. При этом в качестве главного методологического подхода используется принцип геологической аналогии. На всех уровнях исследования, как правило, за основу принимается историко-геологический подход, в общем виде сформулированный Ю.А. Билибиным: "Процессы минерализации, ведущие к возникновению минеральных, в частности, рудных месторождений, представляют одну из сторон единого и сложного процесса геологического развития земной коры. В своем историческом развитии они теснейшим образом взаимосвязаны с другими сторонами того же процесса, т.е. осадконакоплением, тектоническими движениями (развитием структур), магматической деятельностью, метаморфизмом. Процессы минерализации могут и должны изучаться лишь в своем историческом развитии и в теснейшей взаимосвязи с процессом развития земной коры". В ходе решения прогнозных задач на основе принципа аналогии допускается предположение, что месторождения, относимые к одной и той же рудной формации, могут отличаться друг от друга масштабами оруденения в зависимости от истории геологического развития. На конечном этапе специалисты составляют заключение о проведении дальнейших исследований.

Очевидно, конкретное содержание исследований на каждой из описанных процедур меняется в зависимости от того, на какой стадии геологоразведочных работ производится прогнозирование (меняется собственно объект прогнозирования, рассматриваются различные комплексы факторов и т.д.). Тем не менее описанная общая методическая схема процесса прогнозирования на каждой из стадий остается неизменной и может быть в самом общем виде представлена схемой, изображенной на рис. 2. Анализ процесса геологического прогнозирования позволяет выделить в нем целый ряд процедур, выполнение которых с помощью математических методов и ЭВМ более эффективно, чем традиционными способами. К числу таких процедур следует отнести прежде всего хранение, обновление и первичную обработку геологической, геофизической и геохимической информации, расчет различных статистических характеристик и т.п. При определении рудоконтролирующих факторов и разработке поисково-оценочных критериев традиционными способами, без применения математических методов, большую роль неизбежно играют различные субъективные причины. В зависимости от геологической школы, генетического подхода, практического опыта различные специалисты могут по-разному оценивать, например, важность тех или иных геологических факторов. Следует учесть, что даваемые специалистами оценки значимости факторов и поисковые критерии имеют, как правило, качественный, а не количественный вид. В связи с этим очевидно, что применение соответствующих математических методов для выделения наиболее важных геологических факторов и построения поисково-оценочных критериев на количественной основе

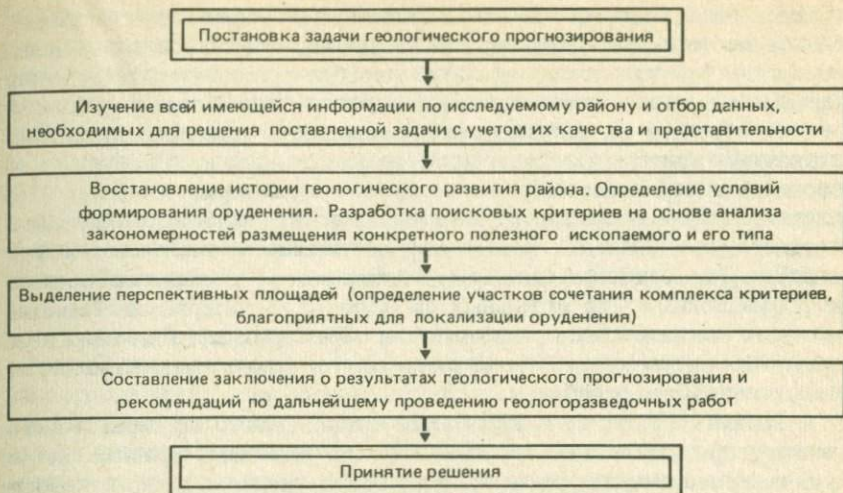


Рис. 2. Обобщенная схема решения задач геологического прогнозирования традиционным способом [5, 45]

может в значительной степени уменьшить влияние субъективизма отдельных исследований на конечный результат и повысить качество прогноза. Вместе с тем переход на количественные методы оценки при геологическом прогнозировании представляется достаточно сложным процессом. Во-первых, как отмечал еще В.В. Белоусов, геологу, воспитанному на качественном образе мышления, трудно усвоить количественный переход к явлению, и, во-вторых, алгоритмизация многофакторного природного процесса представляет значительные трудности. Р.М. Константинов полагал необходимым развитие новой ветви геологической науки – количественной металлогении.

В настоящее время создание такой ветви вряд ли целесообразно. Правильнее было бы ставить вопрос так, чтобы в традиционной металлогении (или прогнозно-геологических исследованиях) постепенно все больше и больше использовались бы количественные методы анализа геоинформации, а может быть был осуществлен и полный переход на такие методы, при условии формализации геологических понятий [4 и др.].

При выделении перспективных участков на исследуемых площадях специалист анализирует отдельные геологические объекты с точки зрения наличия поисково-оценочных критериев, благоприятных для локализации оруденения конкретного типа.

Такой анализ при традиционном прогнозировании проводится, как правило, на основе качественных свойств геологических объектов,

а сам процесс сравнения в соответствии с принципом аналогии выполняется также на качественной, а не на количественной основе. Следовательно, и на этом этапе процесса геологического прогнозирования применение математических методов диагностики и оценки геологических объектов на основе разработанных количественных поисково-оценочных критериев может привести к повышению обоснованности прогноза. В этой связи возникает необходимость в определении способов оценки подобия многофакторных геологических аналогов, т.е. в замене дробного сопоставления аналогов сопоставлением интегральных мер подобия. Такая интегральная мера подобия должна учитывать различные информационные веса отдельных факторов и их интервалов. Развитие математических методов распознавания образов создает благоприятные предпосылки для практической реализации и использования геологами интегральных мер подобия.

Таким образом, на каждом этапе традиционного процесса геологического прогнозирования рудных объектов различных уровней системной иерархии имеются возможности для повышения его эффективности путем применения математических методов и ЭВМ. Поэтому в последние годы наблюдается устойчивая тенденция все более широкого использования ЭВМ и методов теории статистических решений, распознавания образов, многомерного статистического анализа в практике решения прогнозных геологических задач. В соответствии с этим процесс математизации геологии, как естественной науки, благодаря основополагающим работам Д.А. Родионова, А.Б. Вистелиуса, Р.М. Константинова и других вступает в стадию перехода от теоретических изысканий и экспериментов к созданию и применению новых технологий решения задач геологического прогнозирования. Ю.В. Прохоровым и Д.А. Родионовым доказана принципиальная возможность получения решений в геологическом прогнозировании с любой заданной надежностью, например, при разбивке исследуемой территории на перспективные и бесперспективные участки [35].

С помощью математических методов в прикладной геологии, которые являются составной частью внедрения математики в геологию вообще, получают практические выводы из теоретических положений и представлений. В рамках существующих теоретических представлений и моделей объединяются различные подходы к изучению геологических объектов. Один из подходов — генетический, второй основан на исследовании пространственных закономерностей размещения геологических объектов. Часто решение практических задач связано с наиболее сложным генетическим подходом. В результате получается, что решение многих достаточно простых задач сводится к более сложным проблемам. Некоторые геологи активно выступили против этого. Например, Н.С. Шатский подчеркивал, что гораздо проще устанавливать закономерности размещения полезных ископаемых и оперировать с ними, чем с генезисом. Отсюда следует, что важное практическое значение имеет

проблема органичного сочетания вещественно-структурной диагностики геологических объектов по комплексу объективных факторов и признаков с традиционной схемой геологического прогнозирования на основе генетического подхода, т.е. создание человеко-машинных методов геологического прогнозирования.

Прогнозирование оруденения является типичной задачей геологической классификации. Процедура геологического прогнозирования содержит также элементы сравнительной оценки изучаемых площадей, рудных полей, месторождений, рудных тел и т.п. (в соответствии с масштабами работ) с известными практическими (либо теоретическими) эталонами.

Таким образом, процесс прогнозирования является творческим, в котором ведущую роль играют теоретические знания, опыт и интуиция геологов. Определение закономерностей временного и объемного взаимодействия факторов не исчерпывается формально-логическими и арифметическими действиями ЭВМ. Поэтому было бы неправильным ставить вопрос о замене на данном этапе процесса традиционного творческого геологического прогнозирования полностью автоматическим "машинным" прогнозированием. Задача заключается в том, чтобы "встроить" ЭВМ в процесс геологического прогноза таким образом, чтобы предоставить специалистам возможность оперативно использовать разнообразный математический аппарат для формально-логического и количественного анализа имеющейся информации, сохранив за ними постановку задачи, выбор основных факторов и критериев, содержательное истолкование результатов работы ЭВМ и принятие окончательных решений. Кроме того, необходимо на основе системного анализа традиционной схемы геологического прогнозирования и опыта применения математических методов для решения задач прикладной геологии разработать системно-информационную схему взаимодействия человека (специалиста-геолога) с информационно-вычислительной системой, ориентированной на решение задач геологического прогнозирования. В такой схеме следует: 1) в максимальной степени учесть творческие способности и опыт специалистов; 2) использовать большие возможности современных ЭВМ по накоплению, хранению и обработке больших массивов разнородной информации; 3) увязать последовательность решения задач с помощью ЭВМ со сложившейся традиционной методикой геологического прогнозирования; 4) четко разграничить функции специалистов и вычислительной системы; 5) найти способ, резко сокращающий затраты ручного труда по предварительной подготовке и обработке исходной геологической информации.

По-видимому, невозможно свести все многообразие задач практической геологии к одной стандартной форме решения на основе использования математических методов и ЭВМ. Решение конкретной прогнозной задачи требует соответственно последовательности операций диалогового взаимодействия геолога с вычислительной системой информации

банка данных (геологической, геофизической, геохимической и др.). Таким образом, становится очевидной необходимость разработки различных методических приемов, позволяющих геологам решать всевозможные содержательные задачи оценки геологических ситуаций, используя отдельные методические подходы. Вместе с тем различные схемы автоматизированной обработки информации не могут полностью заменить традиционных методов составления геологических прогнозных заключений. Поэтому важно наиболее полно использовать при этом теоретические знания и опыт практической работы специалистов-геологов, т.е. требуется "синтезировать" возможности геологов и современной вычислительной техники.

Учитывая необходимость повышения качества научного прогнозирования, коллективом ученых ВСЕГЕИ [41 и др.] в качестве первоочередных задач для применения математических методов определены как оценка факторов контроля и локализации оруденения, так и выделение рудоносных территорий и оценка их перспективности. Рассматривая различные научные основы и методические подходы, они выделили два наиболее выраженных подхода, условно назвав их "инженерным" и "геологическим".

Принципиальное различие подходов заключается в путях реализации и конечных целях. Первый предполагает создание единой системы прогнозирования, предусматривающей выдачу вариантов прогнозных схем и выбор оптимального варианта непосредственно самим геологом. Цель второго подхода разработка комплексной системы геологического прогнозирования, на разных этапах которой целесообразно сочетание автоматизированных информационно-поисковых систем (ИПС) и систем автоматизированной обработки данных с более широким привлечением геологов в процессе обработки материала. Высоко оценивая систему такого рода, авторы считают, что она может в пределе составлять часть общегосударственной геологической системы прогнозирования.

С учетом изложенного реализация человеко-машинных методов геологического прогнозирования принципиально возможна на основе комплексного анализа информации проблемно-ориентированной диалоговой системы геологического прогнозирования, отвечающей следующим главным принципам. Прежде всего, система должна быть *целенаправленной, простой* и понятной пользователю, *надежной* в смысле гарантии от абсурдных ответов и порчи от неправильных действий пользователя, *удобной* в управлении и обращении, *полной*, с точки зрения возможностей решения главных задач, *адаптивной*, т.е. позволяющей легко переходить к другим модернизациям или обновлять данные, *самообучаемой*, т.е. допускающей постепенное изменение в том смысле, что, будучи вполне простой, она может во взаимодействии с пользователем становиться все более сложной, и, наконец, *совместимой*, позволяющей использовать ее в совокупности с другими (родственными) системами на разных уровнях общности.

Создание такой проблемно-ориентированной системы можно рассматривать как качественно новый этап анализа геологической информации, позволяющий существенно ускорить процесс получения окончательных вариантов решений. Например, на основе таких систем можно осуществлять имитационное моделирование, т.е. оценивать конечные результаты различных гипотез (моделей) и тем самым проверять прикладное значение той или иной геологической концепции. Такое "проигрывание гипотез" напоминает штабные игры, т.е. получение определенных конечных результатов в зависимости от изменяющейся исходной ситуации. Это, в свою очередь, открывает возможности определения с помощью этих систем качества подготовки студентов и специалистов-геологов. Наиболее полно данные требования могут быть удовлетворены лишь при реализации человеко-машинной системы диалогового типа.

В силу изложенного в настоящее время основные усилия специалистов направлены на разработку проблемно-ориентированных систем с такой методикой решения прогнозных задач, которая была бы лишена недостатков формального "машинного" подхода и в полной мере использовала бы столь важные аспекты, как знания, опыт, интуицию и даже талант геологов и возможности ЭВМ по хранению и оперативной обработке огромных объектов накопленной информации.

Система, реализующая рассматриваемый подход, должна содержать:

- четко сформулированные конечные цели;
- исходные данные и информацию для разработки вариантов решений;
- информационные модели рудных объектов как цели прогноза;
- набор алгоритмов и программ переработки данных по заданным технологиям;
- технические средства (ЭВМ, периферийные устройства: дигитайзеры, видеотерминалы, графопостроители и др.);
- промежуточные результаты и варианты конечных решений;
- лицо (или группу лиц), принимающее решение (специалисты, геологи-интерпретаторы).

Основные функции такой интерактивной системы геопрогноза должны состоять в следующем:

- построение геологических моделей объектов прогноза по имеющейся исходной информации;
- расчет вариантов прогнозных решений на основе человеко-машинных методов анализа;
- выбор оптимального варианта для обоснования пути достижения цели (объекта прогноза) с учетом выбранных критериев.

Фундаментальной информационной основой такого рода геологических прогнозных построений должна быть комплексная геологическая характеристика исследуемых рудных объектов разных иерархических системных уровней. Это обстоятельство обуславливает необходимость

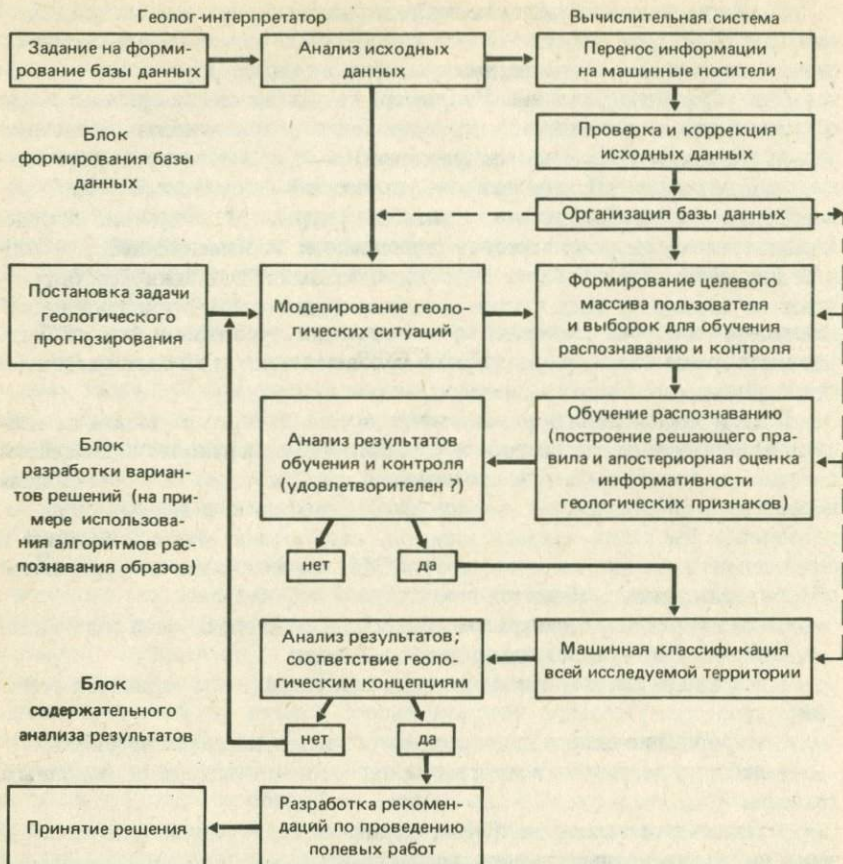


Рис. 3. Принципиальная схема человеко-машинного взаимодействия при решении задач геологического прогнозирования [45].

Сплошные стрелки – последовательность выполнения операций; пунктирные – передача информации

получения количественных характеристик информации, в том числе содержащейся и на различных геологических картах. На рис. 3 на примере использования метода распознавания образов приведена принципиальная схема человеко-машинного взаимодействия. При реализации этой схемы наследуется традиционная схема процесса разработки вариантов геологических прогнозных решений (см. рис. 2).

Особо отметим, что такого рода человеко-машинная система должна быть проблемно ориентирована на конечного пользователя – геолога-интерпретатора. Она должна реализовать процесс комплексной интер-

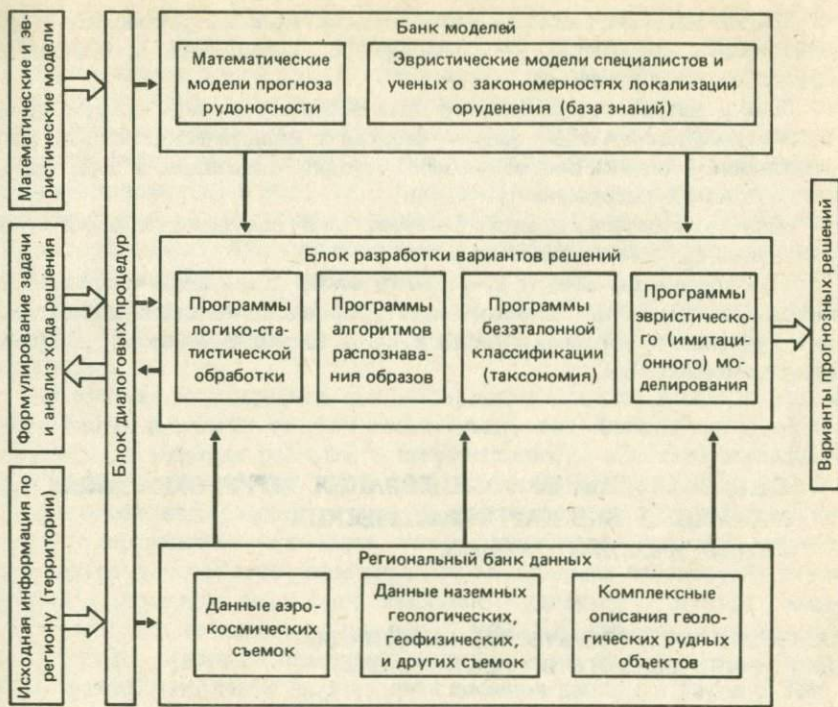


Рис. 4. Структура системы РЕГИОН [21]

претации результатов геологических, геофизических, геохимических, аэрокосмических и других съемок. Предварительная обработка, например, геофизических и геохимических измерений не является функцией этой системы. Такого рода преобразования и получение соответствующих схем интерпретации (промежуточных для прогноза результатов) является задачей других проблемно-ориентированных систем (геофизических, геохимических и др.). В противном случае система геопрогноза станет громоздкой, будет отвлекать геолога-интерпретатора от решения главной задачи — быстрого и надежного выявления участков, перспективных для локализации геологических рудных объектов. Принципиальная схема человеко-машинной системы отвечает изложенным требованиям (рис. 4). Она состоит из следующих основных частей:

блока ввода исходной геологической информации всех видов (в том числе картографической);

территориального банка геологических, геофизических, геохимических и аэрокосмических данных;

банка математических и эвристических моделей закономерностей локализации оруденения и размещения месторождений, составленные специалистами и учеными;

блока разработки вариантов прогнозных решений, содержащего программы, реализующие математические и эвристические модели распознавания и оценки геологических ситуаций, описанных в многопараметрическом пространстве признаков;

блока обеспечения диалога пользователей геологов-интерпретаторов с системой на естественном языке.

Важной предпосылкой для практической реализации человеко-машинной системы геологического прогнозирования является автоматизация хранения и обработки геологической картографической информации с помощью ЭВМ.

### **Глава 3. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ МАШИННЫХ БАЗ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

#### **ЗНАЧЕНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

Анализ развития естественных наук свидетельствует, что их совершенствование на определенных этапах как в теоретическом, так и в прикладном аспекте осуществлялось на основе привлечения математического аппарата для построения фундаментальных и частных моделей описания исследуемых объектов, их свойств и признаков, а также для анализа связей, существующих между ними. Видимо, справедливо с этих позиций в современных условиях научно-технической революции оценить значение геологической картографической информации для составления прогнозных заключений и оценки геологических объектов с помощью ЭВМ. Многие исследователи признают, что использование картографических данных при моделировании геологических объектов и явлений позволяет наряду с генетическим подходом широко использовать и статистические модели. Это положение ни в коей мере не умаляет исторически сложившегося генетического подхода к изучению геологических объектов, но, напротив, дополняет и обогащает его. Применение современных средств обработки информации на базе математических методов и ЭВМ открывает широкие перспективы комплексного использования различной картографической информации, в том числе данных космических съемок, при решении задач прикладной геологии. Геологические карты (и вообще карты геологического содержания) являются уникальными документами человеческой дея-

тельности (с точки зрения информационной емкости). На них находят отражение геоморфология, литология, стратиграфия, тектоника, палеогеография, метаморфизм, оруденение и другие составляющие общего длительного процесса геологической эволюции данного участка земной коры. Иными словами, геологическая карта содержит информацию о времени (возрасте образования горных пород), пространстве (их взаимном расположении) и материи (их составе). Один стандартный лист геологической карты содержит информацию более 10 млн. бит (геологического содержания). Аналогичного размера космический снимок имеет не более 500 тыс. бит информации такого содержания.

Площадь в  $1 \text{ см}^2$  топографической карты имеет статистическую информацию, для описания которой требуется 20 машинописных страниц текста.

Различная картографическая информация широко используется на всех этапах и стадиях геологоразведочных работ. Значение этой информации для принятия решений о перспективности объектов исследований колеблется от 30 до 100 % [45]. Оценивая общее значение картографической информации в современных условиях, Е.Е. Ширяев [48 и др.] справедливо указывает, что традиционная карта продолжает оставаться лучшим средством передачи информации человеку. В то же время в исходном виде карта является неудобным носителем геoinформации для ее анализа с помощью ЭВМ. Е.Е. Ширяев отмечает, что в настоящее время в области кибернетики стоит первоочередная задача — разработать такие формы представления данных и ввода в ЭВМ, которые были бы доступны и человеку, и ЭВМ. От этого зависит эффективность диалога человека с машиной, его взаимодействие с ЭВМ в процессе совместной работы. В этом отношении ведущая роль принадлежит именно картографической форме отображения информации. В прикладной геологии в настоящее время усиленно развивается направление разработки стандартных, унифицированных форм описания геологических объектов. Вместе с тем в геологической науке и практике уже имеется такой стандартный документ адекватного отображения геологических ситуаций — геологическая карта. Карта понятна и читаема, имеет стандартные условные обозначения (легенду) и международную разграфку. Без геологических карт геология немыслима как наука. Видимо, тот факт, что в исходном виде карты геологического содержания не могут анализироваться ЭВМ с той же тщательностью, с какой это делают геологи, в какой-то мере сказался и на формировании мнения вообще о трудности использования ЭВМ в данной области. Но именно в том и состоит проблема, чтобы каким-либо образом трансформировать геологическую карту и перевести ее в вид, который можно применить для анализа с использованием современной вычислительной техники без потери информации, содержащейся в исходных данных. В настоящее время создалась своеобразная ситуация, когда вспомогательная по значению информация, например геофизические и геохимические карты,

обрабатывается без особых сложностей с помощью ЭВМ, в то время как геологическая карта — основной носитель сведений об особенностях геологического строения и эволюции исследуемой территории — не поддается в необходимой степени такой обработке. Другой причиной недостаточного использования ЭВМ для анализа карт геологического содержания является, по-видимому, то обстоятельство, что на практике довольно часто соседние листы карт, составленные различными исполнителями, не "стыкуются" между собой, что вообще делает невозможным их совместный анализ. Скорее всего, именно более широкое внедрение машинных методов хранения картографической информации позволит ускорить исключение подобных фактов. Как носитель информации геологическая карта выгодно отличается от известных машинных носителей первичностью и наглядностью восприятия информации, доступностью широкому кругу специалистов, возможностью упрощения взаимодействия человека с машиной при обработке данных, возможностью произвольной выборки заданной информации, высокой информативной емкостью. Нельзя не согласиться с Е.Е. Ширяевым, что, поскольку карта одновременно отвечает принципам графического и математического моделирования, ее можно назвать графоматематической моделью, использующей для передачи информации свой, присущий только картографии, язык. Это делает ее самостоятельной, выдвигая в ряд особых моделей. В самом деле, картографическая геологическая информация, даже в упрощенном виде, при машинном прогнозировании применяется многими исследователями, и на этом пути имеются определенные успехи, не вызывающие уже скептического отношения, по крайней мере, у большинства специалистов. Ю.Г. Леонов и В.Н. Шолпо справедливо указывали, что представление о качественном характере геологической информации не является препятствием для использования математических методов. Они считают, что формализацию понятий в геологии следует проводить в первую очередь путем совершенствования "традиционных" понятий геологии; геологическая картографическая информация представляет собой в этом плане благоприятный объект для такой формализации. Специалисты в области геологического прогнозирования в качестве первоочередной проблемы, решение которой позволит осуществить качественно новый переход на количественные методы прогноза, выдвигают необходимость разработки методов введения в ЭВМ самого изображения карт, а не их словесного описания, т.е. создание "банка карт" [41].

Отрицание ценности понятия "геологическая карта" сторонниками чисто формального определения геологических понятий резко критикуется специалистами.

Весьма плодотворными явились идеи М.А. Фаворской о содержании понятия "геологическая аномалия". Под такой аномалией понимается статистически значимое отклонение на данном участке тех или иных геологических признаков однородных геологических объектов от гос-

подствующего фона, соответствующих признаков подобных объектов на данном этапе развития структуры в целом. Изучение эволюции таких аномалий было определено как перспективное направление геологических исследований. М.А. Фаворской впервые приведена классификация геологических аномалий различных порядков и высказано предположение о том, что одна из главных причин возникновения аномалий длительного проявления тектонической активности сквозных глубинных зон нарушений и отдельных локальных участков в их пределах. При этом крупные рудные месторождения должны рассматриваться как геологические аномалии на фоне более мелких рудопроявлений [44 и др.]. М.А. Фаворская считает, что применительно к интерпретации аномалий подобного типа в ближайшее время будет разработан не только качественный, но и количественный подход. Д.В. Рундквист, рассматривая геологическую формацию как один из иерархических уровней природных геологических тел, выделяемых по составу и структуре, определяет ее как статически устойчивую природную закономерность [37 и др.].

Наибольшее значение картографическая информация приобретает на этапе регионального прогнозирования. Оценивая значение математических методов в этом аспекте, Р.М. Константинов и А.Д. Щеглов отмечают их особую роль в выявлении районов со скрытым оруденением, а также в решении других кардинальных проблем геологии рудных месторождений [12 и др.]. Напомним, что на основе более точных методов анализа картографической геологической информации возможно выделение ореолов косвенных геологических признаков геологических рудных объектов различных системных уровней. Наконец, на основе человеко-машинных методов анализа картографической информации с использованием ЭВМ открывается возможность проведения картографического моделирования, представляющего собой совершенно новую область моделирования, которая требует непременно участия геолога в проведении исследования [48]. Таким образом, становится ясным огромное значение геологической картографической информации как исходной базы данных для выполнения и автоматизированного прогнозирования с использованием современных средств обработки данных.

В настоящее время специалисты, занимающиеся поисками и оценкой месторождений полезных ископаемых в пределах конкретного региона, располагают большими объемами геологической информации, требующей систематизации, многоаспектного анализа, переосмысливания и периодической проверки. Многочисленные примеры свидетельствуют о том, что существующее информационное обеспечение не соответствует требованиям, необходимым для успешного использования современных средств обработки картографической информации на основе математических методов и ЭВМ. Многие исследователи-геологи, использующие ЭВМ, чувствуют некий барьер, не позволяющий широко и плодотворно применять математический аппарат в научных и производственных це-

лях. Если ранее это был барьер недоверия к возможностям использования математических методов для описания геологических явлений и ситуаций, то сейчас одной из главных тормозящих причин, затрудняющих использование ЭВМ, является несоответствие исходной геологической картографической информации стандартным требованиям, предъявляемым современными ЭВМ. Использование для решения отдельных задач геологического прогнозирования даже простейших статистических методов требует большого объема подготовительных работ, связанных со сбором и кодировкой информации. При сравнении объектов исследования часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда объекты одного характера (масштаба) описаны различными наборами несопоставимых признаков. В то же время последовательное внедрение ЭВМ для хранения и обработки геологических данных благоприятно влияет на эволюцию геологической документации в отношении постепенного приспособления ее к требованиям, предъявляемым технологией машинной обработки. Существующий процесс перевода исходной геологической информации на машинные носители и ее кодирования характеризуется большой трудоемкостью. Главное преимущество использования ЭВМ — это возможность анализировать большие массивы разнородной информации. Однако чем больше исходных данных, тем сложнее их предварительная подготовка. Например, при машинном анализе информации одного листа геологической карты масштаба 1:200 000 (площадь в 5200 км<sup>2</sup>) по 50 факторам требуется снять с различных карт и закодировать исходные данные общим объемом до 260 000 чисел. Если учесть, что при этом должны быть исключены ошибки, то задача предварительной подготовки данных представляется практически невыполнимой. Геологи, занятые на производстве, не обладают возможностями для подготовки таких объемов исходных материалов в целях их последующего анализа с использованием ЭВМ. Таким образом, необходимо разработать принципиально иной подход, который позволил бы резко снизить затраты ручного труда на процедуры подготовки и кодирования исходной информации без потерь ценности исходных данных.

Впервые такой подход в общем виде был сформулирован А.П. Кулиным. Одним из недостатков такого подхода являлось то, что исходные материалы предлагалось кодировать лишь в бинарном виде. В этом случае поверхность карты с областями распространения некоторого фактора разбивалась по геометрической сети на элементарные ячейки, которым присваивался знак "1", если в них присутствовал данный фактор, или "0" — если отсутствовал. Однако при последующем машинном анализе закодированного таким образом материала терялась значительная часть информации, учитывающая взаиморасположение отдельных точек фактора относительно его контура (контакта с другими факторами). Из практики геологического прогнозирования известно, что

влияние отдельных факторов, в частности на процессы рудогенеза, не ограничивается лишь областью их локализации, а находится в сложной пространственной и временной связи со всеми другими факторами [47 и др.].

Опыт использования математических методов и ЭВМ в практике геологического прогнозирования свидетельствует о наличии определенного несоответствия между существующим способом подготовки, предварительной обработки и кодирования исходных картографических геологических данных и реальными возможностями геологов. Это положение и определяет основное препятствие, тормозящее широкое внедрение современных средств обработки информации в прикладную геологию. Один из путей устранения этого несоответствия — создание автоматизированных баз картографических геологических данных.

#### **АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПОДХОДОВ К АВТОМАТИЗАЦИИ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Применительно к проблеме геологического прогнозирования понятие банка данных было впервые конкретизировано в работе [45]. Под банком данных понималась система накопления, хранения и обработки геологической информации в ЭВМ, а также соответствующее математическое обеспечение, удовлетворяющее следующим требованиям: информация должна быть ориентирована не на решение одной конкретной задачи, а на неоднократное использование при решении различных задач; информация должна вводиться с минимальной предварительной обработкой; должна быть возможность обновления, уточнения информации и поиска любых сохраняемых сведений. Необходимо различать понятия банк данных и база данных. Под базой данных мы понимаем весь комплекс геологической, геофизической, геохимической, аэрокосмической и другой исходной и преобразованной информации по какому-либо исследуемому региону, территории, району, сохраняемой в машинном банке данных. Именно на основе базы данных и осуществляются выбор и подготовка исходной информации, необходимой для последующего решения конкретных задач геологического прогнозирования. Это могут быть различные справки по запросам пользователей об исходной информации (в том числе выборки рудных объектов), приведение исходных данных к виду, необходимому для применения различных алгоритмов анализа, и т.д. и, наконец, решения задач теоретической и прикладной геологии в человеко-машинных режимах.

Задачи геологического прогнозирования на различных стадиях исследований решаются на основе использования разнообразной первичной документации. По-видимому, создание единой, стандартной системы описания исходных геологических данных в виде, удобном как для

практического использования, так и для оперативного перевода на машинные носители, — проблема чрезвычайно сложная. Возникает вопрос: как в создавшейся ситуации использовать широкие возможности современных ЭВМ по обработке и оперативному применению их для составления прогнозных заключений? В большей части работ исходная информация, вводимая в ЭВМ, организуется в виде матриц "объект-признак" либо основное внимание уделяется комплексу обрабатывающих программ, а вопрос подготовки исходных данных затрагивается частично или вообще не затрагивается. Выгодно отличаются в этом плане системы, в которых заложена возможность получения признаков для прогнозирования с помощью ЭВМ при условии ввода в машину минимально обработанных данных — числовых полей. Однако при этом остается открытым вопрос о возможности использования собственно картографических геологических материалов.

Как отмечалось в работе [45], практическое решение рассматриваемой проблемы в целях геологического прогнозирования возможно на следующей основе.

1. Для построения прогнозных моделей с помощью ЭВМ необходимо обеспечить точную топографическую привязку исходной информации в виде, удобном для их последующей обработки. В связи с этим целесообразно условное подразделение всей геологической информации (здесь и далее под геологической подразумевается вся информация, используемая при прогнозировании, включая геофизическую, геохимическую и др.) на отдельные типы.

2. На машинные носители следует заносить информацию не по всей первичной геологической документации, а лишь по документам, уже синтезировавшим исходные данные (например, карты геологического содержания, схемы интерпретации геофизических, геохимических, аэрокосмических съемок и т.п.). Также могут заноситься в машинную память погоризонтные планы, геологические разрезы и другие документы. Это положение истекает из того, что синтез первичных материалов не всегда под силу ЭВМ. Кроме того, составление таких синтезированных карт и картографических геологических документов специалисты (геологи, геофизики, геохимики и др.) выполняют с учетом многих неформализуемых пока процедур.

3. На машинные носители следует заносить информацию, наиболее часто применяемую для практической работы и решения различных задач геологического прогнозирования, оценки геологических гипотез и концепций, при построении различных моделей развития данного участка земной коры в целях познания закономерностей пространственного размещения месторождений полезных ископаемых и условий их локализации. Одновременно следует предусмотреть возможность постепенного расширения различного рода геологической информации, заносимой в территориальную базу данных для последовательного и многоцелевого использования. Таким образом, вся геологическая информация

должна сохраняться как в исходном, картографическом и привычном для человеческого восприятия виде, так и в территориальных машинных базах данных в дискретном виде, удобном для ее обработки с помощью ЭВМ.

4. Необходимо автоматизировать процедуру ввода исходной информации в ЭВМ и осуществление контроля введенных данных.

5. Следует применить такие способы кодировки первичных геологических материалов, использование которых не привело бы к потере исходной информации при ее последующем анализе с помощью ЭВМ.

Вопрос описания исследуемой территории (выбора геологической модели территории в физическом пространстве признаков) является узловым и в значительной степени определяет как тип необходимой математической обработки, так и успех в решении поставленной задачи геологического прогнозирования в целом. Существуют три возможные схемы геологического описания территории в машинном банке данных. Первая из них состоит в описании на исследуемой территории (площади) множества отдельных точек (месторождений, рудопоявлений, скважин) или выборе небольших участков вокруг этих точек — составлении кадастров. При таком подходе картографические геологические данные по большей части территории не применяются для выявления количественных закономерностей размещения рудных объектов.

Если исследователи считают необходимым привлекать геологическую информацию по всему району, то используется представление территории в виде системы непересекающихся связанных множеств, объединение которых покрывает всю изучаемую площадь. Эти множества обычно называются "геологическими блоками". Известны два принципиально различных подхода к разбиению территории на геологические блоки. В первом из них выделение осуществляется непосредственно геологами исходя из содержательных соображений. Проведение границ блоков может, например, опираться на представления о структурно-тектонических зонах, данные о наличии (или интенсивности проявления) тех или иных рудоконтролирующих факторов. Наряду с явными достоинствами этого подхода ("естественность" расчленения территории, сравнительно более легкая интерпретируемость получаемых результатов и т.д.) необходимо отметить, что столь ранняя фиксация субъективных взглядов специалистов и вытекающая из нее система априорных предпочтений одних геологических факторов другим создают опасность сужения множества допустимых решений до тривиального. Очевидно, в таком случае математическая обработка не может дать ничего нового по сравнению с тем, что уже известно. Второй подход предполагает формальное выделение блоков. Следуя Р. Байтесу, в 1955 г. использовавшему представление территории плато Колорадо в виде совокупности квадратов со стороной 8 км, многие авторы разбивают территорию на блоки при помощи геометрически правильной сети. При этом размер блоков выбирается таким, чтобы их число не оказалось слишком большим и

все необходимые данные можно было бы снять с геологической карты вручную. При применении этого подхода сознательно допускаются потери информации, связанные с использованием интегральных характеристик блоков. Более того, получаемые признаки обычно имеют качественный характер и лишь фиксируют наличие или отсутствие проявлений соответствующего фактора в пределах данного блока. Заметим, что этот способ прямо противоположен "содержательному" подходу, так как данные о геологическом строении района вообще не используются.

В последнее время все чаще применяется комбинированный подход, при котором геологические блоки создаются путем объединения небольших формальных блоков. Более точно реализуется следующая процедура: сначала территория разбивается по правильной, весьма частой сети на квадратные ячейки (например,  $1 \times 1$  см в масштабе используемой карты), затем определяются значения всех признаков для каждой ячейки и, наконец, вычисляются интегральные характеристики для содержательных блоков. Учитывая, что число ячеек в реальных задачах находится в пределах от десятков до сотен тысяч, нетрудно понять, что этот метод не может быть реализован вручную в полном объеме и, следовательно, для его применения необходим способ ввода карт геологического содержания в ЭВМ и специальную программу последующего преобразования данных. Вместе с тем следует учитывать, что дополнительные усилия, затрачиваемые на такую разработку, в дальнейшем оправдываются, так как после однократного ввода по ячейкам могут быть легко построены самые различные модели территории, причем выделение блоков можно будет провести не только по отдельным факторам и геологическим блокам, но и по целому их комплексу [23].

При выполнении региональных геологических прогнозов и проведении различных статистических расчетов с помощью ЭВМ многие исследователи также предлагают сохранять исходные данные и геологические карты в машинной памяти в виде отдельных ячеек. Так, Н.А. Кухаренко считает, что для информационных систем по металлогении следует использовать два типа объектов: относящиеся к геологической среде — площадные и относящиеся к полезным ископаемым — месторождения, рудопоявления, ореолы, точки минерализации. Для площадных объектов он предлагает использовать международную разграфку листов масштаба  $1:1\,000\,000$ , что обеспечивает достаточную формализацию объекта "территория". За ячейку сбора информации предлагается брать участок земной коры, ограниченный рамками планшета масштаба  $1:200\,000$ , что соответствует масштабности металлогенических работ, проводимых на территории СССР или ее крупных частей. Н.А. Кухаренко отмечает также, что количество информации в пределах территории обуславливается не размерами площади, а сложностью геологического ее строения. Однако при этом не учитывается необходимость дальнейше-

го прогнозирования в более крупных масштабах, т.е. подход не может быть признан универсальным.

Общие требования к определению размеров площадных объектов, выбранных в качестве элементарных ячеек для сбора информации при геологическом автоматизированном прогнозировании месторождений полезных ископаемых, сформулированы Л.Н. Дуденко и А.Н. Бугайцом [2]. Они указывают, что размер элементарных ячеек не должен превышать максимально возможные размеры месторождения прогнозируемого типа и быть меньше минимального расстояния между ними. Число элементарных ячеек (объектов) должно соответствовать техническим возможностям получения и хранения геологического описания каждого из них. Размер элементарных ячеек (объектов) должен меняться с изменением масштаба прогнозирования. С учетом изложенных требований оптимальный размер элементарного объекта для прогнозирования рудных месторождений, по-видимому, будет близок к  $1 \text{ см}^2$  в масштабе карты.

А.П. Куклин и А.Н. Бугаец [2 и др.], осуществляя машинное прогнозирование, использовали в качестве элементарных ячеек площадки, равные планшету масштаба 1:50 000 и 1:10 000, или площади карты размером  $1 \text{ см}^2$ .

В работах [20, 28, 29, 31 и др.] в качестве элементарной ячейки при геологическом человеко-машинном прогнозировании применяли элементарные площадки карт геологического содержания размером  $0,25$  и  $1 \text{ см}^2$  в масштабе карты. Этот подход был апробирован и показал положительные и устойчивые результаты при исследованиях самого различного масштаба (1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000). Исходные картографические геологические данные вводили автоматизированным способом по сети  $0,5 \times 0,5 \text{ см}$  в масштабе карты.

Одни исследователи выражают сомнения в целесообразности хранения геологической информации картографического типа в виде элементарных ячеек, считая, что геологическое прогнозирование должно осуществляться с учетом реальных контуров геологических объектов [41 и др.]. Другие, что при таком подходе будет наблюдаться избыток информации. Однако хранение карт геологического содержания в виде элементарных ячеек (разумеется, в машинной памяти) позволяет оперативно моделировать любые контуры (в том числе геологических блоков) в зависимости от конкретных объектов прогнозирования. Наличие характеристик геологических факторов по отдельным ячейкам карт геологического содержания создает предпосылки для получения представительных статистических характеристик геологических факторов для рудных объектов любых размеров и тем самым приводит не к избытку информации, а, напротив, к получению более достоверных признаков. Опасения "засоренности" базы геологических данных с учетом огромных возможностей современных ЭВМ совершенно не обоснованы. Для наиболее эффективного использования информации, например,

7

не только для целей прогнозирования, но и составления различного рода справочных данных, следует предусмотреть возможность выдачи исходной информации в виде, привычном для пользователей, т.е. в виде геологической карты. Отсюда вытекает условие необходимости сохранения в памяти ЭВМ карт геологического содержания, с одной стороны, в исходном виде, а с другой — в виде, удобном для машинной обработки.

Способ хранения информации исходных карт геологического содержания по элементарным ячейкам имеет и недостатки. Главный из них заключается в том, что некоторые геологические обозначения, имеющие линейный характер, на исходных картах (например, контакты пород, тектонические нарушения и др.) будут "запоминаться" ЭВМ в виде полос шириной, по крайней мере, в одну элементарную ячейку.

Следует отметить, что территориальная база картографического материала может содержать и сведения "объемного" характера, например потенциальные геофизические поля, их различные трансформации, материалы отдешифрованных аэрокосмических съемок и т.п. В этом случае данные, приписываемые какой-либо отдельной элементарной площадке, будут характеризовать не только ее саму, но и всю сложность ее взаимоотношений с соседними площадками и одновременно будут отражать в косвенном виде информацию об особенностях глубинного строения территории. Заметим, что геологическая карта по своей природе отражает в косвенном виде элементы глубинного строения, т.е. несет глубинную информацию пространственно-временного характера. Общие размеры территории (карт), которые могут быть помещены в память современных ЭВМ в виде характеристик отдельных элементарных площадок, практически не ограничены.

Наличие соответствующих комплексов математических средств для переработки информации избавляет геолога от необходимости пересматривать частные данные по всей площади, сосредоточивает его внимание на конкретных материалах, подготавливает необходимые сведения по всем намеченным вариантам прогноза и анализа и высвобождает ему максимум времени для творческого осмысливания задачи и принятия решений по оценке перспективности геологических объектов. Имеющиеся картографические материалы различных масштабов, на составление которых и их систематизацию были затрачены значительные усилия больших коллективов специалистов, могут и должны сохраняться в машинных базах данных в формах, адекватных исходным.

Накопление такого рода информации не только рационально, но и необходимо уже в настоящее время, так как это позволяет осуществить многоаспектный ретроспективный геологический анализ с новых позиций огромного количества геологического материала и возможностей, предоставляемых геологии современными средствами информатики.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ДИСКРЕТНЫЙ ВИД

Любая автоматизированная система сбора, хранения и обработки информации должна опираться на массивы стандартных документов. Это требование обуславливает необходимость наличия стандартных первичных документов для описания геологических объектов, позволяющих без всякой перекодировки или составления промежуточных документов вводить необходимые сведения в ЭВМ. В настоящее время существует аппаратное и программное обеспечение, позволяющее полностью автоматизировать регистрацию и обработку данных о физических полях, физических характеристиках и вещественном составе горных пород и руд. В то же время способы автоматической обработки карт геологического содержания еще весьма несовершенны, требуют больших затрат труда и времени на подготовку информации к вводу в ЭВМ. Этапу автоматизированной обработки данных предшествуют трудоемкие операции по формированию массивов для решения отдельных задач геопрогноза. Поэтому понятны усилия, предпринимаемые различными исследователями по поиску новых путей преобразования исходных картографических геологических данных. Опыт математической обработки геологической информацией свидетельствует о том, что фактически для каждой вновь сформулированной задачи необходимо заново создавать информационные массивы. Дальнейшее совершенствование автоматизированных систем обработки геологических данных, видимо, немыслимо без разработки и использования новых подходов к преобразованию и машинному хранению картографической геологической информации. Такие подходы должны позволить уже при сегодняшнем программном обеспечении автоматизировать и ускорить процессы предварительной подготовки информации для ее последующей машинной обработки, однако следует принять определенные меры для того, чтобы избежать при этом возможного снижения информативной ценности исходных геологических картографических данных. Автоматизация процесса поиска и обработки информации предполагает ее предварительное кодирование. Коды должны удовлетворять следующим требованиям: однозначности, кратности, аддитивности, программируемости. Процесс кодирования не должен быть весьма сложным и трудоемким, т.е. кодирование исходных данных, предпринятое для последующего машинного анализа при решении конкретной задачи, должно компенсировать затраты на предварительную подготовку данных.

Проблема определения списка фиксируемых на различных стадиях геологоразведочного процесса данных для последующего их кодирования сводится в настоящее время к проблеме предварительной оценки информативности отдельных факторов, необходимых для решения конкретных задач геологического прогнозирования. По-видимому,

*водо, а не в  
количестве*

кардинальным решением вопроса явилось бы полное сохранение карт геологического содержания в машинной памяти с последующим выбором любых факторов, составляющих такие карты. Формализация сведений, имеющихся на исходных картах геологического содержания, предполагает выбор способа преобразования этих данных в количественный вид и тем самым построения модели исследуемой территории в пространстве признаков, необходимых для решения задачи. Обычно при решении задач геопрогноза используется подход, состоящий в регистрации наличия или отсутствия данного фактора в пределах блока. Такой способ порождает набор бинарных признаков. Однако недостаточность такого описания во многих задачах совершенно очевидна, и поэтому в работах последних лет предложены различные процедуры получения более "чувствительных" признаков. При этом используются различные подходы: вычисление статистических характеристик изменчивости геологических ситуаций, многообразия пород, энтропии и т.д.

В настоящее время автоматизированный анализ геоинформации осуществляют в основном по следующей схеме. Исходные карты разделяют на определенное число равновеликих (часто квадратной формы) ячеек — пиксел, в пределах которых определяют значение какого-либо измеренного или показанного на карте (снимке) определенного признака, свойства и т.д. (например, цвет, наличие или отсутствие какого-то свойства, интенсивность фототона и др.). Причем картографическая информация кодируется, как правило, в бинарном виде ("1" — наличие какого-либо фактора, предмета и т.п., "0" — отсутствие). Фотоизображения с помощью сканерных систем преобразуются в сигналы интенсивности проявления измеренной величины (например, от белого цвета "0.00" до черного "1.00"). Иными словами, человек воспринимает и анализирует не только точечную, но и контурную информацию, а применяемые машинные носители — только точечную. Дальнейший анализ этой информации осуществляется при использовании ЭВМ, как правило, именно в виде точечной формы. Однако при таком подходе не достигается та полнота и детальность использования геоинформации, которая имеет место при ее визуальном анализе человеком. Дело в том, что человек, изучая карту, снимок или любую другую картографическую информацию, воспринимает ее не только как наличие или отсутствие в какой-либо точке отдельного составляющего данную карту фактора или его интенсивность, но подсознательно одновременно оценивает всю обстановку в районе наблюдаемой точки, в целом во всей ее сложной пространственной взаимосвязи с окружающей эту точку обстановкой. Так, например, рассматривая на фотоснимке речную сеть даже в одной точке, мы оцениваем не только наличие или отсутствие в ней речного потока (русла), но и ее долину, сложность геоморфологической обстановки в ее окружении и т.д. Изучая многоцветные карты, мы также

подсознательно фиксируем распространение и величину разноокрашенных площадей. Такого рода различие в восприятии картографической информации человеком и ЭВМ приводит в последнем случае к весьма существенной потере информации при анализе с использованием ЭВМ. В самом деле, из практики геологического прогнозирования известно, что влияние отдельного фактора на процессы рудообразования не ограничивается лишь областью его локализации, но находится в сложной пространственной связи с влиянием других факторов. То же самое можно отметить и для процессов осадкообразования, формирования и эрозии почв, размещения растительного покрова и т.д.

Каким же образом можно избежать указанного несоответствия между анализом картографической информации на основе ее зрительного восприятия человеком и автоматизированным анализом с помощью ЭВМ? С одной стороны, человек осуществляет анализ картографической геоинформации более детально (в смысле охвата окружающей исследуемый объект обстановки), но делает это, как правило, на качественной основе либо по градациям, отраженным на самой карте (снимке). С другой — ЭВМ позволяет более дискретно анализировать исследуемый материал в количественных эквивалентах, выполнять различные преобразования и синтез изображений, что недоступно человеку.

Ниже рассмотрен позволяющий в значительной мере устранить отмеченные недостатки подход, пригодный для человеко-машинного анализа картографической геоинформации (карт геологического содержания) и получивший в последние годы широкое распространение в геологических исследованиях [20].

Введем понятие "*картографического фактора*". Под таким фактором будем понимать (на примере карты геологического содержания) конкретное геологическое образование, определяющее геологическое строение исследуемой территории, отображающее историю геологического развития и входящее в легенду карты как самостоятельная единица. Под картографическим фактором понимаются также различные геофизические, геохимические, гидрогеологические, геоморфологические и другие особенности, характеризующие специфику исследуемой территории. Картографический фактор может иметь площадное, линейное или точечное распространение. Естественно, что для других видов карт будут собственные картографические факторы, отражающие их специфику (географические, почвенные, лесные, топографические и т.п.).

*Картографическим признаком* рассматриваемого картографического фактора в отдельной элементарной ячейке карты назовем некоторую числовую характеристику центра этой ячейки, функционально отражающую ее точное пространственное положение относительно границы области распространения данного фактора.

В качестве характеристики элементарной площадки  $p$  карты по от-

дельному картографическому фактору принимаем значение функции

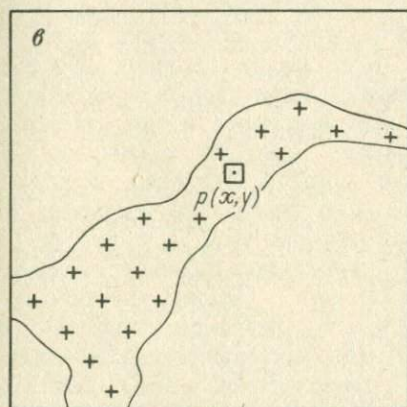
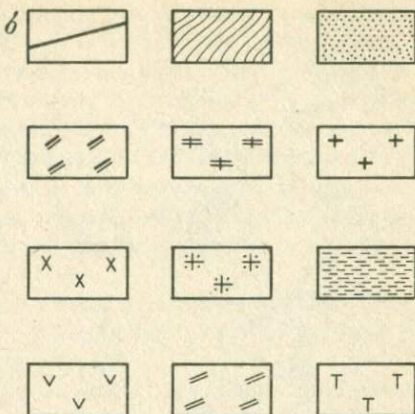
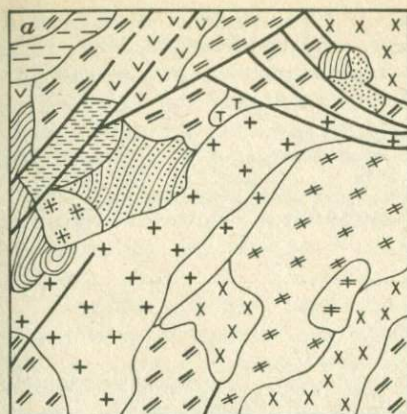
$$r(p) = \inf_{q \in \omega} \rho(p, q) - \inf_{q \in \omega} \rho(p, q),$$

где  $\rho$  — расстояние между центрами элементарных площадок  $p$  и  $q$ ;  $\omega$  — область, в пределах которой данный фактор отсутствует;  $\omega$  — область распространения данного картографического фактора.

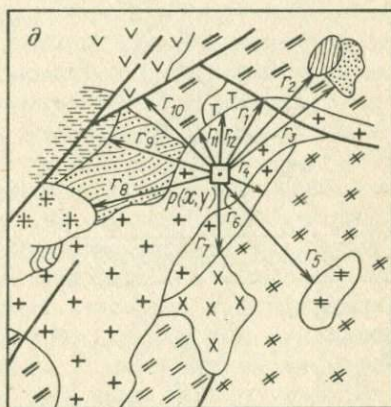
Здесь предполагается, что граница области распространения геологического картографического фактора (его контакт) принадлежит именно этой области. Функция  $r(p)$  описывается в терминах теоретико-множественных операций. При этом  $\inf$  определяет наименьшее расстояние ("нижнюю грань") от отдельной точки до контакта рассматриваемого геологического картографического фактора. Смысл этой функции заключается в том, что она определяет минимальное расстояние от любого заданного центра элементарной площадки карты  $p$  до области распространения рассматриваемого картографического фактора (его эндоконтакта) для случая, если точка  $p$  принадлежит данному фактору. Если же точка  $p$  не принадлежит области распространения данного картографического фактора, расстояние от нее до границы этого фактора (экзоконтакта) берется со знаком минус (рис. 5).

Абсолютные значения картографических геологических признаков рассчитываются с помощью ЭВМ на основе специальной программы. Они могут быть нормализованы, что открывает возможность осуществления комплексного анализа самой разнообразной картографической геоинформации (геологические, тектонические, металлогенические, географические, геофизические, почвенные, топографические и другие карты), а также всевозможную числовую информацию (потенциальные геофизические поля, геохимические ореолы, интенсивность фототона, радиоизлучение и т.п.).

С учетом изложенного картографическую геоинформацию целесообразно хранить в машинных территориальных базах данных в виде двух массивов: *исходном* — контурном (в бинарном, в виде областей распространения отдельных факторов) и в *признаковом* (в виде чисел, характеризующих пространственное положение каждой элементарной ячейки карты относительно ближайших контуров всех картографических факторов данной карты). Исходный массив должен содержать площади распространения и контуры отдельных картографических (например, геологических) факторов, введенных в машинную память на основе "пофакторного разложения" исходной карты, осуществленного с помощью дигитайзера (для обычных картографических материалов) [20]. В случае предварительно подготовленных (нормализованных) карт ввод может осуществляться автоматически с помощью телекамер или сканеров [48]. Однако при этом необходимо иметь специальные программы,



г  $p(x, y) = 1$

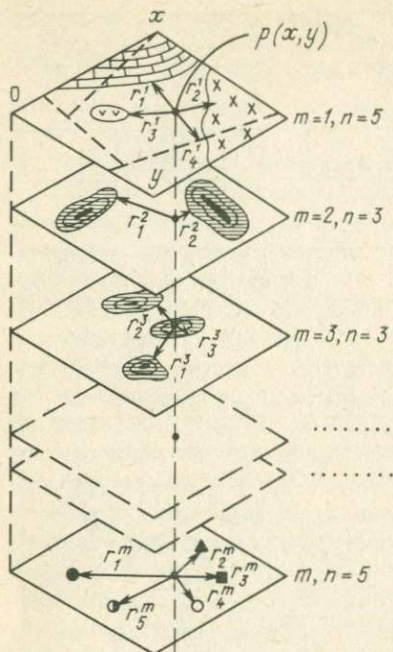


е  $f\{r[p(x, y)]\} =$

$$= \begin{cases} r_1 = -16,2; & r_5 = -32,4; & r_9 = -23,2; \\ r_2 = -29,3; & r_6 = +6,5; & r_{10} = -21,3; \\ r_3 = -31,0; & r_7 = -17,2; & r_{11} = -9,8; \\ r_4 = -11,6; & r_8 = -28,6; & r_{12} = -71,2 \end{cases}$$

Рис. 5. Преобразование геологической карты в дискретный вид [20].

а — геологическая карта; б — легенда карты — картографические факторы; в — кодирование одного картографического фактора в бинарном виде; г — бинарное кодирование элементарной ячейки картографического фактора; д — описание элементарной ячейки геологической карты  $p(x, y)$  совокупностью расстояний до ближайших контактов геологических образований (картографических факторов); е — преобразование с помощью ЭВМ бинарного описания элементарной площадки карты  $p(x, y)$  в функцию  $f(r)$



Исходный массив	Массив признаков	
$N_1^1=0; N_2^1=0;$ $N_3^1=0; N_4^1=0;$ $N_5^1=1$	$r_1^1=-15; r_2^1=-10;$ $r_3^1=-18; r_4^1=-14$	$m=1$
$N_1^2=0; N_2^2=0;$ $N_3^2=1$	$r_1^2=-20; r_2^2=-5$	$m=2$
$N_1^3=0; N_2^3=0;$ $N_3^3=1$	$r_1^3=-9; r_2^3=-8;$ $r_3^3=+4$	$m=3$
.....	.....	.....
$N_1^m=0; N_2^m=0;$ ..... ; $N_n^m=0$	$r_1^m=-20; r_2^m=-8;$ $r_3^m=-7; r_4^m=-5;$ $r_5^m=-18$	$m$

Рис. 6. Схема хранения информации в территориальной машинной базе геологических картографических данных [20, 45].

Карты:  $m = 1$  — геологическая,  $m = 2$  — геофизическая,  $m = 3$  — геохимическая, ...,  $m$  — полезных ископаемых;  $n$  — число факторов на данной карте;  $N$  — номер фактора;  $r$  — значение функции  $f(r)$

реализующие автоматизированное "пофакторное разложение" исходного изображения (например, по цвету, крапу, штриховке и т.п.).

При таком двойном способе описания элементарных ячеек карты в виде исходного и признакового массивов (рис. 6) достигается, с одной стороны, сохранение исходного картографического материала в оригинальном виде, а с другой — возможность проведения формально-логического человеко-машинного анализа и комплексной интерпретации многофакторной геоинформации на количественной основе. Тем самым машинное "восприятие" картографической геоинформации приближается к ее визуальной восприятию человеком. Машинный анализ преобразованного таким образом картографического материала позволяет гораздо полнее использовать имеющуюся геоинформацию. Данный подход открывает возможность многократного и многовариантного использования картографической геоинформации. Вместе с тем это приближает машинный анализ к логике мышления геолога, который при анализе такого материала не только учитывает наличие

или отсутствие какого-либо отдельного фактора, влияющего на локализацию конкретного вида оруденения, но и оценивает обстановку (ситуацию) по совокупности взаимоотношений всех факторов, представляющих интерес для решения конкретной задачи геологического прогнозирования. Вместе с тем факторы, имеющие в исходном виде дискретные значения (геофизические поля, геохимические аномалии и др.), могут сохраняться в количественной форме и анализироваться совместно с картографическими геологическими факторами, преобразованными в дискретный вид. Для этого следует осуществить процедуру их нормализации.

При использовании рассмотренного подхода можно получать статистические характеристики отдельных геологических картографических признаков в пределах исследуемой территории.

На рис. 7 приведен фрагмент геологической карты одного из регионов, а на рис. 8 показаны в виде кривых некоторые математические характеристики распределения картографических геологических признаков для этого региона. Перевод геологических карт в дискретный вид открывает широкие перспективы для привлечения современных средств обработки данных с использованием математических методов и ЭВМ для различного рода статистических исследований в прикладной геологии. Можно, например, оперативно составлять выборки по геологическим объектам различных системных уровней (всей территории, месторождениям, рудопроявлениям и т.п.), анализировать их статистические параметры по отдельным картографическим факторам и признакам. В этих случаях также возможно выделение аномальных значений отдельных признаков и их комбинаций в пределах рассматриваемой территории. Открывается принципиальная возможность выявления статистически значимых региональных "геологических аномалий" [44], выделения неблагоприятных для оруденения геологических обстановок, характеризующихся достаточно простым геологическим строением, прослеживания литологической анизотропии как факта, благоприятного для локализации эндогенного оруденения, безэталонного районирования и анализа компактности выборок, установления благоприятного сочетания ореолов косвенных признаков геологических рудных объектов [45 и др.].

Кроме того, возможно осуществление различных трансформаций массивов картографических геологических признаков так же, как и в геофизике.

Если при бинарном описании элементарной ячейки карты характеризуют только наличие картографического геологического фактора "1" или его отсутствие "0", то при использовании предлагаемого преобразования карт геологического содержания в дискретный вид каждая элементарная ячейка характеризуется набором дискретных величин, количество которых равно числу составляющих данную карту геологических факторов (см. рис. 5).

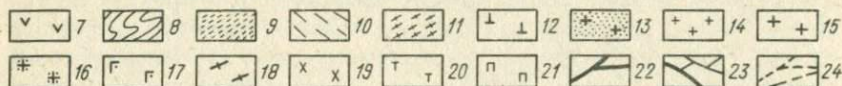
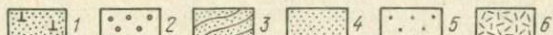
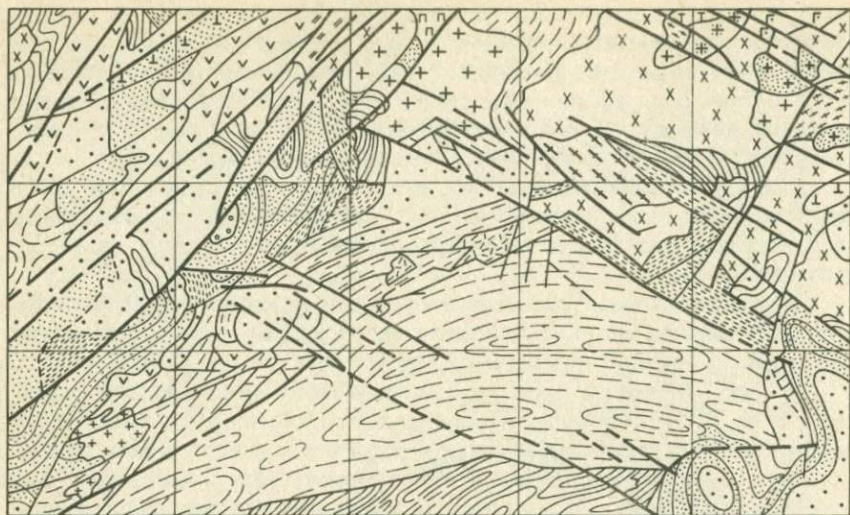


Рис. 7. Фрагмент геологической карты, сохраняемой в территориальной машинной базе картографических данных.

1 – базальты, конгломераты (Т – J); 2 – песчаники, алевролиты (P); 3 – известняки, мергели (С); 4 – конгломераты, гравелиты (D<sub>3</sub>); 5 – липарито-дацитовые, андезито-базальтовые порфириды и их туфы (D<sub>2-3</sub>); 6 – трахиандезитовые, андезито-базальтовые порфириды и их туфы, конгломераты (D<sub>1-2</sub>); 7 – дацитовые порфириды и их туфы, туфоконгломераты (D<sub>3</sub> – S<sub>1</sub>); 8 – яшмы, диабазовые порфириды и их туфы (D<sub>1-2</sub>); 9 – спилиты, кремнистые сланцы, яшмы (E<sub>3</sub>); 10 – кварциты, порфиroidы, мраморы (E<sub>3</sub>); 11 – амфибол-биотитовые гнейсы, амфиболиты, эклогиты (E<sub>1</sub>); 12 – долериты (T<sup>?</sup>); 13 – гранит-порфиры, граносиениты (P<sub>3</sub> – T<sub>1</sub>); 14 – габбро-диабазы, диориты, монзониты (D<sub>2-3</sub>); 15 – аляскитовые граниты, гранит-порфиры (D<sub>1-2</sub>); 16 – нефелиновые сиениты, щелочные сиениты (S<sub>2</sub> – D<sub>1</sub>); 17 – пироксениты, сиениты, карбонатиты (S<sub>2</sub> – D<sup>?</sup>); 18 – биотитовые и амфиболовые граниты (S<sub>2</sub> – D<sub>1</sub>); 19 – габбро, габбро-диориты, тоналиты (S<sub>1</sub>); 20 – габбро, пироксениты (E<sub>2-3</sub>); 21 – нориты, анортозиты, серпентиниты, дуниты (E<sub>1</sub>); 22, 23 – разрывные структуры (22 – I порядка: разломы и зоны разломов, составляющие главный элемент блоковой тектоники территории, образующие границы блоков первого порядка; 23 – II порядка: разломы и зоны разломов, сопряженные со структурами I порядка и участвующие в строении отдельных блбков); 24 – второстепенные разрывные нарушения

Таким образом, "информационная емкость" каждой элементарной ячейки геологической карты при последующем анализе с применением ЭВМ возрастет во столько раз, сколько факторов отражено в легенде карты, т.е., как правило, на порядок и более. Следовательно, эффек-

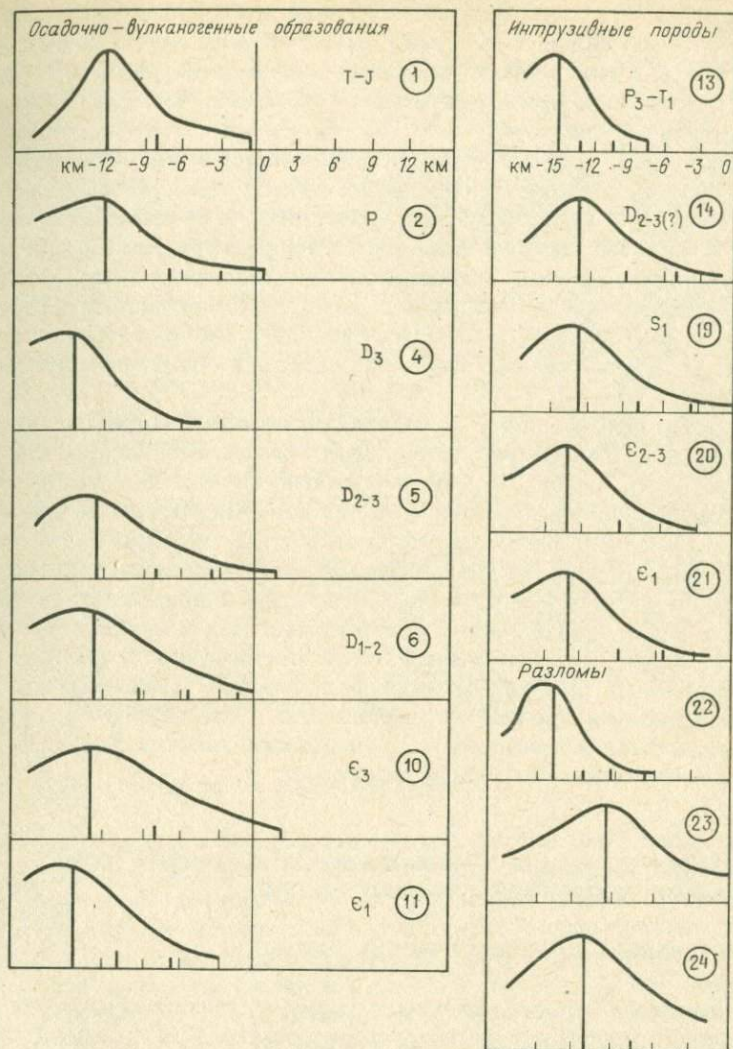


Рис. 8. Схематическое изображение кривых распределения и математических ожиданий некоторых геологических картографических факторов.

Цифры в кружках — номера факторов (наименования геологических факторов см. на рис. 7)

тивность практического использования исходной геологической информации с применением ЭВМ может быть повышена также на порядок и более. Это, в свою очередь, открывает возможность ретроспективного анализа, ревизии и переинтерпретации с помощью ЭВМ геологической информации прошлых лет.

Естественно, предлагаемый метод не является единственно возможным. Могут быть рассмотрены и другие способы преобразования геологических карт в дискретный вид. В частности, к настоящему времени видны и такие направления дальнейшего совершенствования предложенного подхода, как учет "изрезанности" геологических контактов различных образований и площадных размеров геологических картографических факторов, например, размеров интрузий (учет их пространственного распространения, например, в виде некоторой функции потенциального вида) и т.п.

В заключение отметим, что наличие современных устройств автоматического и автоматизированного ввода обеспечивает быстрое внедрение указанного подхода в практику машинного анализа геологической картографической информации. Следует подчеркнуть, что рассмотренный подход может быть распространен и на другие виды картографической информации (схемы интерпретации геофизических данных, экономико-географические, лесные, почвенные и другие карты). Многолетний опыт практического использования рассмотренного подхода свидетельствует, что при анализе геологических карт в признаковом выражении в их пределах отсутствуют абсолютно одинаковые элементарные площадки (полностью аналогичные в исследуемом пространстве геологических признаков). Это положение является вполне допустимым и естественным с позиций диалектики.

## **МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ МАШИННЫХ БАЗ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

### **ФОРМИРОВАНИЕ БАЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Применение человеко-машинных методов геологического прогнозирования предполагает наличие территориальных баз геологических данных, содержащих информацию в виде, одинаково доступном как для анализа специалистами, так и для обработки на ЭВМ. Процесс формирования территориальных машинных баз геологических данных состоит из процедур домашинной обработки данных (исходной информации) и собственно процедур формирования базы данных.

Процедуры формирования территориального машинного фонда (или базы данных) целесообразно выполнять специальной группой. Эти процедуры предусматривают: создание и оперативное ведение терри-

ториального машинного фонда картографической геологической информации, доступного для геологов; составление каталогов, определяющих состояние фонда информации на текущий момент. Все материалы должны сохраняться на машинных носителях в соответствии с картографической схемой деления территории на стандартные листы. Заключение о качестве и представительности исходных данных, а также рекомендации о введении их в территориальный машинный банк данных (фонд) могут выдаваться научно-техническим советом, рассматривавшим и утверждавшим конкретный отчет о проведенных геолого-съёмочных работах.

Предварительная обработка информации включает в себя процедуры переноса картографической геологической информации на машинные носители. Процедуры формирования базы данных завершаются записью на магнитную ленту (диск) исходной и преобразованной информации в виде файлов данных и составлением каталога, который является исходным указателем для всех пользователей информационной базы. Каталог должен содержать необходимые сведения о всей информации, имеющейся в базе данных (масштаб, площадь, точность исследований, представительность, результаты этих исследований и т.п.). На основе каталога могут быть оперативно сформированы необходимые сведения об изученности территории, площади, района, отдельного листа и составлено заключение о достаточности (или недостаточности) имеющихся материалов для решения поставленной задачи геологического прогнозирования. Все эти материалы могут выдаваться пользователям как в виде документов, так и в визуальном виде на дисплее.

### Процедуры домашинной обработки данных

1. *Подготовка и анализ исходной информации.* Эти процедуры предусматривают подготовку, экспертный анализ исходных геологической, геофизической, геохимической и других информации. Геологическое прогнозирование осуществляется на основе имеющейся исходной информации, поэтому первым этапом разработки прогнозных заключений является анализ геологической изученности исследуемой территории.

Известно, что любые прогнозные заключения должны основываться на надежном и представительном исходном материале. Главное назначение описываемой процедуры — последовательный анализ имеющейся информации с целью составления заключения о ее надежности и представительности. Оценка качества проведенных ранее геологических исследований осуществляется путем ознакомления с фактическим материалом. При этом особое внимание уделяется качеству полевых работ, ошибкам наблюдений, точности привязки и т.д. Следует подчеркнуть, что в машинную базу данных могут заноситься не только, например, исходные геофизические поля, но и схемы интерпретации геофизических

данных, отражающих особенности глубинного геологического строения исследуемой территории (модели геологического строения верхней части земной коры и др.). Другим показателем добротности исходной информации является ее представительность (равномерность проведенных исследований по всей изучаемой территории). В случае необходимости могут быть введены математические оценки тем или иным методом, степень изученности отдельных частей рассматриваемой территории. На практике часто наблюдаются случаи, когда по отдельным частям какой-либо территории составлено несколько вариантов геологических и других карт. При этом имеют место разная трактовка отдельных вопросов магматизма, спорные определения относительного возраста отдельных толщ горных пород, различные уровни геофизических полей и др. Поэтому при решении задач геологического прогнозирования может возникнуть необходимость составления сводной карты по всему исследуемому району, что позволит разработать единую, приемлемую для всех исследователей стратиграфию и т.п. Следует подчеркнуть, что эта работа носит, по существу, тематический характер и обобщает геологические результаты многочисленных исследований различных авторов по изучаемому району. Выполнение такой работы позволяет создать комплекс сводных геологических и других карт, перенести их на машинные носители, сформировать территориальную базу данных и использовать ее в дальнейшем не только для прогнозных заключений, но и в качестве справочного материала по запросам специалистов. Таким образом, процедура оценки качества и представительности имеющейся информации является своего рода "экспертным фильтром", с помощью которого отбраковываются недостаточно надежные материалы.

*II. Предварительная обработка информации.* Предварительная обработка информации заключается в составлении картографической схемы подразделения исследуемого района на условные листы. Базовый размер листа картографической геологической информации, сохраняемого в базе данных, например в системе Регион, равен  $320 \times 320$  мм [45]. Выбираемый пользователем размер листа должен быть кратен базовому или вкладываться в него целое число раз.

В связи с этим требованием вся территория, по которой формируется база данных, условно подразделяется на несколько листов квадратной формы. Это необходимо для того, чтобы "привязать" фактические картографические геологические материалы в памяти ЭВМ к реальной топографической основе. Возможна также и привязка к географическим координатам. Каждый условный лист сохраняется в памяти ЭВМ в виде отдельных элементарных ячеек (клеток). Совокупность исходной информации по одному показателю по всем листам исследуемой территории, как было условлено, будем называть картографическим геологическим фактором. Исходная информация вво-

дится и хранится в машинной базе данных по картографическим геологическим факторам, внутри которых сохраняется разделение на листы, ячейки (строки и столбцы). Информацию, сохраняемую в ЭВМ по одному картографическому геологическому фактору в пределах одного листа, будем называть "страницей", а по всему району — "книгой". Информацию по всем картографическим геологическим факторам и всем листам исследуемой территории назовем "библиотекой факторов".

Размер и число ячеек (точек информации) определяются размерами листа и фактора. В территориальной машинной базе данных следует различать два вида факторов: картографические (двузначные) и числовые (многозначные). Картографические геологические факторы в зависимости от требуемой детальности и сложности самой геологической карты могут сниматься по любой заданной сетке, например  $32 \times 32$  или  $64 \times 64$  ячейки в листе; числовые — по сети  $64 \times 64$  точки в листе. Возможен также съем информации и в более детальной форме. В случае отсутствия информации единого масштаба в пределах исследуемой территории, а также для повышения точности съема данных снятие информации может производиться по картам различного масштаба с последующим машинным "переводом" их в единый масштаб [40].

Предварительная обработка информации заканчивается составлением первичного каталога, т.е. перечня картографической геологической информации (карт, схем интерпретации и т.д.), с указанием состава факторов, отобранных для перевода на машинные носители и последующего их хранения в территориальной базе геологических данных.

III. *Процедуры формирования территориальной базы данных.* Эти процедуры предусматривают перевод картографической геологической информации (факторов) на машинные носители, формирование первичных массивов исходной информации в ЭВМ, массивов картографических геологических признаков и каталога территориальной машинной базы данных. Перевод картографической геологической информации на машинные носители может осуществляться как вручную, так и в полуавтоматическом режиме [40] с помощью различного рода дигитайзеров — кодировщиков графической информации. При ручном кодировании картографический геологический фактор кодируется построчно, а при полуавтоматическом — контуры геологических факторов обводятся электронным курсором. Принципиально возможен также ввод информации с помощью автоматических сканирующих устройств и телекамер. Основная трудность при этом — машинное разделение геологической карты на отдельные составляющие ее факторы. Геологическая карта в ее настоящем виде представляет собой исключительно сложный объект для применения устройств сканирующего типа. Во-первых, она имеет большое разнообразие крапа, распознавание которого подчас сложнее, чем распознавание перспективных геологических объектов. Во-вторых, типографское изготовление карт геологического содержа-

ния обычно не отвечает условиям, необходимым для ввода данных, например, с помощью телекамеры. Наличие тончайших различий в цветах пород одного и того же возраста на разных листах геологической карты уже является существенным препятствием применения телекамеры.

Не останавливаясь подробно на особенностях ввода картографической геологической информации в ЭВМ, заметим, что результатом этой процедуры является перевод исходных данных на машинный носитель (магнитная лента, магнитный диск). Прежде чем приступить к формированию первичного массива, необходимо проверить правильность кодирования исходной информации. Для этого целесообразно использовать визуальный контроль. Он состоит в том, что после некоторого машинного преобразования результаты кодирования исходных данных распечатывают на АЦПУ, строят на графопостроителе или выдаются на экран дисплея (пофакторно и полистно) в виде, который может быть сопоставлен с оригиналом. Визуальное сопоставление материалов исходной карты и машинных данных позволяет выявить ошибки кодирования и быстро устранить их. Откорректированная информация вновь записывается на машинные носители (магнитный диск), при этом происходит формирование библиотек исходных факторов и одновременно "сжатие" информации в целях более рационального использования машинной памяти. Этими процедурами завершается технология формирования территориальной машинной базы данных. Сохраняемая в ней информация может использоваться для решения различных задач геологического прогнозирования. Одновременно служба ведения территориального машинного банка данных может пополнять его новыми данными в соответствии с изменениями исходных материалов и оперативно вести каталог.

Таким образом, выполнение всех процедур в указанной последовательности на основе взаимодействия специалистов с ЭВМ (человеко-машинные методы) позволяет сформировать и оперативно вести территориальную базу картографических геологических данных.

Мы не останавливаемся здесь на описании программного обеспечения территориальной базы данных. Это является предметом специального рассматривания.

#### ТРЕБОВАНИЯ К АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ УСТРОЙСТВАМ КОДИРОВАНИЯ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Важное значение при реализации человеко-машинных методов анализа карт геологического содержания приобретают способы автоматизированного ввода картографической геологической информации в территориальную базу данных и ее визуализацию в процессе решения задач геологического прогнозирования. Ввод геолого-геофизической и другой видеоинформации (в том числе космофотогеологических карт), как

было показано, может осуществляться в автоматическом или автоматизированном режиме.

Новые методы картографического отображения и анализа геоинформации с применением ЭВМ детально рассмотрены Е.Е. Ширияевым [48 и др.]. Анализируя недостатки существующих способов считывания и распознавания с помощью ЭВМ картографических данных, он отмечает значительные затраты машинного времени на эти операции. Это обстоятельство может оказывать негативное влияние на решение задач научно-исследовательского характера при анализе картографической информации в целях изучения природных объектов и явлений. С учетом изложенного Е.Е. Ширияевым предложены новые методы отображения геоинформации (метод растровой дискретизации, способ мультимасштабного отображения площадных объектов и др.), способы скрытого кодирования изображений (люминесцентный, оптический и др.).

Как было указано выше, при кодировании картографических геологических материалов возможны два способа. Рассмотрим более подробно как наиболее перспективные в настоящее время два принципиальных подхода: автоматический ввод с помощью сканирующих оптических устройств — автоматов и полуавтоматический — с использованием механических (или электронных) автоматизированных устройств — дигитайзеров.

*Автоматический ввод данных.* В настоящее время основной упор делается на создание автоматических и автоматизированных систем для хранения и поиска картографической информации в цифровом виде, т.е. на хранение их в виде цифровых карт. Необходимость создания баз цифровых данных в виде цифровых карт обусловлена тем, что машина пока еще не в состоянии надежно "читать" традиционную карту, приспособленную лишь для восприятия человеком. Если бы машина могла "читать" карту, т.е. преобразование в цифровой вид она осуществляла бы автоматически на уровне полного распознавания знаков, то отпала бы необходимость параллельного хранения карт и в натуральном, и в цифровом видах. В отраслях производства или науки, где первичные исходные данные представлены в цифровом виде (например, геофизические и геохимические измерения), целесообразно (и это уже осуществляется) создание автоматических цифровых считывающих систем. Основными требованиями к такой автоматической системе кодирования являются [48 и др.]: универсализация и стандартизация; возможность визуального анализа информации во взаимодействии с ЭВМ; система должна обладать такой гибкостью, при которой возможны оперативный поиск и автоматическая обработка информации как любых локальных, так и любых региональных территорий; система должна быть по возможности доступной для широкого круга специалистов (без особых требований к подготовке по вычислительной технике). Что касается геофизической информации, то она в основном регистри-

руется в цифровом виде на машинные носители сразу же в полевых условиях. Удобным носителем информации является также и микрофильм, который позволяет сохранять исходные данные и выдавать их для автоматизированного анализа. По считыванию микрофильмовых изображений с помощью микросканеров, как отмечает Е.Е. Ширяев [48 и др.], были проведены исследования, которые дали положительные результаты. Исходная картографическая информация, представленная в виде контуров сплошных линий, может быть оперативно и надежно введена сканирующим устройством в ЭВМ и преобразована в вид, удобный для последующей обработки. Под этим понимается получение упорядоченной последовательности координат точек контуров с присвоением каждому контуру номера. Однако полностью проблема автоматизации комплексной обработки геоинформации еще не решена. Как уже указано, по сложности эта проблема превосходит, например, проблемы ввода в машинную память треков физических частиц (их фотографий), молекул белка (снимков под электронным микроскопом) и ввода космоснимков Земли. Проведенное всестороннее изучение и исследование показывают, что наиболее оптимальными носителями вторичной информации, удовлетворяющими требованиям к автоматической системе съема информации, могут быть нормализованные карты. В результате чтения нормализованных карт автоматическое устройство на своем выходе (при считывании изолиний) выдает данные точек пересечения строк сканирования с изолиниями в виде трех пространственных координат  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ . При считывании других изображений на вход ЭВМ поступают только плановые координаты  $(\bar{x}, \bar{y})$  и кодированные значения по яркости или цвету. Изображение карты может быть выведено на экран дисплея. Другим возможным способом автоматического ввода картографических геологических данных могут быть непосредственно типографские клише карт геологического содержания, где, как правило, каждый геологический фактор (крап, цвет) изображается в черно-белом варианте. Это открывает возможность использования для автоматического ввода (сканирования или с помощью телекамеры) уже "разделенных" геологических картографических факторов. Последующее программное обеспечение позволит, с одной стороны, восстанавливать исходную карту даже в необходимых цветах, а с другой — преобразует карту геологического содержания в дискретный (цифровой) вид по каждому фактору.

Все существующие устройства, считывающие картографическую информацию и просто графическую информацию, можно подразделить по принципу развертки изображения (сканирующие, следящие и сочетающие в себе ту и другую развертки) и по классу решаемых задач (универсальные и специализированные). Проведенные исследования [48] показали, что с достаточным основанием можно отдавать предпочтение универсальным сканирующим устройствам (УСУ), которые можно под-

разделить на три типа: 1) устройства, осуществляющие простой ввод в ЭВМ любых черно-белых штриховых и полутоновых изображений; 2) устройства, осуществляющие простой ввод в ЭВМ любых цветных штриховых и полутоновых изображений; 3) устройства ввода любых изображений с частичным распознаванием информации с целью сокращения машинного времени и упрощения процедуры распознавания ЭВМ (например, распознавание цвета).

*Полуавтоматический ввод данных.* Рассматриваемые устройства ввода графической информации (дигитайзеры) основаны на принципе преобразования механического движения указателя-курсора в электрические импульсы и далее в цифровые координаты. Дигитайзер является полуавтоматическим устройством, требующим участия оператора в обводке указателя вдоль оцифровываемого контура. Остальные операции (запись координат, выбор точек и т.п.) могут осуществляться как автоматически, так и с участием оператора, в зависимости от модели или выбранного режима работы.

В СССР разработаны устройства подобного типа "Шифратор-2 (3)", "Гарни" и другие, представляющие собой дигитайзер, предназначенный для работы в универсальном режиме и выводящий данные на машинные носители. Технические параметры устройства, а также функциональные возможности позволяют использовать их для большинства видов картографической геологической информации.

В настоящее время выпускается большое число моделей дигитайзеров, характеризующихся самыми различными подходами к снятию информации, возможностью редактирования, наличием оперативной памяти, способами вывода данных и т.д. [9].

*Режимы снятия информации.* Оператор осуществляет снятие информации путем совмещения со считываемыми точками указателя-курсора или, проще говоря, путем обвода указателем требуемого контура. При автономном режиме снятия информации точки на контуре выбираются: по сетке, т.е. точка фиксируется, когда указатель пересекает условную сетку, размеры которой либо постоянны (определяется разрешающей способностью дигитайзера), либо могут выбираться в заданном диапазоне; по пути, т.е. точка фиксируется, когда расстояние, пройденное указателем от предыдущей точки вдоль оси  $X(Y)$  или вдоль контура, становится равным некоторой заданной величине — шагу считывания. Шаг считывания может быть постоянным или выбираться в некотором диапазоне; по времени, т.е. когда точки считываются с контура через определенный интервал времени, также либо постоянны, либо варьируемы в некоторых пределах.

Кроме того, некоторые модели дигитайзеров обладают специальным устройством — трейсером, позволяющим автоматически сгущать оцифровываемые точки в местах крутых изгибов контура.

Считывание может также осуществляться по точкам, т.е. с ручным заданием каждой оцифровываемой точки. Управление процессом счи-

тывания осуществляется с пульта, в некоторых моделях вынесенного на указатель или ножную педаль. Такой автономный режим намного увеличивает скорость оцифровывания. Для контуров с большим числом прямолинейных и дугообразных участков можно значительно сократить количество вводимых точек за счет рационального их выбора (вводить только точки перегиба, сопряжения участков и т.п.).

*Возможности введения дополнительной информации.* Во многих случаях появляется необходимость пополнения отдельных точек некоторой дополнительной алфавитно-цифровой информацией. Это необходимо, например, для маркировки и различия характеристик точек контура или для идентификации отдельных оцифровываемых графиков в большом потоке данных. Многие модели дигитайзеров обладают такой способностью, и дополнительная информация может вводиться в массив координат либо автоматически, по заранее заданной программе, либо вручную с пульта или телетайпа.

Объем и состав вводимой дополнительной информации весьма отличаются для различных моделей и могут варьировать от одного-двух символов до нескольких длинных строк.

*Возможность редактирования.* Считанные (введенные) исходные данные подлежат проверке и, возможно, исправлению. Средства, имеющиеся для этой процедуры в существующих моделях дигитайзеров, также разнообразны. Простейшим является запоминание в буферной памяти некоторого количества последних считанных точек и наличие возможности отображения их координат (на цифровом индикаторе дисплея), стирания ошибочных данных и повторного их ввода. Более мощными средствами редактирования обладают дигитайзеры с собственным процессором. В этом случае процедуры контроля и редактирования осуществляются программными средствами (проверка определенных условий, интерполяция). В наиболее современных моделях процесс контроля и редактирования может осуществляться в диалоговом режиме "геолог—ЭВМ" с использованием электронно-лучевого дисплея, светового пера, комплекса подпрограмм преобразования графиков (повороты, стирание, масштабирование, сдвиги и т.п.). В последнем случае дигитайзер, процессор, дисплей и графопостроитель с соответствующим математическим обеспечением образуют так называемую "интерактивную графическую систему".

*Наличие памяти.* Как уже отмечалось, многие дигитайзеры обладают значительной машинной памятью. Память (ЗУ) может быть как частью собственно дигитайзера, так и приданного ему процессора. ЗУ имеет два назначения: 1) хранение сосчитанных данных в качестве буферного накопителя перед выводом или передачей этой информации; 2) хранение программ и вспомогательных данных.

Кроме того, многие модели дигитайзеров допускают подключение накопителей на магнитных лентах (МЛ) или магнитных дисках (МД). Эти устройства могут быть предназначены не только для вывода данных,

но и для промежуточного хранения перед контролем, редактированием или другой их автономной обработкой.

Наличие, объем и функциональные возможности памяти являются производной характеристикой от других показателей (наличие процессора, тип математического обеспечения и др.).

*Способ вывода.* Введенные посредством дигитайзера данные — координаты точек и комментарии к ним — выводятся либо на один из машинных носителей, либо через интерфейс (устройство сопряжения ЭВМ с внешними устройствами) в основную ЭВМ в неавтономном режиме работы, т.е. работы дигитайзера в комплексе с ЭВМ.

Наиболее современными видами вывода картографической информации являются многоцветные плоттеры — печатающие устройства с разрешающей способностью до 0,1 мм и обладающие возможностью многоцветного изображения (до 32 цветов и более с 8-ю оттенками каждый).

Большие возможности по вводу и редактированию графической информации открывает использование современных персональных компьютеров. Они могут иметь миниатюрный дигитайзер, имеющий специальное устройство ("мышь") для ввода и конструирования всевозможных графических изображений, их редактирования, расцветки, штриховки и т.п. Персональные ЭВМ с набором различных периферийных устройств ввода и вывода графических данных, несомненно станут основным инструментом анализа картографической геоинформации для практических геологов.

#### ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВВОДА КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ТЕРРИТОРИАЛЬНУЮ МАШИННУЮ БАЗУ ДАННЫХ

С учетом фактической оснащенности производственных геологических объединений аппаратурой автоматизированного ввода геофизических данных представляется целесообразным осуществлять формирование территориальных баз геологических данных картографического типа с помощью дигитайзера типа "Шифратор". Выбор данного типа продиктован следующими соображениями: широким распространением данного прибора и доступностью его приобретения; наличием автономного принципа кодирования данных (прибор не соединен с ЭВМ); возможностью фиксации результатов на магнитной ленте (МЛ), что позволяет технологично организовать работу по формированию территориальной базы картографических геологических данных и исключает непродуцируемое применение ЭВМ; достаточной точностью кодирования данных (0,4–0,6 мм); высокой производительностью кодирования (10–12 тысяч отсчетов за смену); высокой эксплуатационной надежностью и стабильностью работы.

Использование способа "пофакторного разложения" карт геологического содержания открывает широкие возможности для перевода та-

ких карт в дискретный вид с помощью кодирующего устройства [20].

При разработке технологии автоматизированного ввода информации А.А. Сапунковым [40] был решен ряд вопросов: определение структуры описания картографических данных; выбор способа кодирования графической информации, а также технических средств ввода-вывода; организация информационных массивов; построение процедур ввода, поиска и отбора информации; хранение, редактирование и визуализация картографических данных и некоторые другие.

Существует целый ряд методов структуризации графических изображений. Наибольшее распространение применительно к формализации геолого-геофизического описания территории получили методы матричного и контурного представления данных. Модификации этих методов положены в основу структур описания картографических данных: в виде условно-числовых ( $C$ ) матриц и факторных ( $F$ ) контуров.

Применение матричной формы представления информации традиционно при анализе и интерпретации числовых геофизических, геохимических и других данных, где каждому элементу матрицы  $A = (a_{i, k})$  размером  $n \times m$  ставится соответствующее значение функции  $F_p = f\{p(x, y)\}$ , наблюдаемое или вычисленное в точке земной поверхности с координатами  $x, y$  (значения потенциальных полей — магнитного, гравиметрического, электрического и др.; непотенциальных полей — содержания геохимических элементов, величины альбедо и т.п.). Для автоматизированного ввода картографических данных А.А. Сапунковым предложен метод  $C$ -матриц [40]. Задача получения  $C$ -матриц при этом формулируется следующим образом.

Для территории  $S$ , представленной совокупностью геологических тел (участков, территорий и т.д.)  $\{s_i\}$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$ , выделяется объединение конечного множества непересекающихся участков  $\hat{S} (\hat{S} = M \in S) (M \leq N)$ , такое, что  $\bigcup_{j=1}^M \hat{s}_j = \hat{S}$  и  $\hat{s}_j \cap \hat{s}_k \neq 0$ . Кроме того, задается множество картографических факторов  $\{x_i\} (i = 1 \div N)$ , где  $x_i \subset R (R - \text{множество целых чисел})$ , описывающих геологическое строение территории. На  $\hat{S}$  определено отображение  $\Phi: \hat{S} \rightarrow x$ , такое, что каждому элементу  $\hat{s} \in \hat{S}$  ставит в соответствие единственный элемент  $x \in X$ , т.е.  $\varphi(\hat{s}) = x$ .  $C$ -матрица размером  $n \times m$  получается в результате установления эквивалентности для множества  $S^* = \hat{S} \cup P$ , где  $\{p_l\} = \text{const}$  при  $l = 1 \div [(n \times n) - m]$ , отвечающего соотношению  $S \leftrightarrow \|c_{ik}\|$ , где  $C = (c_{ik})$  — целочисленная квадратная матрица порядка  $n$ . Такая структура описания обеспечивает простоту аналитических преобразований и интерпретации картографических геологических данных в комплексе с числовой информацией, но не совсем экономична с точки зрения  $C$ -матриц.

Представление картографических геологических данных в виде  $F$ -контуров основано на выделении топологических элементов контурного изображения и установлении связи между ними, т.е. задании структуры изображений. С этой целью были выделены четыре типа факторов, эквивалентных четырем элементам их геометрического представления: объемные факторы — ограниченные некоторой замкнутой (геологические тела, блоки и т.д.) или незамкнутой (геофизические поля, стратиграфические единицы и границы и др.) поверхностью; площадные — факторы, имеющие площадь проявления (в двухмерном варианте) на картографической геологической основе (литолого-стратиграфические подразделения, магматизм, тональные поля и кольцевые структуры); линейные — факторы, имеющие только линейные размеры, или те из факторов, которые можно интерпретировать как линейные (тектоника, дайки, зоны минерализации, линеаменты и т.п.); точечные — факторы, представляющие собой как отдельные точки и внесмасштабные элементы (месторождения, рудопоявления, точки минерализации и др.). Точечные факторы задаются координатами  $x_i$ ,  $y_k$  соответствующих точек земной поверхности, линейные определяются последовательностью точек, через которые проходит аппроксимирующая кривая (или отрезки ломаной линии), площадные строятся из линейных замкнутых контуров кривых или многоугольников, а объемные образуются на основе семейства параллельных площадных факторов, секущих по отношению к одной из осей геологического тела [40].

Связь между элементами изображений задается в процессе кодирования с указанием типа считываемого элемента. Этот способ обеспечивает наиболее экономичное описание данных, но обработка получаемых описаний наиболее трудоемка по сравнению с методом  $S$ -матриц.

С учетом разработанных структур описания картографических геологических данных и модели их формализованного представления был выбран принцип поточечного сканирования изображений с помощью полуавтоматических средств кодирования графической информации (дигитайзеров): "Шифратор-2" и "Гарни-2". В качестве устройства отображения использован графопостроитель "Атлас-3". Можно также осуществлять вывод результатов на дисплей и плоттер.

При рассмотрении вопроса организации картографических и числовых информационных массивов А.А. Сапунковым определены три типа баз данных: 1) операционный; 2) главный; 3) архивный.

Операционная база данных (ОБД) представляет собой файловую структуру на магнитных дисках (МД) или магнитных лентах (МЛ), обеспечивающую прямой и (или) последовательный методы доступа. Она предназначена для ввода, хранения, редактирования и вывода оперативного потока картографической геологической и числовой информации, представленной в виде  $S$ -матриц и  $F$ -контуров. Все операции по вводу и корректировке геолого-геофизических данных выполняются

только в ОБД, что обеспечивает возможность мультипроцессного (независимого) режима обработки данных (работа с подбазами ОБД), а также хорошую защиту основных информационных массивов от некомпетентного пользователя и сбоев системы.

Главная база данных (ГБД) ориентирована на использование универсальных систем управления базами данных (СУБД) иерархического, сетевого или реляционного типов. Структура организации и форматы хранения данных определяются требованиями конкретной СУБД. В ГБД с помощью программ интерфейса ввода-вывода обеспечивается формирование основных информационных массивов структурированных данных, поступающих из ОБД. Конкретная реализация технологии ориентирована на использование средств хранения данных, непосредственно предоставляемых операционной системой ЕС ЭВМ.

Архивная база данных (АБД) представляет собой файловую структуру последовательного доступа на МЛ, которая обеспечивает долговременное хранение картографической геологической и числовой информации в экономичном формате. Она связана программными интерфейсами с ГБД и ОБД, что позволяет быстро восстанавливать необходимые массивы информации и проводить операции по сжатию ГБД и ОБД.

Решение поставленных вопросов позволило определить основные структурные элементы технологии автоматизированного формирования территориального машинного банка геологической картографической информации, функционально разделенной на четыре крупных блока: 1) блок кодирования, ввода и обработки контурных картографических геологических данных (*F*-контуров); 2) блок кодирования, ввода и обработки матричных картографических геологических (*C*-матриц) и числовых данных; 3) блок преобразования картографических и числовых данных; 4) блок организации архива картографических и числовых данных.

Первый блок включает в себя: подготовку *F*-контурных картографических данных в виде лист-факторов и последующее их кодирование на дигитайзере; ввод, контроль и формирование в ОБД файла *F*-контурных данных; полную корректировку информации на основе итерационного цикла экспресс-контроля и редактирования, включая визуальный контроль карт *F*-контурных данных, построенных на графопостроителе "Атлас-2", и, наконец, преобразование информации в ГБД или в территориальную базу данных (ТБД).

Второй блок включает в себя: подготовку матричных картографических геологических и числовых данных с последующим их кодированием на дигитайзере; ввод, контроль и формирование в ОБД файла *C*-матриц и числовых данных; полную корректировку информации на основе итерационного цикла контроля и редактирования, включая визуальный контроль *C*-матриц картографических геологических данных и преобразование их к формату представления информации в ТБД.

Третий блок обеспечивает преобразование картографических геологических факторов территориального банка данных с использованием операций булевой алгебры-логики: конъюнкции ( $A \cup B$ ), дизъюнкции ( $A \cap B$ ), импликации и т.п., что позволяет получать различного рода производные картографических геологических факторов путем введения формально-логических отношений между отдельными факторами и их группами.

Четвертый блок обеспечивает: создание долговременного архива контурных картографических геологических данных на МЛ (АБД) и матричных картографических геологических и числовых данных на МЛ (АБД); контроль и редактирование информации и оперативное ее восстановление в ТБД (ГБД) и ОБД.

Разработанный комплекс программ автоматизированного ввода картографической геологической и числовой информации может быть использован и для обработки других видов картографической информации [40].

#### **Глава 4. ИНФОРМАЦИОННО-ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ – СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОИНФОРМАЦИИ**

##### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

Принципиальной особенностью как отдельных этапов, так и в целом процесса геологического прогнозирования на различных стадиях работ является последовательность в проведении операций сбора, переработки и оценки имеющейся исходной информации. Решения и рекомендации, принимаемые на каждой стадии (на основе содержательного анализа и комплексной интерпретации всей информации), можно рассматривать в качестве входной управляющей для выбора вариантов проведения полевых работ на последующих стадиях. Поисковые и оценочные критерии, установленные в процессе более детальных исследований, могут быть использованы для переоценки рекомендаций, полученных на ранних этапах поисково-оценочных работ. Наличие подобных контуров обратной связи в итерационном процессе поисково-оценочных работ характеризует общую систему управления данным процессом как достаточно сложную информационно-кибернетическую систему. Обосновывая пути использования ЭВМ в сложных кибернетических системах, С.Н. Никаноров отмечал, что дисциплина мышления коллектива людей, диктуемая достаточно мощным и ясным концептуальным аппаратом, возможно, является более важной вещью, чем математический аппарат, позволяю-

щий выполнять те или иные расчёты. Новейшие системы представляют собой интегрированные человеко-машинные системы, строго ориентированные на решаемые проблемы. Системный анализ как методология используется в таких системах в роли каркаса, объединяющего все необходимые методы, знания и действия для решения проблемы в целом.

Рассматривая вопросы организации системы человек — ЭВМ, В.М. Глушков и другие отмечали, что она может в принципе состоять из заказчика (пользователя или постановщика задачи), программиста, оператора по устройству связи с ЭВМ, оператора по вводу и подготовке данных и собственно ЭВМ.

В начальный период внедрения ЭВМ в практику работ, когда они использовались главным образом для решения отдельных задач, эффективность систем человек — ЭВМ определялась в первую очередь техническими возможностями машин. По мере развития технических средств обработки информации и увеличения парка ЭВМ стал расширяться и круг решаемых задач прикладной геологии. При этом происходило перераспределение соотношения между количеством задач, требующих участия человека в процессе решения и не требующих его участия, причем такое перераспределение идет в сторону увеличения задач первого типа. В соответствии с этим имелись две основные тенденции в развитии традиционной системы человек — ЭВМ. Одна тенденция заключалась в стремлении отдалить заказчика от машины, "включив" между ним и программистом консультанта, на которого возлагалось выполнение основных действий, входящих в этапы ознакомления с задачей, и составление плана ее решения с помощью ЭВМ. В качестве таких консультантов выступали алгоритмисты или системные программисты, хорошо знающие особенности решения различных задач на основе ЭВМ.

Другая тенденция сводилась к тому, чтобы приблизить заказчика к ЭВМ, причем в качестве консультанта должен выступать сам специалист-заказчик, анализирующий данные на основе имеющегося опыта и применения различных математических методов. Эта тенденция отражает передовые направления научно-технического прогресса.

Анализируя методики обработки геологических и геофизических данных при оценке рудоносности площадей, можно отметить, что обе эти тенденции получили отражение в двух крайних подходах [34]: 1) установление непосредственных связей между орудением и некоторыми особенностями геологического строения и физических полей, минуя этап комплексной интерпретации ("машинный прогноз"); 2) использование комплекса геолого-геофизических данных с максимально полным учетом связей между геологическим строением и физическими полями и неформализованных знаний геолога ("человеко-машинный прогноз").

Различие в этих подходах носит принципиальный характер, касается

методологии исследований и определяет возможные пути создания проблемно-ориентированных систем геологического прогнозирования.

Сторонники первого направления, не рассматривая содержательные аспекты связей между рудоносностью территории и ее геологическим строением, пытались установить прямые зависимости между оруденением и геофизическим полем, обосновывая этот подход неясностью структурного и магматического контроля рудных полей, процессов регионального метаморфизма и других факторов.

Вместе с тем использование при решении задач оценки рудоносности площадей в качестве исходных только геофизических или геохимических данных в цифровом виде по исследуемой территории, не считая минимального объема данных по эталонным объектам при некоторых априорных допущениях, позволяет полностью автоматизировать процедуру прогнозирования и выполнять решение задач "от журналов до перспективных площадей" в автоматическом режиме, исключая участие специалистов. Легкость получения результатов в виде перспективных площадей и участков фактически без усилий специалистов сильно подкупает возможностью реализации, и поэтому способствует развитию подобных автоматических и автоматизированных систем. Системы этого рода могут эксплуатироваться на вычислительном центре (ВЦ) без геолога, но по его заказу. Существующие организационные формы эксплуатации вычислительной техники в рамках ВЦ и различных подразделений АСУ ориентированы именно на такой путь развития.

Такого рода подход приемлем для решения хорошо структурированных проблем, например таких, как предварительная обработка результатов полевых геофизических и геохимических измерений, составление карт потенциальных полей, интерпретация данных каротажа и т.п.

Второе направление, использующее максимальный перевод геофизической и другой информации на геологический язык, основано на установлении теоретически обоснованных связей между рудоносностью и геологическим строением исследуемой территории с неизменным привлечением знаний и опыта геолога-прогнозиста. На основе второго направления возможно создание человеко-машинных автоматизированных информационно-прогнозирующих и информационно-логических систем. Как показывает опыт, такого рода системы в руках специалистов, обладающих большим опытом интерпретации и хорошо знающих район исследований, позволяют достаточно эффективно как решать задачи выделения рудных объектов, так и выполнять методические исследования, направленные на выбор методики решения прогнозной задачи. Однако использование таких систем требует от специалистов не только определенного опыта, но и полноты знаний геолого-геофизических, геохимических, аэрокосмических и других материалов по значительным территориям. Такие системы должны эксплуатироваться непосредственно самими геологами. Наиболее перспективным направле-

нием в настоящее время является путь комплексного использования всех имеющихся данных планирования и управления процессом обработки, последовательной формализации процедур по мере накопления знаний и опыта решения практических задач с использованием математических методов и ЭВМ [21 и др.]. Реализовать в подобном виде решение прогнозных задач можно в настоящее время лишь в человеко-машинном режиме.

Таким образом, полностью автоматическое решение на ЭВМ всех вопросов прогнозирования геологических объектов и ситуаций невозможно, по крайней мере, в течение обозримого будущего. Поэтому интерес представляют человеко-машинные системы, в которых на ЭВМ производится перебор различных вариантов сочетания признаков для больших площадей, предоставляя геологу возможность анализа, выбора и комбинации вариантов.

Решение задач геологического прогнозирования может быть осуществлено, в частности, путем создания человеко-машинных диалоговых систем, основу которых должны составлять территориальные базы картографической геологической информации и базы знаний специалистов-геологов о закономерностях локализации оруденения. Использование современных ЭВМ с развитой периферией, а также мощных микроЭВМ и персональных компьютеров открывает более широкие возможности для создания указанных машинных баз данных. Как было показано в главе 3, реальной становится перспектива создания территориального машинного фонда геологической, картографической и числовой информации по определенному конкретному региону, а также сохранения в памяти ЭВМ моделей формирования геологических рудных объектов.

Специалисты при работе с такой системой должны иметь возможность в процессе человеко-машинного диалога осуществлять многовариантное прогнозирование на основе математических приемов обработки информации, анализировать промежуточные и конечные результаты прогнозирования. Человеко-машинные методы решения задач геологического прогнозирования должны предусматривать возможность выделения потенциально-перспективных рудных объектов и рассчитывать их прогнозные ресурсы. Система должна быть легко адаптируема к любым производственным условиям, а человеко-машинные методы геопрогноза в максимальной степени близки к традиционной методике решения задач геологического прогнозирования. Кроме того, система должна иметь возможность дальнейшего развития и включения в нее различных математических и эвристических подходов.

Все это касается систем, в которых технология обработки данных задается непосредственно геологом. Такие системы будем называть "информационно-прогнозирующими". Примером таких систем являются системы РЕГИОН, РЕГИОН-СКАНДИНГ и др.

В последнее время все большее распространение получают системы

другого типа: системы логического анализа данных, или экспертные системы. "Инициативу" в обработке и анализе данных в них "берет на себя" ЭВМ по мере получения дополнительной информации от геолога—пользователя системы [23]. Они содержат специальные программы логического анализа и базу данных (знания экспертов по определенному типу месторождений); ориентированы на работу с геологом в диалоговом режиме на естественном языке. При этом геолог все время отвечает на вопросы системы. Основу экспертных систем составляет логическое программирование. Программы записываются в виде некоего логического правила. Например, если геолог исследует территорию с преобладающим развитием кислых интрузивных пород, то это повышает возможность локализации здесь месторождений силикатной рудной формации, но уменьшает вероятность обнаружения рудных скопленений фемической рудной формации. Такой подход весьма удобен, так как позволяет постепенно накапливать необходимую информацию как от экспертов, так непосредственно и от самого пользователя — геолога. Порядок обращения логической программы к правилам последовательно определяется выводами, получаемыми в процессе выполнения исследования. Таким образом, логическая программа представляет собой процедуру направленного поиска в целях получения ответа на поставленную задачу [51]. Например, экспертной системе можно задать вопрос: могут ли быть в пределах конкретной территории месторождения меди? Система сначала формулирует свой вопрос к пользователю-геологу (с помощью дисплея, на естественном языке) в виде некоторой первичной предпосылки, которая постепенно доказывается или отвергается логически-вероятностным способом с помощью постановки дальнейших вопросов и ответов на них (дополнительной информации), получаемых от геолога. Затем система организует поиск необходимых для ответа правил. Например: какой состав и возраст интрузивных образований?; имеются ли анализы их химического состава?; если да, то какие результаты анализов?; к каким формациям относятся образования?; фациальный состав?; литология образований?; структурные особенности территории?; характер и степень метасоматических изменений?; минералогические параассоциации?; наличие геофизических аномалий?; наличие вторичных геохимических ореолов?; их состав и концентрации? и т.д.

Выполняя логические операции, система ставит различные комбинации из заложенных в ней моделей рудогенеза, включая известные практические и теоретические закономерности размещения месторождений и различные региональные и локальные рудоконтролирующие факторы (например, по моделям, описанным В.И. Кусевичем, Л.П. Зеликовским [15], В.И. Кривцовым, В.А. Нарсеевым [14], П.А. Литвиным, М.Л. Сахановским и др. [26], А. Дудой и др. [51]). Выполнив логические действия, система составит различные комбинации из имеющихся правил

(моделей рудогенеза) и после каждого ответа пользователя установит достаточность информации для наиболее правильного (вероятного) ответа — прогнозного заключения. Этот процесс по сути напоминает доказательство теоремы. Система постоянно обращается к заложенным в ней моделям рудогенеза (решающим правилам), что позволяет ей либо принять, либо отбросить исходную предпосылку (гипотезу). В процессе выполнения такого поиска система может пойти по "ложному пути". Если в этом случае очередной поиск окончится неудачей (противоречие дополнительной информации, полученной от пользователя заложенной в базе данных системы модели), то система автоматически вернется к исходной позиции и поведет поиск иначе — по другой модели рудогенеза. Специфической особенностью программно-математического обеспечения такой проблемно-ориентированной человеко-машинной экспертной системы является то, что на основе аксиоматического описания объекта прогноза в процессе решения задачи находятся логические ответы. Такое программное обеспечение построено на двух типах утверждений: "если ..., то ..." и в последующей выработке третьего утверждения той же структуры. На первом шаге система анализирует внутреннюю синтаксическую структуру и делает дальнейший логический шаг, например:

если  $A$ , то  $B$  (первое утверждение);  
если  $B$ , то  $C$  (второе утверждение),  
где  $B$  — общая величина для обоих утверждений.  
Тогда, делая логический вывод, получаем  
если  $A$ , то  $C$  (третье утверждение).

Таким образом, последовательность действий в программном обеспечении экспертной системы строится в виде разветвляющегося графа с наличием обратных ходов от каждого шага принятия решения. В зависимости от правильности (аналогичности) накапливаемой информации об объекте исследования с имеющейся моделью система в итоге выдает вероятность выявления геологического рудного объекта исследуемого типа [51].

Вместе с тем следует учитывать, что экспертные системы не могут полностью заменить информационно-прогнозирующие. Их недостаток в том, что, работая с такой системой, геолог использует имеющиеся в базе знаний модели. Информационно-прогнозирующие системы, наоборот, позволяют учитывать опыт, знания и интуицию самого геолога.

#### **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАЗРАБОТОК ПО СОЗДАНИЮ СИСТЕМ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

В последнее время наблюдается широкое внедрение современных средств обработки информации и ЭВМ в практику геологических исследований; интенсивно растет количество публикаций по данной тема-

тике. Интенсивно развивается направление по разработке автоматизированных систем хранения, накопления и поиска информации (банков данных).

Рассмотрим некоторые разработки применительно к проблеме геологического прогнозирования [22, 23]. Вопросы применения математических методов при прогнозировании полезных ископаемых освещены в работе [45], где приводится краткое описание общей структуры автоматизированной системы прогнозирования. При этом последовательность действий геолога заключается в постепенном переходе от более мелких стадий анализа к более высоким с использованием на каждом шаге (если это возможно) сочетания соответствующих вероятностных и логических (эвристических) алгоритмов с выработкой того или иного решающего правила.

В работе А.Н. Бугайца и Л.Н. Дуденко подробно описаны методы предварительной обработки геолого-геофизических данных, однако недостаточно полно освещены вопросы информационного обеспечения системы [2]. Известны системы массовой обработки геохимических данных. Системы такого рода позволяют проверять геологическую однородность и "компактность" образа, вычислять необходимые статистические характеристики и классифицировать объекты. В.В. Ломтадзе [23] разработана автоматизированная система обработки геофизических данных (СОД "Геофизика"), в состав которой входит управляющая программа, а также обслуживающие и рабочие. Им обосновывается необходимость наличия в этой системе средств для описания числовых массивов; все массивы должны иметь одинаковую файловую структуру. Такая организация данных обеспечивает возможность стыковки программного обеспечения независимо от тематической характеристики массивов.

Система АСОД-ПРОГНОЗ [23] имеет банк данных с большим набором средств управления, учитывающих специфику информации, обеспечивает отделение описания данных от самих данных, выполняет функции информационно-поисковой системы фактографического типа, управляет большими файлами данных, имеет цифровой, текстовой и графический ввод-вывод. Исходная информация для прогнозно-металлогенических исследований представляется в виде текста (описание разрезов, шлифов и др.), чисел (геофизические поля, результаты анализов) и в графическом виде (каротажные диаграммы, карты различного содержания и др.). Решение задач осуществляется с помощью методов статистического, корреляционного, факторного, регрессионного анализов, теории случайных функций и распознавания образов. Система позволяет также решать прямые и обратные задачи гравиразведки и магниторазведки. Конечным продуктом металлогенического анализа являются перечень информативных признаков, набор правил, список перспективных объектов, прогнозные карты.

М.М. Чагиным, С.В. Ветровым и др. [23] создана система комплексной интерпретации СКИД, позволяющая проводить обработку геологической, геофизической и геохимической информации. Управление процессом обработки данных организовано на основе созданных программ, обеспечивающих связь между вычислительными процедурами и специализированными файлами для хранения информации. Система имеет четыре комплекса программ, предназначенных для: описания свойств геологических объектов; статистического анализа данных; решения геологических задач. Кроме того, имеется набор программ для решения специфических задач моделирования геологических объектов.

Б.А. Чумаченко, Е.П. Власовым, В.В. Марченко и др. [45] создана и описана автоматизированная информационно-прогнозирующая система (АИПС) РЕГИОН. Разрабатывая эту систему, авторы исходили из того, что конечная эффективность геологоразведочного процесса в значительной степени определяется качеством выполнения процедур прогнозирования на каждой стадии геологических исследований. АИПС реализована как человек-машинная система на основе рационального сочетания возможностей ЭВМ и специалистов-геологов. Главная особенность этой системы — возможность комплексной интерпретации разнородной многофакторной геоинформации. Система проблемно ориентирована на разработку вариантов прогнозных решений в интерактивном режиме "геолог-ЭВМ" по предварительно обработанным данным (картам геологического содержания, материалам интерпретации геофизических, аэрокосмических и других съемок). Она позволяет осуществлять совместный анализ как качественных (геологические карты и др.), так и количественных (геофизические измерения, геохимические анализы) материалов. Это достигается их предварительной нормализацией. Одной из важнейших особенностей системы является то обстоятельство, что в ней применен подход к преобразованию картографической геологической информации в дискретный вид, приближающий машинный анализ этих данных к их визуальному восприятию человеком. Система РЕГИОН получила значительное распространение в геологических организациях. Дальнейшим развитием этой системы стала новая человек-машинная система количественного прогнозирования РЕГИОН-ОС [22].

Б.С. Зейликом, В.В. Веселовым, А.Н. Кленчиным создана версия этой системы — РЕГИОН-2. Рассматривая перспективы развития автоматизированных систем геологического прогнозирования, эти авторы за основу приняли следующую последовательность автоматизированного прогнозирования месторождений полезных ископаемых: 1) сбор и предварительная обработка геолого-геофизических данных; 2) фильтрация геолого-геофизических полей; 3) количественное описание геолого-геофизических полей; 4) районирование территории по комплексу геолого-геофизических данных; 5) построение объемных геологических моделей; 6) прогнозная оценка территории [22].

Несколько иная схема обработки информации при геологическом прогнозировании (оценка сходства изображений) предложена Э.Я. Островским, А.А. Урсовым и Р.С. Канторовичем [32] в системе ЦЕЛЕВОЙ ПРОГНОЗ: 1) ввод в память вычислительной системы результатов наблюдений; 2) формирование матриц изображений — моделей среды путем организации наблюдений в узлах равномерной сети; 3) преобразование матриц (например, пересчеты исходных гравитационных полей и др.); 4) классификация элементов матриц; 5) разбиение множества матриц на подмножества; 6) формирование полных совокупностей элементарных изображений в виде базовых и производных дихотомий; 7) образование множества матриц пар; 8) ранжирование множества матриц пар по сходству в соответствии со значениями синтропии; 9) вывод на печать результатов ранжирования; 10) вывод на печать по требованию исследователя любой копии.

Наиболее полно современные тенденции развития человеко-машинных систем геологического прогнозирования реализованы в системе РЕГИОН-СКАНДИНГ (Э.А. Немировский и др.). Она сочетает в себе элементы прогнозирующих, обучающих и экспертных систем [22, 46 и др.].

Быстрыми темпами растет число публикаций по человеко-машинным системам за рубежом. Обзор современных автоматизированных систем для накопления и статистической обработки геоинформации приведен в работе Ш. Би. Он рассматривает системы, разработанные и практически используемые в государственных службах и частных компаниях Австралии, Великобритании, Канады, Нидерландов, Франции, ФРГ и США [22].

Общие принципы автоматизированной обработки геологической информации и характеристика создаваемой базы данных в отраслевом центре (Геофонд, Прага) приведены в работах И. Грушки и др. В работе И. Чалоговича приведены основы построения и эксплуатации геологической информационной системы (ГИС), которую предполагается освоить и использовать в ВНР. Д. Жеффроем и Т. Вигналом одними из первых предложена и использована система для статистической обработки данных при региональных исследованиях [23]. В общем виде этот подход состоит в том, что исследуемый регион разделяется на квадратные ячейки, часть которых (контрольные) хорошо изучена и содержит известные месторождения. Остальные ячейки являются объектами изучения. Для всех ячеек в вычислительном центре собирают все необходимые материалы, обрабатываемые в последующем с использованием моделей соответствия, тренд-анализа и характеристического анализа. В результате обработки на ЭВМ выявляются участки, перспективные для локализации месторождений; при этом указываются вероятность обнаружения и некоторые экономические параметры.

Дж. Ченгом описана современная система с графическим вводом

и выводом, специально разработанная для применения в геологии, — система диалогового многовариантного статистического анализа информации СИМСАГ [22]. Она позволяет геологу использовать методы главных компонент, дискриминантный и регрессионный анализы. Ввод и вывод осуществляются в традиционной для данного подхода форме представления геологической информации. Вся исследуемая территория разбивается на равные участки (пикселлы), по каждой из которых приводится исходная информация. Площади, информация по которым подлежит обработке, выбирают непосредственно на графическом дисплее путем счерчивания курсором необходимого контура. Результаты расчетов (как промежуточных, так и окончательных, например прогнозные площади) показываются как в виде цветowych шкал, так и непосредственно в виде конкретных чисел для каждой ячейки. СИМСАГ представляет собой интерактивную графическую систему и предназначена для оценки минеральных и энергетических ресурсов на основе комплексного анализа картографической информации. Программное обеспечение содержит модули ввода графических данных, пакеты интерактивной обработки информации, программы математических расчетов и программы интерактивной визуализации данных. Исходная картографическая информация кодируется в бинарном виде.

Другим наиболее современным примером системы обработки и анализа геологических изображений является система (пакет программ) ДЖИАПП, представляющая собой человеко-машинную графическую систему с весьма широким диапазоном возможностей программного обеспечения, позволяющего осуществлять "механическое" преобразование и последующий анализ многофакторной информации. Она создавалась около 5 лет А. Фаббри в университете Оттавы (Канада). Предполагается перевод системы ДЖИАПП на мини-компьютер ВАКС-780. В системе ДЖИАПП, как и в системе РЕГИОН, вся исследуемая территория делится на элементарные ячейки. В целом база данных содержит контуры распространения отдельных литологий, горизонтов пород и т.п. При этом вся территория подразделена на отдельные районы. Таким образом, с одной стороны; база данных содержит сведения о распространении геологических образований, а с другой — конкретные адреса каждой элементарной ячейки. Каждая такая ячейка несет информацию о доле конкретных геологических образований, развитых в ее пределах, а также об общем распространении этих образований в пределах всей исследуемой территории. Подобную информацию определяют как "цифровой образ". Цифровой образ дается для каждой элементарной ячейки не только по геологическим факторам, но и по геофизическим, гамма-спектрометрическим и т.д. Все цифровые образы имеют единую запись и пространственное разрешение. Это позволяет осуществлять их комбинации без изменения проекций и масштабов, тем самым реализуется возможность комплексного анализа данных, но лишь в бинарной форме.

Система ДЖИАПП позволяет осуществлять логические операции по каждой элементарной ячейке — объединение ("и"), разъединение ("или — или"), отрицание ("нет") и исключение ("или"), а также пространственные преобразования над бинарными и цифровыми образами — "расширение", "уплотнение", "выравнивание" и др. Кроме того, система дает возможность осуществлять пространственные сдвиги и сравнение цифровых образов, выполнять автоматизированную индексацию исследуемой территории, рисовку диаграмм пространственного размещения участков и т.д.

Средства общения пользователя с системой ориентированы в основном на редактирование вводимых контурных данных. Возможен ввод данных в систему путем сканирования специально подготовленных 35-миллиметровых диапозитивов, однако при этом требуется участие оператора для идентификации каждого участка. Промежуточные и конечные результаты представляются в виде дисплейных изображений, графических распечаток, магнитных и дисковых файлов [23].

Одной из наиболее развитых человеко-машинных систем, предназначенных для целей геологического прогнозирования, является система ПРОСПЕКТОР [23, 51 и др.]. Она может быть отнесена к системам "экспертного" типа. Основа ее работы заключается в имитации процесса мышления геолога при выборе им прогнозных решений. Система содержит банк моделей (знаний экспертов о закономерностях локализации конкретных типов месторождений), а также ряд моделей, таких как "сульфидные месторождения типа Куроко", "массивные свинцово-цинковые месторождения типа Миссисипи" и др.

Формальная модель рудного месторождения кодируется в виде совокупности отношений между конкретными фактическими данными, которыми располагает геолог, и существующими геологическими гипотезами (моделями). Различные полевые данные (факторы) и предположения (гипотезы) имеют в модели информативные веса, определяемые на основе обработки литературных данных и экспертных заключений (решающие правила). Эти правила определяют, каким образом изменения знаний пользователя системы об одном факторе (предложении, гипотезе и т.п.) отражаются на других факторах и влияют на процесс формирования конечного прогнозного результата.

Система ПРОСПЕКТОР рассчитана на решение задач трех типов: 1) выделение перспективных площадей; 2) региональная оценка прогнозных ресурсов и 3) выбор мест заложения поисковых скважин.

Задачи первого типа решают в интерактивном режиме, где система ПРОСПЕКТОР и геолог ведут "диалог" на английском языке с помощью дисплея. При решении задач второго типа используется вопросник в системе, который последовательно перечисляет все необходимые вопросы геологу, после чего выдается заключение. Наконец, при выборе места заложения скважин используется также и графическая информа-



поисковых и оценочных работах. Вместе с тем эта система может использоваться лишь на самых современных ЭВМ.

Фрагмент экспертной модели, используемой в системе ПРОСПЕКТОР, приведен на рис. 9. Прямоугольниками обозначены некоторые утверждения или "интервалы значений". Прямоугольниками с входящими и исходящими стрелками характеризуют гипотезы (исключая прямоугольники со словами в кружках "и", "или"), представляющие собой некоторые логические отношения. Пунктирные стрелки обозначают необходимые условия, определяющие полезность (активность) утверждения. Верхний прямоугольник — подмодель ситуации с наличием интрузивной системы как одного из факторов, перспективного для локализации меднопорфирового оруденения. Такого рода подмодель является частью модели более высокого иерархического уровня. Таким образом, происходит последовательное приближение к конечной модели. Эта модель охватывает все факторы, благоприятные для локализации меднопорфирового оруденения в исследуемом районе. Цифра в правом верхнем углу прямоугольника означает априорную или статистическую начальную величину вероятности успеха исследуемой гипотезы. Над прямоугольниками приведено сокращенное наименование программы, реализующей конкретное утверждение. Цифры на стрелках, входящих в прямоугольники, функционально показывают влияние ответа (утверждения, фактора) на конечный успех.

## ЧЕЛОВЕКО-МАШИННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ СИСТЕМА РЕГИОН

### СТРУКТУРА И СХЕМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Система РЕГИОН состоит из следующих основных частей [45 и др.]: блока кодирования и ввода геологической информации всех видов, в том числе картографической; территориального банка геологических данных и моделей, включающего как исходную, так и трансформированную информацию; блока разработки вариантов решений, содержащего пакеты программы, реализующих математические и эвристические алгоритмы распознавания и оценки геологических ситуаций, описанных в многопараметрическом пространстве геолого-геофизических и геохимических признаков; блока обеспечения диалога пользователей с системой (интерфейса), включающего в себя язык пользователей, транслятор и управляющую программу; человеко-машинной технологии, охватывающей все этапы решения задачи геопрогноза.

Первичные исходные геологические и другие данные (картографического или числового типа, а также текстовые описания геологических объектов) вводятся в территориальный банк данных. При этом осуществляются их контроль и привязка к условной системе координат.

Исходная информация подвергается предварительной обработке с целью ускорения последующего процесса решения задач: логического (объединение факторов, пересечение и т.д.) и математического преобразования. Совокупность исходной и преобразованной информации составляет так называемый "территориальный машинный фонд геологической информации". Последующий процесс решения аналитических и классификационных задач происходит автономно от описанного процесса накопления информации. С этой целью пользователи — геологи-интерпретаторы с помощью специальных программ осуществляют отбор информации и решение задач различных типов в соответствии с конкретными постановками и своими собственными концепциями. Совокупность математических методов и программ обработки данных составляет блок разработки вариантов решений. Выходная информация, в том числе справочная, выдается в визуализированном виде пользователям системы. Запросы пользователей к системе на все виды работ формулируются на языке пользователей. Преобразование запросов пользователей в задания системе, работающей под управлением операционной системы ЭВМ, производится в специальном блоке (трансляторе).

Получаемые в процессе человеко-машинного взаимодействия классификационные и прогнозные карты анализируются геологом-интерпретатором — пользователем системы, который решает вопрос о возможности и целесообразности их использования или о постановке новых экспериментов с измененными исходными данными и параметрами решения.

В процессе работы системы исходная информация проходит ряд различных преобразований. Вид и последовательность этих преобразований зависят от исходных данных (картографические, цифровые), характера требуемой обработки и форм выдачи результатов, необходимых пользователю. Вся совокупность преобразований информации в системе разделяется на два этапа: 1) накопление информации; 2) решение содержательных задач прогнозирования и оценка геологических ситуаций. Первый этап практически соответствует формированию и ведению территориального машинного фонда геологических данных. Машинный фонд состоит из двух основных массивов: первичного массива исходных данных и массива трансформированной информации. Первичный массив, выполняющий функции базы исходной информации, состоит из двух "библиотек факторов": картографических и числовых, содержащих также и текстовые описания факторов. Он служит основой для последующего преобразования исходной информации, а также для выдачи различных справок по запросам пользователей. Второй массив является постоянным архивом преобразованной признаковой информации. Значение признака в любой точке может изменяться в пределах  $\pm 127$  баллов.

На рис. 10 приведена общая схема преобразования информации

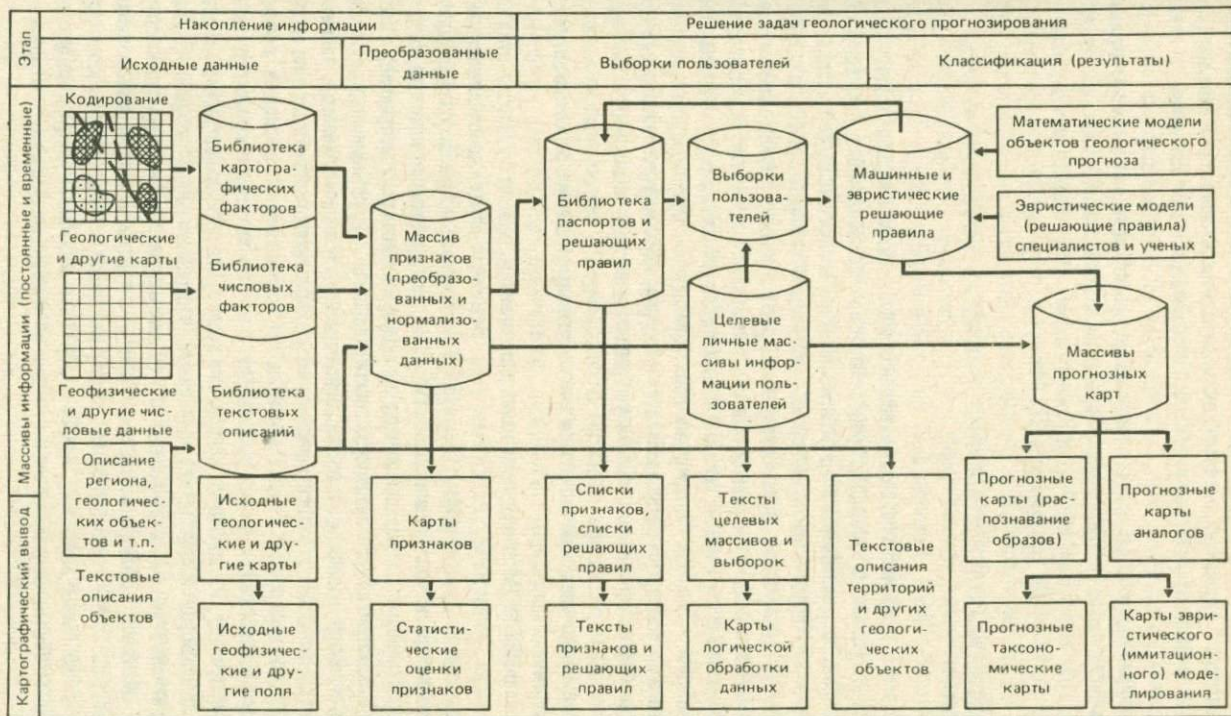


Рис. 10. Схема преобразования информации в системе РЕГИОН. По В.А. Яковлеву и др. [45]

в системе [45 и др.]. Одним из отличительных свойств системы РЕГИОН является человеко-машинный характер решения содержательных задач. В этом аспекте систему следует рассматривать в качестве инструмента обработки и анализа геологической информации, используемого геологами.

Системы подобного рода позволяют геологам в процессе взаимодействия человека и ЭВМ вырабатывать серии вариантов прогнозных решений, из которых выбираются лучшие (по заданным критериям оценки).

#### ПРИНЦИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ-ГЕОЛОГОВ С СИСТЕМОЙ

Проблема широкого практического внедрения современной вычислительной техники в прикладную геологию осложняется в настоящее время рядом серьезных трудностей. К ним относятся, в первую очередь, высокая трудоемкость ввода исходной информации в ЭВМ и недостаточно развитые средства непосредственного общения конечных пользователей (специалистов-геологов) с ЭВМ на естественном языке. Основные причины такого положения объясняются сложностью существующих систем кодирования исходной информации, весьма ограниченным распространением аппаратуры автоматического кодирования, значительным смысловым разрывом между языками конечных пользователей и входным языком программного обеспечения, а также сложностью освоения имеющегося специализированного математического обеспечения.

Система РЕГИОН предназначена для коллективного использования одновременно многими геологами при решении задач геологического прогнозирования на различных стадиях исследований. Поэтому функционирование системы на каком-либо ВЦ предполагает наличие "администратора системы", т.е. специалиста, отвечающего за генерацию системы, ее сохранение и непрерывную эксплуатацию. Другим специалистом, отвечающим за функционирование, пополнение и использование машинного территориального банка геологических данных, является так называемый "администратор банка данных" (допускается также и совмещение этих функций). В соответствии с требованиями геологов возможны различные постановки задач, что может потребовать дальнейшего развития и совершенствования системы "подключения" к ней других программ и систем — эти функции выполняет программист-разработчик. Наконец, решение содержательных задач осуществляется геологами-интерпретаторами — основными пользователями системы, которые формируют из базы данных личные целевые массивы информации по исследуемым территориям и выполняют комплексный анализ в режиме диалога.

Наличие в системе широкого спектра функций позволяет пользователям и обслуживающему персоналу проводить обработку исходной информации по различным технологическим схемам. Решение любой задачи, в том числе информационно-справочной или содержательной, состоит в последовательном выполнении ряда функций. Технологические программные модули решения имеются на всех этапах работы системы, в том числе и на этапе содержательного решения задач, где набор таких модулей весьма велик. Все задания для работы системы сохраняются в "библиотеке заданий". Программное обеспечение системы и обобщенный язык функций реализованы В.А. Яковлевым.

Использование какого-либо математического подхода при решении конкретной задачи в системе требует разработки специализированной методической схемы взаимодействия "специалист—ЭВМ". Под этим понимается определенная последовательность операций диалога специалиста и ЭВМ при решении конкретной задачи на основе реализации какого-либо математического метода. При этом специалист (геолог-интерпретатор) в процессе решения анализирует качество результатов, повышая тем самым достоверность окончательных результатов. Так, например, при решении задачи с использованием алгоритмов распознавания образов требуется определить необходимые признаки, выбрать эталонные объекты обучения, составить матрицу характеристик этих объектов, проверить однородность выборки, получить решающее правило, проверить качество распознавания на контрольных объектах, выполнить процедуру классификации.

Применение методов таксономии для безэталонного районирования территории (на основе принципов общности, исключительности и т.п.) требует другой схемы взаимодействия специалиста и ЭВМ в процессе решения поставленной задачи.

Однако различные схемы обработки информации не могут полностью заменить традиционных методов составления геологических заключений. Поэтому повышение эффективности использования математических методов и ЭВМ в прикладной геологии состоит также и в более полном использовании теоретических знаний и опыта специалистов-геологов в виде эвристических решающих правил, методов экспертных оценок и др. В соответствии с этим разработано несколько методических схем, позволяющих на основе территориальной машинной базы данных решать различные содержательные задачи оценки геологических ситуаций, одновременно используя различные методические подходы. Известно, что анализ геологических ситуаций специалисты выполняют с учетом слабо- или вообще неформализуемых данных. В этих условиях огромное значение приобретает личный опыт специалиста, его способность по некоторым характеристикам мысленно представлять и проследивать ход отдельных процессов, явлений и т.п. В связи с этим возникает необходимость построения методической схемы взаимодействия, позволяющей

наиболее полно учитывать знания специалиста и эффективно использовать их при разработке вариантов прогноза. Известно также, что одновременная реализация прогноза на основе нескольких подходов, построенных на различных методических приемах, существенно повышает достоверность окончательных результатов. Поэтому в системе РЕГИОН заложена методическая схема, позволяющая параллельно решать задачи геопрогноза различными методами. При этом достоверность конечных результатов повышается, во-первых, за счет применения различных методических подходов (повышение качества конечного решения на макроуровне) и, во-вторых, за счет анализа специалистом промежуточных результатов процесса решения, как-то: коррекция факторов, оценки информативности и т.д. (оптимизация решения на микроуровне). Количество таких методов анализа информации не лимитируется.

Наличие развитого информационного обеспечения в виде территориальной базы геологических данных позволяет практически реализовать любую обработку информации при решении задач геологического прогнозирования.

Широкий комплекс различных методических подходов к обработке информации, сохраняемой в базе геологических данных, позволяет геологам осуществлять быструю оценку информативности различных наборов признаков для отдельных геологических рудных объектов и выделять на изучаемой территории перспективные участки.

#### СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА НАЗЕМНОЙ И ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ НУЖД ГЕОЛОГИИ (РЕГИОН-СКАНДИНГ)

Эта система является развитием предшествующих разработок систем ОЦЕНКА [5] и РЕГИОН [45]. Опыт внедрения и использования в геологическом производстве этих систем и созданной на их основе человеко-машинной технологии позволил определить основные направления совершенствования методов и средств, предназначенных для оказания эффективной помощи специалистам-геологам в решении их практических задач [23, 46].

С учетом тенденций в области прикладной информатики эти направления Э.А. Немировский определяет следующим образом:

ориентация предлагаемых методов и средств на конечного пользователя-геолога, не имеющего специальной квалификации в области использования математических методов и ЭВМ;

реализация полностью интерактивного характера работы при накоплении, ведении, обработке данных и анализе результатов;

включение в систему наряду с традиционным текстовым диалогом специальных средств для организации графического диалога, в рамках которого геолог может оперировать с наиболее привычной формой представления данных — изображениями;

обеспечение возможности накопления и использования экспертных геологических моделей в процессе формирования прогнозных заключений.

При реализации системы были также учтены два дополнительных требования: система должна быть доступна возможно более широкому кругу геологов и с этой целью должна быть реализована на современных мини-ЭВМ, являющихся основными вычислительными средствами производственных геологических организаций; необходимо обеспечить преемственность технологии при переходе на новые типы ЭВМ (в особенности микро-ЭВМ), для чего программное обеспечение системы должно быть реализовано целиком на наиболее распространенном языке высокого уровня.

Система РЕГИОН-СКАНДИНГ реализована на мини-ЭВМ и поддерживает основные компоненты технологии:

- накопление и хранение информации о геологическом строении изучаемых территорий и объектах прогнозирования в базе данных;

- обработка данных по различным методическим схемам на основе использования методов распознавания образов, кластерного анализа и эвристического моделирования;

- представление знаний экспертов-геологов в виде эвристических моделей, хранящихся в базе знаний;

- синтез новых знаний о закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых и построение на их основе вариантов прогнозных заключений;

- интерактивный анализ вариантов специалистами-геологами на основе диалога двух типов: текстового и графического;

- оформление результатов моделирования в традиционно используемых формах геологической графики.

Основные компоненты технологии поддерживаются в системе за счет наличия наряду с традиционными блоками еще и таких, как территориальный банк данных, блоки ввода, преобразования, обработки и отображения информации, принципиально новых элементов и расширения возможностей ранее существовавших блоков. Важнейший элемент системы РЕГИОН-СКАНДИНГ — блок поддержки взаимодействия специалиста-геолога с ЭВМ.

Разработанный на основе критического анализа сложившейся человеко-машинной технологии геологического прогнозирования набор схем диалога системы РЕГИОН-СКАНДИНГ практически реализует весь комплекс методических схем обработки информации (технологических модулей), что освобождает специалиста-геолога от необходимости запомнить сведения о применимости тех или иных процедур преобразования и обработки данных к различным логическим объектам банка данных, порядок вызова исполнительных модулей, способы задания параметров и другой служебной информации, не относящейся непосред-

ственно к процессу геологического анализа и интерпретации данных. Это упрощает освоение системы начинающим пользователем и создает достаточно комфортную среду для реальной работы. Независимость схем диалога от прикладных программ облегчает модификацию и развитие диалогового режима, позволяет использовать альтернативные схемы диалога для реализации одних и тех же технологических функций. В частности, система РЕГИОН-СКАНДИНГ может "общаться" с пользователем на русском или английском языке в зависимости от его желания.

В системе предусмотрены пять основных режимов работы (технически оформленных как функциональные блоки, опирающиеся на банк данных и общее программно-математическое обеспечение): "Знакомство с системой", "Обучение работе с системой", "Демонстрация возможностей системы", "Использование системы", "Развитие системы". В режиме "Знакомство" пользователю предлагается на дисплее небольшая вводная лекция, в которой изложены все необходимые принципы, факты и определения. В режиме "Обучение" пользователь имеет возможность на тестовом материале освоить любую из реализованных в системе функций или методических схем. Этот блок в дальнейшем предполагается развить в специализированную диалоговую обучающую систему для использования при подготовке студентов геологических специальностей. Третий режим позволяет продемонстрировать основные возможности системы на примере обработки реальных геологических материалов. Для обеспечения полноты представления об используемых методах, данных и получаемых результатах в демонстрационный комплекс наряду со стандартными средствами: дисплеем, дигитайзером, графическим принтером — включаются дополнительные устройства, облегчающие визуализацию изображений: видеопроектор и видеомагнитофоны. На базе демонстрационного блока может быть реализован видеокурс по основам создания и использования человеко-машинной технологии прогнозирования минерально-сырьевых ресурсов.

Четвертый режим является основным в системе. В схеме диалога этого блока квалифицированный пользователь в рамках выделенных ему квот и привилегий имеет возможность создавать и модифицировать базы территориальных и объектных данных, строить различные цифровые модели изучаемых территорий, создавать и модифицировать под-схемы диалога, получать информацию о состоянии системы, обрабатывать данные по различным методическим схемам, визуализировать результаты расчетов на дисплее, создавать твердые копии на графическом принтере в виде различных карт и т.д., т.е. реализовать в полном объеме человеко-машинную технологию анализа и комплексной интерпретации данных различных геологических методов.

Режим "Развитие" предназначен для администратора, системных и прикладных программистов; обеспечивает необходимые средства

для создания, отладки, тестирования и подключения новых программных модулей, системной поддержки баз данных, распределения ресурсов и квот, сбора и анализа статистики использования системы.

В целом предложенная структура и программно-математическое обеспечение дают возможность на более высоком уровне реализовать весь процесс геологического прогнозирования от накопления данных до формирования прогнозных заключений с участием непосредственно специалистов-геологов в технологическом процессе обработки, анализа и интерпретации данных, что, несомненно, приводит к значительно более полному использованию творческого потенциала специалистов [22].

Первая версия системы реализована Э.А. Немировским и опробована при проведении прогнозно-металлогенического анализа по Карпато-Балканской складчатой области и др. [30, 46]. В настоящее время эта система реализуется на персональном компьютере.

## Глава 5. ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

### ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ

Несомненны успехи, достигнутые к настоящему времени различными исследователями по созданию математических методов и алгоритмов по обработке геологической информации. Значительно обновились за последние 10–15 лет теоретические основы прикладной геологии; уточнены процессы формирования геологических рудных объектов, активно идет процесс построения моделей рудогенеза; возникли новые направления в теоретической геологии, например, такие, как геодинамические исследования, и т.д. Наконец, общеизвестны бурные темпы развития современных средств обработки информации в виде супер-, мини-, микро- и персональных компьютеров, обладающих развитым программным обеспечением, наличием средств визуализации и диалога на естественном языке. Эти исходные научные, теоретические и технические предпосылки и послужили основой для разработки современной человеко-машинной технологии решения задач геологического прогнозирования. Такая технология включает в себя *техническое обеспечение* в виде диалоговых систем накопления и обработки информации и *методологическое обеспечение* в виде человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации геологических, геофизичес-

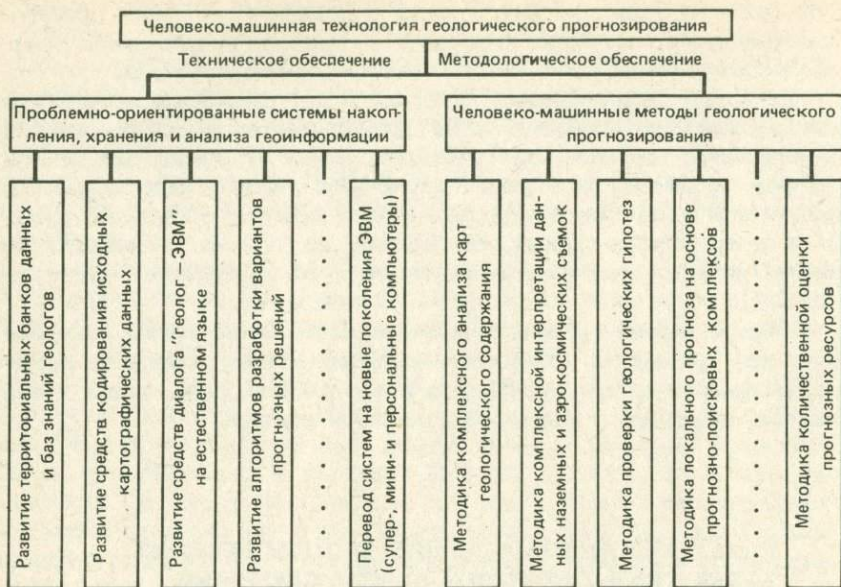


Рис. 11. Принципиальная схема развития технических и методических средств геопрогноза (человеко-машинная технология геологического прогнозирования) [23]

ких, геохимических и аэрокосмических данных. В общем виде это положение показано на рис. 11. Как следует из рисунка, новая технология будет органически сочетать в себе современные достижения научно-технического прогресса. Очевидно, что дальнейшее развитие человеко-машинной технологии геопрогноза будет происходить в двух направлениях: 1) совершенствование используемого инструментария (развитие новых средств управления базами данных, создание их сетей, разработка более эффективных средств диалога человека с ЭВМ вплоть до разговора на естественном языке, использования самых новейших средств вычислительной техники и специального технического оборудования для ввода и визуализации анализируемой информации и т.п.; 2) последовательное развитие человеко-машинных методов анализа геoinформации с помощью современных технических средств применительно к решению конкретных задач теоретической и прикладной геологии.

Такие методы должны разрабатываться непосредственно самими геологами, например, для решения задач прогнозно-металлогенического анализа, прогноза глубокозалегающих рудных объектов, количественной оценки прогнозных ресурсов, комплексной интерпретации синтезированных карт геологического содержания и т.д.

Выбор математической модели принятия решений представляет, по-видимому, наибольшие трудности при формализации постановки задачи геологического прогнозирования. Это объясняется тем, что до сих пор не найдено никаких регулярных методов проверки адекватности используемой модели и рассматриваемой информационной ситуации, а также способов сравнения и однозначного выбора алгоритмов решения. В литературе по геологическому прогнозированию с использованием ЭВМ описан ряд моделей, основанных на различных формальных концепциях и разных интерпретациях понятия "перспективный объект", и предлагаются разные алгоритмические реализации конкретных моделей. Каждая модель может быть реализована в нескольких принципиально не отличающихся модификациях [27].

Регрессионная модель описана и использовалась Д.А. Родионовым, Р.И. Коганом и Ю.П. Беловым; статистико-игровая — предложена А.Н. Бугайцом и Л.Н. Дуденко; информационная — Е.Б. Высокоостровской, Д.С. Зеленецким и М.М. Чагиным. Широкое распространение получили в геологическом прогнозировании модели распознавания образов Б.А. Чумаченко, Е.П. Власова, И.Д. Савинского; тестовая модель предложена Ф.П. Кренделевым; В.В. Давиденко и Л.С. Лукьянов описали применение таксономической модели; А.П. Куклиным описаны результаты использования кластерной модели; В.В. Марченко предложил метод эвристического моделирования и т.д. [20].

Рассмотрим вопрос об области применения той или иной модели при решении геолого-прогнозных задач и оценки перспектив рудоносности территорий как слабоструктуризованной проблемы [17]. Анализ примеров использования описанных моделей при решении реальных задач показывает, какие характеристики прогнозных задач должны учитываться при выборе моделей. Необходимо различать ситуации наличия и отсутствия эталонных моделей в пределах изучаемой территории, а в последнем случае — возможность или невозможность привлечения эталонных объектов из других территорий.

При отсутствии и невозможности привлечения эталонов могут использоваться только кластерная модель и модель эвристического моделирования. Все другие модели опираются на информацию, извлекаемую из описаний эталонных объектов. Особое значение при анализе применимости отдельных математических моделей имеет соотношение числа эталонных объектов и размерности признакового описания территории. Так, для статистических (регрессионной и статистико-игровой) моделей объемы выборки должны быть, по крайней мере, в 10 раз больше, чем размерность признакового пространства. Информационная модель также применима лишь при наличии достаточно большого числа рудных объектов и при использовании ограниченного числа признаков. Тестовая модель, наоборот, практически применима только при очень малых объемах выборки, хотя количество признаков может быть доста-

точно большим. Среднее положение занимают модели иерархической таксономии и распознавания образов, применение которых, по-видимому, наиболее эффективно в условиях, когда отношение числа эталонов к размерности описания близко к единице [27 и др.].

Наличие в прогнозирующей системе информационного обеспечения в виде территориальной базы данных геологического содержания в принципе позволяет осуществлять все указанные подходы. Однако в первую очередь были исследованы и применены методы распознавания образов, таксономической классификации и эвристического моделирования, как наиболее характерные для решения задач геологического прогнозирования в условиях дефицита информации об объекте исследования и ее слабоформализованного вида.

#### МЕТОДЫ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Все процедуры человеко-машинного взаимодействия при решении задач прогноза и анализа рудоносности разделяются на три подэтапа.

- I. Подготовительные процедуры домашинной обработки информации.
  1. Подстановка задачи геологического прогнозирования.
  2. Анализ геологических моделей.
  3. Формирование рабочей гипотезы.
- II. Человеко-машинные процедуры анализа и комплексной интерпретации информации в процессе решения.
  1. Формирование территориальной машинной базы геологических данных.
  2. Формирование личных целевых массивов.
  3. Решение задачи геологического прогнозирования на основе различных методических подходов.
- III. Процедуры содержательного анализа результатов геологического прогнозирования.
  1. Анализ информативности факторов.
  2. Содержательный анализ результатов геологического прогнозирования.
  3. Геологическая редакция прогнозной карты, составление пояснительной записки.

Остановимся подробнее лишь на отдельных составляющих этого процесса, имеющих, по нашему мнению, важное значение.

Принципиальная схема решения задач геологического прогнозирования с использованием алгоритма распознавания образов приведена на рис. 4. Человеко-машинный метод геологического прогнозирования с использованием алгоритмов распознавания образов следует применять в первую очередь, когда необходимо осуществить в исследуемом районе

поиск аналогов известных рудных объектов или нужно оценить информационную значимость отдельных геологических и других факторов с точки зрения изучения закономерностей пространственной локализации оруденения данного типа.

В прикладной геологии многие интерпретационные и прогнозные задачи решаются на основе принципа аналогии. При этом осуществляется сопоставление изученных геологических объектов по выбранному комплексу признаков с известными эталонными объектами (распознавание с "учителем"). Подобный подход, в частности, реализуется и в семействе систем типа РЕГИОН. В общем виде он сводится к построению (обучение распознаванию) модели связи между масштабностью оруденения и косвенными геологическими признаками и отнесению (собственно распознавание, классификация) новых объектов к одному из заданных классов геологических объектов (например, рудным или безрудным площадям).

Технологический цикл состоит из следующих основных операций: постановка задачи геопрогноза; геологическое моделирование (формирование выборки обучения и признаков описания геологической модели); формирование целевого массива, на котором будет производиться последующее исследование; построение решающего правила распознавания (комплексного поисково-оценочного критерия); анализ апостериорной информативности признаков; машинная классификация новых объектов и анализ полученных результатов; составление рекомендаций по итогам прогнозирования.

Модель распознавания образов может быть реализована в самых различных модификациях. В этой связи особую актуальность приобретает вопрос выбора такой конкретной формы ее реализации, которая в максимальной степени учитывает специфику решения на основе человеко-машинной технологии. Постановка задачи распознавания может быть конкретизирована путем выбора: принципов построения информативного описания; фиксации способов выделения выборок обучения и контроля; принятия гипотезы о статистической или детерминированной структуре классов и задания различных критериев качества распознавания. Каждый из таких вариантов модели может породить специальный алгоритм поиска решения, в результате чего к настоящему времени разработано большое число алгоритмов обучения распознаванию, основанных на различных предположениях.

*1. Подготовительные процедуры домашней обработки информации.* Эти процедуры предусматривают постановку (формулирование) прогнозной или исследовательской задачи, оценку достаточности информации для ее решения, анализ имеющихся геологических моделей рудообразования (генетических концепций) и формирование рабочей гипотезы.

1. Под постановкой или формулированием задачи понимается

постановка задания на выполнение работы по геологическому прогнозированию либо методическому исследованию. При этом определяются вероятные типы прогнозируемых объектов, сравниваются имеющиеся гипотезы (модели) формирования рудных объектов, устанавливаются реальные ограничения геологического прогноза (по размерам объектов, по территории и т.п.). Естественно, что для успешного решения поставленной задачи прежде всего следует ознакомиться с каталогом территориальной машинной базы геологических данных и оценить принципиальную возможность получения конечного решения на основе имеющейся в ней информации. Эта процедура также выполняется геологом-интерпретатором.

Следует сразу же оговориться, что понятие оценки достаточности имеющейся информации для решения поставленной задачи геологического прогнозирования в значительной мере условно. В самом деле, прогноз представляет собой разработку рекомендаций в условиях информационной недостаточности. Поэтому при реализации данной процедуры важно установить необходимость использования дополнительных материалов, применение которых наряду с имеющимися данными позволит успешно решить поставленную задачу. Если, по мнению пользователя, имеющихся материалов недостаточно, то это отодвинет сроки выдачи прогнозного заключения. В случае если геолог-интерпретатор (или группа экспертов) признает, что имеющихся материалов достаточно для составления требуемого прогнозного заключения, можно переходить к следующей процедуре.

2. Анализ имеющихся геологических моделей формирования прогнозируемых геологических объектов. Процесс прогнозирования с помощью человеко-машинных методов строится на содержательной основе, поэтому во избежание сугубо формального подхода геолог-интерпретатор должен тщательно проанализировать имеющиеся подходы, с тем чтобы в максимальной степени учесть опыт предыдущих исследователей (естественно, если рассматриваемая проблема изучалась ранее).

Использование информационно-прогнозирующей системы и базы геологических данных позволяет осуществить многовариантное прогнозирование на основе различных гипотез, групп факторов, признаков, эталонов; поэтому изучение имеющихся гипотез ведущим специалистом крайне необходимо. Творческий критический анализ имеющихся гипотез обеспечивает в последующем надежный отбор наиболее важной информации, необходимой и достаточной для решения поставленной задачи геологического прогнозирования.

3. Формирование рабочей гипотезы (модели). Процедура построения информационной модели заключается в изучении ведущим специалистом геологической истории формирования месторождения или другого геологического объекта в зависимости от поставленной задачи в масшта-

бе исследования. Главная задача такого моделирования — выбор комплекса факторов, имеющих важное значение для формирования рудного объекта и эталонных объектов, естественных или теоретических аналогов для последующего изучения количественных характеристик фактической значимости отдельных факторов и последующей классификации на этой основе всей изучаемой территории.

Построение таких информационных моделей является необходимым с точки зрения получения целостного представления о взаимосвязанной системе геологических факторов и процессов, приведших к формированию месторождения (или другого геологического объекта), выявлению места в этой системе процессов накопления, миграции и переотложения рудного материала, непосредственно обусловивших возникновение его высоких локальных концентраций.

Другим важным моментом при реализации рассматриваемой процедуры является выбор эталонных объектов — аналогов прогнозируемых геологических рудных объектов (рудных полей, участков и т.п.). Методика прогнозирования с помощью человеко-машинных методов принципиально позволяет использовать в качестве эталонов не только объекты, имеющиеся в пределах изучаемой территории, но и расположенные в других регионах. Однако для этого требуется, чтобы информационное описание эталонов из "чужих" территорий было идентично факторному описанию исследуемой территории. Успех прогноза во многом зависит от того, насколько типичны эталоны различных классов, насколько существенны различия геологических условий у разно-масштабных объектов.

## II. Процедуры взаимодействия с ЭВМ в процессе решения задач.

1. Рассмотрим эту процедуру на примере использования алгоритма распознавания образов "Гиперпласт". Этот алгоритм позволяет получить правило распознавания, которое является решением одновременно двух задач: получение минимального по размерности пространства признаков при заданной надежности классификации и построение в выбранном пространстве признаков оптимального, в смысле минимума ошибок, решающего правила. Построение решающего правила (разделяющей поверхности) осуществляется с помощью процедуры стохастической аппроксимации, которая позволяет получить при определенном способе кодирования исходной информации оценки относительной информативности признаков и их сочетаний. В процессе поиска оптимальной разделяющей поверхности отдельные ошибки настройки компенсируют друг друга. Алгоритм разработан Б.А. Чумаченко и др. [45].

Области значений каждого признака  $X_k$  квантуются на заданное число в  $l$  интервалов и каждому объекту  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  в  $n \times l$ -мерном пространстве ставится соответствующий вектор  $Y(y_1, \dots, y_{nl})$ , образованный по следующему правилу:  $Y_{ij} = 1$ , если значение признака  $X_i$  попало в  $j$ -й интервал квантования, в других случаях  $Y_{ij} = 0$ .

С помощью описанного преобразования размерность исходного пространства признаков искусственно увеличивается, с тем чтобы в новом пространстве стало возможным разделение объектов обучающей выборки на два класса. Методом стохастической аппроксимации находится такая разделяющая гиперплоскость, относительно которой объекты разных классов оказываются максимально удаленными друг от друга. Эта гиперплоскость и будет искомым разделяющей поверхностью.

Решающее правило (вектор  $\bar{C}$ ) образуется набором чисел  $a_{11}, \dots, a_{1l}, \dots, a_{nl}, a_0$ , таких, что  $\sum_{ij} a_{ij}^2 = 1$ , и для всех объектов обучения I класса  $a_0 + \sum_{ij} a_{ij} y_{ij} > 0$ ; II класса  $-a_0 + \sum_{ij} a_{ij} y_{ij} < 0$ , а величина

$$h = \min_{\alpha, \beta} \left\{ \sum_{ij} a_{ij} y_{ij}^{(\alpha)} - \sum_{ij} a_{ij} y_{ij}^{(\beta)} \right\}$$

— максимальна.

Здесь  $\bar{y}^{(\alpha)}$  принадлежит обучающей выборке I класса,  $\bar{y}^{(\beta)}$  — обучающей выборке II класса, минимум берется по всей обучающей выборке.

Решающее правило относит неизвестный объект к I классу, если  $a_0 + \sum_{ij} a_{ij} \cdot y_{ij} > kh$ , ко II классу, если  $a_0 + \sum_{ij} a_{ij} \cdot y_{ij} < -kh$ , и дает отказ в остальных случаях ( $k$  — заранее выбранный порог;  $0 \leq k \leq 1$ ). В исходном  $n$ -мерном пространстве признаков построенная решающая поверхность является не гиперплоскостью, а нелинейной поверхностью весьма сложной конфигурации (гиперпласт).

Алгоритм Гиперпласт позволяет определять относительную информативность признаков с точки зрения их вкладов в формирование решения о принадлежности объектов к тому или иному классу. Такой мерой информативности признака  $X_k$  является  $C_i = \max_{ij} \{y_{ki} - y_{kj}\}$ .

Алгоритм обрабатывает и качественные, и количественные признаки.

2. Формирование личного целевого массива — первая технологическая процедура, выполняемая по заявке пользователя системы. На основании перечня факторов, выбранных пользователем из каталога территориальной машинной базы геологических данных, в системе с помощью специальных программ формируется личный целевой массив, которому присваивается собственный номер или условное имя геолога-интерпретатора. Все последующие процедуры обработки информации осуществляются на основе этого целевого массива, независимо от первичного массива территориальной базы геологических данных. Тем самым достигается переход к новому формату хранения картографической геологической информации, удобному для последующего человеко-машинного анализа.

3. Первой операцией при использовании методики распознавания

образов является составление матрицы эталонных объектов обучения и контроля. При наличии целевого массива формирование любой выборки производится весьма быстро. Каждому массиву выборок присваивается номер, под которым он сохраняется для дальнейшего использования. После того как сформирован массив выборки для обучения и контроля, выполняется проверка ее на "однородность". Затем используется какой-либо алгоритм таксономии (например, Транзитив). Назначение процедуры — анализ взаимного положения объектов в принятом исходном пространстве геологических признаков. Результат процедуры — несколько вариантов разложения выборки на группы "близких" между собой объектов.

Содержательный анализ структуры выборок выполняется непосредственно геологом-интерпретатором. Разбиение выборки на таксоны при различных параметрах близости в заданном пространстве признаков позволяет установить, насколько адекватно первично выбранное пространство признаков отражает известные геологические закономерности. Меняя шкалу исходных признаков, можно обнаружить, за счет каких именно геологических факторов происходит разделение или объединение отдельных рудных объектов выборки. Если выборка обучения классификации, априорно считавшаяся однородной, в результате таксономического исследования окажется неоднородной, то следует исключить некоторые группы признаков или отдельные признаки, повторить процедуру таксономии, попытаться установить причины неоднородности выборки обучения и принять решение, что имеющаяся неоднородность несущественна с содержательных геологических позиций, либо по результатам таксономии сформировать другую выборку, которая будет однородной.

Процедура анализа структуры эталонной выборки предусматривает также построение гистограмм плотностей распределения объектов по отдельным признакам и их интервалам. Назначение процедуры — предварительная оценка информационной значимости отдельных факторов (в качественной форме) и определение отдельных интервалов их значений, характеризующихся преобладанием рудных объектов одного класса. В случае использования большого числа геологических и других характеристик, часть из которых может не иметь прямого отношения к конкретной задаче геологического прогнозирования, для сокращения исходного пространства признаков следует выполнить процедуру промежуточного анализа исходной информации. С этой целью построенные ЭВМ гистограммы распределений отдельных факторов оцениваются геологом-интерпретатором, и для дальнейшей работы отбираются лишь такие, которые в той или иной мере являются "делящими" для объектов различных классов. Таким образом, одномерные распределения используются для выявления статистических закономерностей пространственного положения месторождений (или других геологических рудных объ-

ектов) относительно геологических, геофизических, геохимических, аэрокосмических и других факторов и отдельных значений их интервалов, являющихся поисковыми критериями.

Следующая процедура — построение решающего правила классификации на основе алгоритма распознавания образов с обучением; ее назначение — обучение ЭВМ распознаванию геологических рудных объектов, аналогичных представленным в исходной выборке. При использовании алгоритма Гиперпласт такое обучение осуществляется с так называемым "поощрением", т.е. ЭВМ подбирает такие информационные веса для каждого из признаков и их интервалов, при которых происходит наилучшее разделение объектов двух классов (например, рудных, безрудных и т.п.). Такого рода решающее правило может быть определено как комплексный критерий классификации. На основе полученного правила классифицируется контрольная выборка геологических рудных объектов, не участвующих в обучении распознаванию. Следующая процедура — анализ комплексного критерия классификации. Основное ее назначение — оценка качества решающего правила по результатам классификации объектов контрольной выборки и содержательный геологический анализ комплексного критерия путем оценки апостериорной информационной значимости отдельных признаков. Сверяя результаты машинного контроля с имеющимся фактическим материалом принадлежности контрольных объектов к классам, геолог-интерпретатор составляет заключение о качестве построенного ЭВМ критерия распознавания. Такую оценку можно дать, например, в процентах правильной классификации. При этом подсчитывается количество ошибок I и II родов, а также число "отказов" от классификации. В случае если результаты классификации удовлетворительны и отвечают существующим геологическим представлениям, геолог-интерпретатор выполняет следующую процедуру — классификацию всей исследуемой территории. Если результаты контроля не удовлетворяют экспертов, можно их откорректировать путем возвращения к процедуре обучения, изменения выборки объектов обучения или уточнения геологических факторов, принятых для решения данной задачи.

Кроме того, регулируя "порог" классификации решающего правила ("меру аналогии"), можно достичь оптимальных результатов распознавания путем уменьшения количества "отказов".

Следующая процедура — анализ информативности признаков\*. Одной из основных задач при геологическом прогнозировании является выбор существенных или информативных признаков. В настоящее время разработано довольно много методов для решения этой задачи.

---

\* Информативность отдельного признака — величина относительная и характерна только для определенного сочетания признаков при решении конкретной задачи геологического прогнозирования.

Это, с одной стороны, методы количественной оценки информативности признаков и, с другой — методы, которые можно назвать качественными. В первом случае для каждого признака получается число, которое должно характеризовать количество информации о различии между классами исследуемых геологических рудных объектов, содержащейся в отдельном признаке. Методы второго типа располагают признаки в порядке убывания их информативности, что не позволяет судить о том, насколько информативность одного из них больше информативности другого. К таким методам относится, например, ранжирование по экспертным оценкам. Однако эти методы отличаются некоторой односторонностью. Математические методы анализируют лишь формальную сторону задачи, не связывая ее с содержательной геологической. Методы, связанные с опросом экспертов, наоборот, учитывают только содержательную сторону задачи, в которой ограничены возможности человека. При человеко-машинном анализе информации следует применять метод, использующий как формальную, так и содержательную сторону задачи. Такой метод должен анализировать вклад признака в классификацию эталонного объекта, т.е. каждой паре "признак — эталонный объект" должно ставиться в соответствие число, показывающее влияние данного признака на принятие решения при классификации эталонного объекта. Именно этот подход реализован в решающем правиле, которое строит алгоритм Гиперпласт. Как было указано, в этом алгоритме область возможных значений каждого геолого-поискового признака разбивается геолого-интерпретатором на несколько интервалов. Границы интервалов определяются исходя из геологических соображений. Например, признак "положение объекта по отношению к гранитной интрузии" (какого-либо конкретного типа) делят на следующие интервалы: 1) положение в массиве интрузии; 2) положение в области эндоконтакта; 3) положение в области экзоконтакта; 4) положение в неизменных вмещающих породах. Можно также и формально разбить факторы на отдельные интервалы.

Рассмотрим, например, признак "положение объекта по отношению к гранитной интрузии". Допустим, что для интервалов, на которые его значения были разбиты экспертами, обучение, выполненное с помощью описываемого алгоритма, на основе представительной выборки дало следующие оценки апостериорной информативности (в относительных единицах).

Положение исследуемого геологического объекта в пределах центральной части интрузии . . . . .	-20
Положение в зоне эндоконтакта . . . . .	+5
Положение в зоне экзоконтакта . . . . .	+100
Положение вне интрузии, в неизменных породах . . . . .	+2

Если объектами обучения I класса (положительная информативность) были промышленные месторождения, а объектами II класса —

непромышленные (отрицательная информативность), то по данному примеру, объекты, лежащие в массиве интрузии, относятся к непромышленным месторождениям, а объекты, лежащие в зоне экзоконтакта, — к промышленным. Однако это не означает, что можно классифицировать новые объекты лишь по одному "сильному" признаку, т.е. из примера не следует, что в области экзоконтакта вообще не бывает бесперспективных объектов. В реальных задачах классификация на основе алгоритма Гиперпласт ведется по всем признакам по процедуре, напоминающей голосование. Например, тот факт, что объект находится в области эндоконтакта, прибавляет пять "голосов" за то, что он относится к перспективным. Если бы он находился в массиве интрузии, это дало бы 20 "голосов" за его бесперспективность. Эти "голоса" суммируются по всем признакам и затем, если количество "голосов" за перспективность оказывается на  $K$  или более больше, чем "голосов" за бесперспективность, объект относится к I классу. Принцип работы алгоритма "Гиперпласт" при классификации аналогичен принципу действия ячейки нервной системы человека. Известно, что "ответ нейрона на активность всех его сигналов представляет собой как бы результат своего рода "химического голосования": соотношение голосов возбуждательных и тормозных сигналов на входе данного нейрона определяет уровень его активности" [19]. В обоих случаях, как в алгоритме Гиперпласт, так и в ячейке нервной системы человека, факторы, которые могут влиять на реакцию системы на определенную ситуацию, заранее получают некоторые количественные веса, и реакция системы определяется алгебраической суммой весов факторов, реализованных в данной ситуации.

По этому показателю можно судить о том, какие признаки существенны при классификации объектов данного конкретного типа. Если сложить такие показатели для признаков одного типа, например, геологических, геофизических и т.д., то можно попытаться определить, сравнивая эти показатели для разных этапов прогнозирования, какая группа признаков отражает существенные черты объектов на данном этапе исследования. Так, например, для конкретной задачи прогнозирования гидротермальных рудных полей редкометалльных месторождений были получены следующие результаты (табл. 4).

Из табл. 4 следует, что в решенной задаче объект № 1 отнесен к I классу в основном по структурно-тектоническим и магматическим признакам. Естественно, подобный анализ может быть выполнен и для уровня отдельных признаков и их интервалов. Рассмотренный выше подход к оценке информационных весов признаков был реализован в виде человеко-машинной технологии решения задач геологического прогнозирования. Таким образом, полученные с помощью алгоритма "Гиперпласт" при процедуре машинного обучения информационные веса признаков могут быть вспомогательным материалом для проведения содержательного анализа результатов геологического прогнозирования. Такой

Таблица 4. Вклад информации различных групп признаков, полученный при обучении по эталонным объектам (в %)

Группы признаков и их номера	Объекты обучения				
	1	2	3	8	12
Структурно-тектонические, 1–15	50,1	53,5	54,6	52,6	56,5
Литолого-стратиграфические, 16–27	32,8	34,5	27,0	22,0	11,5
Магматические, 28–36	17,1	12,0	18,4	25,4	32,0
Всего	100	100	100	100	100

анализ вкладов информационных весов позволяет геологам находить общие черты и устанавливать различия у классифицируемых объектов, дает возможность определить, по каким конкретным признакам или их интервалам классифицирован каждый конкретный геологический рудный объект. Таким образом, геолог-интерпретатор находит содержательное объяснение выделенным перспективным участкам и устанавливает соответствие полученных результатов конкретным концепциям и моделям рудогенеза и их адекватности реальной геологической ситуации.

Анализ решающего правила и информативности признаков позволяет геологу-интерпретатору также получить количественные оценки значимости факторов, отражающие различия между эталонными объектами I и II классов.

После анализа решающего правила, в случае положительного заключения, геолог-интерпретатор может осуществить процедуру машинной классификации для всей исследуемой территории.

III. *Процедуры содержательного анализа результатов.* После того как получены результаты классификации в виде распечатанных прогнозных карт по всей исследуемой территории либо на экране дисплея, геолог-интерпретатор осуществляет предварительный анализ вариантов такой карты. При этом он проверяет соответствие полученных результатов имеющимся геологическим концепциям.

Результаты машинной классификации следует проконтролировать исходя из геологических соображений. Для этого из целевого массива территориальной машинной базы геологических данных вызываются исходные признаки по необходимым элементарным площадкам исследуемой территории, сравнение которых с решающим правилом распознавания позволяет выполнять содержательный анализ причин классификации.

Используя, например, изложенный выше метод оценки информативных вкладов признаков, геолог-интерпретатор устанавливает причи-

ны, послужившие основанием для формально-логической машинной классификации. Сравнивая имеющиеся исходные данные с материалами машинного обучения по эталонным объектам, можно составить заключение об относительной "близости" выделенных участков к тем или иным эталонам, а также определить, за счет каких факторов (признаков) данная конкретная точка отнесена к тому или иному классу. В целом процедура предусматривает содержательный контроль и анализ результатов машинной классификации. Затем геолог-интерпретатор выполняет геологическую интерпретацию полученных результатов. Эта процедура осуществляется на основе геолого-структурного анализа положения выделенных перспективных участков. На данном этапе проводится "генерализация" выделенных перспективных площадей в соответствии с конкретной геологической обстановкой. Например, если в пределах какой-либо единой структуры (геологического блока и т.п.) располагается несколько перспективных площадей, целесообразно объединить их в одном геологическом контуре. Специалисты должны тщательно проанализировать все "необычные", с их точки зрения, ситуации. Конечная оценка результатов при многовариантном прогнозировании приобретает особенно важное значение. Поэтому, кроме общепринятого критерия качества распознавания по числу ошибок I и II родов, следует использовать и ряд других критериев, например: а) величину суммарной площади перспективных участков в процентах от всей исследуемой территории; б) геологические особенности и пространственное размещение перспективных участков и др.

Особенности геологического положения перспективных участков в пределах исследуемой территории могут быть использованы в качестве вспомогательного (более тонкого) критерия оценки качества прогнозных карт, учитывающего зональность размещения перспективных участков и соответствие их расположения существующим геологическим представлениям.

Работа завершается составлением отчета о результатах прогнозирования. Отметим, что получение окончательных результатов, в отличие от традиционных методов исследования, достигается значительно быстрее.

#### МЕТОД АНАЛИЗА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Задача распознавания образов "без учителя"\* заключается в том, что по мере изучения свойств или параметров множества исследуемых объектов последние разбиваются на группы, классы или подмножества; причем объекты, включаемые в одно подмножество, характеризуются

---

\*Эта задача имеет еще другие названия: задача таксономии или распознавания образов без поощрения.

одинаковыми или близкими значениями некоторых параметров, но объекты, включаемые в разные подмножества по этим же самым параметрам (если и не по всем, то по большинству из них), существенно отличаются друг от друга. При этом предварительные данные о принадлежности хотя бы части рассматриваемых объектов к какому-либо качественно однородным совокупностям отсутствуют. Задачу обычно формулируют следующим образом. Имеется множество реализаций  $\bar{X}$  (векторов, точек) в пространстве параметров  $x_1, \dots, x_n$  и критерий, характеризующий степень сходства или близости между любыми рассматриваемыми подмножествами точек. Требуется разделить множество реализаций на априори заданное количество классов (подмножеств) векторов таким образом, чтобы в смысле заданного критерия сходства векторы, попавшие в один класс, были расположены как можно ближе друг к другу, а векторы различных классов — как можно дальше друг от друга. В более общем случае решения задачи количество классов заранее не задается, но устанавливается критерий, который позволяет оценить нецелесообразность дальнейшего продолжения процесса деления исследуемой выборки. Следует отметить, что теория и методы распознавания образов без учителя разработаны в гораздо меньшей степени, чем теория и методы решения задач классификации априори идентифицированных реализаций.

Основная трудность при реализации указанной технологии состоит в сложности задания объективного критерия меры подобия (аналогии) объектов исследования, поэтому в системе используется эвристический подход, при котором на каждой итерации разбиения геолог-интерпретатор может визуально оценивать результаты классификации и проверять их на адекватность реальной ситуации.

Рассмотрим такой метод на примере использования алгоритма таксономии "Транзитив", предложенного Л.С. Лукьяновым [45]. В этом алгоритме бинарному отношению близости  $\rho$  исследуемых объектов, описанных набором признаков, ставится в соответствие его транзитивное замыкание  $\bar{\rho}$ , являющееся эквивалентностью.

Пусть имеется  $K$   $n$ -мерных векторов  $\bar{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Требуется выполнить процедуру таксономии с помощью изложенного выше подхода. В качестве меры близости двух векторов в алгоритме "Транзитив" выбрано отношение близости, инвариантное относительно евклидовых преобразований. Таким образом, все векторы, близкие к нулевому вектору, задаются условием:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2 < R.$$

Близость к другим векторам в силу инвариантности отношения

близости относительно параллельных переносов задается условием:

$$(x_1 - y_1)^2 + (x_2 + y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2 < R,$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — координаты одного вектора;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  — координаты другого вектора;  $R$  — положительное число, равное

$$R(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (x_i - y_i)^2}, \text{ где каждое } C_i = 0 \text{ или } 1.$$

Таксономическая классификация последовательно осуществляется для целого ряда значений  $R$ , выбираемых из содержательных соображений геологом. При этом предусмотрена возможность игнорировать близость по некоторым координатам, что позволяет выяснять вклад этих координат в общий результат таксономии. В результате процедуры классификации исходное множество векторов разбивается на таксоны (группы), обладающие следующими свойствами: 1) для любых векторов  $x$  и  $y$  из одного таксона существует последовательность векторов  $z_1, z_2, \dots, z_t$  ( $t \geq 0$ ) этого же таксона, такая, что  $R(x, z) \leq R^*$ ,  $R(z_1, z_2) \leq R^*$ , ...,  $R(z_{t-1}, z_t) \leq R^*$ ,  $R(z_t, y) \leq R^*$ ; 2) для любых векторов  $x$  и  $y$  из разных таксонов  $R(x, y) > R^*$ . Выделенные таксоны являются группами схожих в смысле указанной меры близости векторов.

При этом предусмотрена возможность изменения коэффициентов  $C_i$ , позволяющая выяснить влияние отдельных факторов на результаты классификации. Изменение  $R$  позволяет также регулировать меры близости внутри таксонов и величину таксонов.

Метод таксономической классификации может применяться в геологических исследованиях в трех модификациях: площадного районирования; классификации отдельных геологических объектов; поиска аналога априори заданной точки (элементарной площадки карты).

Площадная классификация позволяет осуществить разделение всей исследуемой территории (в общем пространстве геологических, геофизических, геохимических, аэрокосмических и других признаков) на отдельные площади, сходные по исходным данным. Этот подход может использоваться и для выделения площадей с "уникальным" геологическим описанием (строением), не имеющим себе подобных в пределах исследуемой территории ("геологические аномалии", по М.А. Фаворской [44]).

Вторая модификация метода может быть использована, например, для классификации выборок по различным месторождениям, рудопроявлениям, точкам минерализации, аномалиям и определения их "сходства", "компактности" в принятом пространстве признаков. Она может быть применена и для установления степени аналогии, например, отдель-

ных рудопроявлений с известными месторождениями и их типами.

Третья модификация метода позволяет реализовать оперативный поиск в пределах исследуемой территории аналога любой априори заданной точки (элементарной площадки карты) на геологической карте, полное описание которой имеется в базе данных. Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что, используя некоторый объект (особую точку), с помощью метода таксономии находят совокупности других точек (элементарных площадок), описание которых в принятом пространстве признаков сходно с описанием принятой за аналог особой точки. При этом задается параметр "меры близости", так как два абсолютно подобных объекта (элементарные площадки реальной геологической территории) в природе практически не встречаются. Очевидно, регулируя меру близости, можно получать различное число объектов, сходных по исходным описаниям. Практически эта мера близости может задаваться геологами, например, в виде предельных интервалов расположения объектов относительно отдельных геологических факторов (например, на расстоянии от контакта с гранитной интрузией от 200 до 300 м и т.д.). На практике такой подход часто реализуется специалистами для выделения в районе площадей с одинаковыми признаками, однако "вручную" такой анализ возможен не более чем с 5–7 факторами. Использование человеко-машинной технологии, естественно, резко расширяет эти возможности. Методически задача решается следующим образом: геолог-интерпретатор выбирает некоторый эталонный объект (элементарную площадку) на геологической карте (особую точку  $S_0$ ), затем по информации территориальной базы геологических данных осуществляет машинный поиск аналогов этой точки при начальной мере близости  $R_0$ . В случае отсутствия новых точек-аналогов процедура автоматически повторяется с  $R_1 > R_0$  и т.д.

При постепенном увеличении  $R_2 > R_1 > R_0$  особая точка  $S_0$  характеризуется уже некоторой площадью  $S_1 > S_0$ , но в этом случае появляются новые объекты  $S^*$ , причем, как правило,  $S^* < S_0$  и т.д.

## МЕТОД ЭВРИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рассматриваемом подходе, предложенном В.В. Марченко, условно определенном как "эвристическое моделирование", предпринята попытка разработки информационной модели ("образа") геологической ситуации, как цели объекта машинного поиска, на основе совмещения содержательной процедуры построения системной модели рудогенеза и выделения факторов рудоконтроля с учетом знаний, опыта и интуиции специалиста и использования возможностей формальной обработки информации с помощью вычислительной системы [20]. Использование метода эвристического моделирования предполагает: построение специалистом системной модели формирования геологического рудного объекта кон-

кретного типа (модели рудогенеза); перевод модели рудогенеза в вид, удобный для машинного анализа имеющейся информации (эвристическое решающее правило); построение на основе человекo-машинной технологии вариантов прогнозных карт; выбор варианта, наиболее адекватно отражающего реальную ситуацию.

Как известно, масштаб геологического прогнозирования определяет область рассмотрения и степень детальности изучения внутренних связей, зависимостей и число учитываемых факторов. Например, модель формирования рудных полей в масштабе 1:500 000—1:200 000 должна разрабатываться на фоне геологического развития региона или отдельных его районов. При масштабе 1:100 000—1:50 000 область рассмотрения сужается до границ структурно-фациальных и рудоносных зон, рудных узлов или рудных полей, а при 1:10 000 и крупнее — до границ месторождений, участков, рудных тел.

При этом в качестве основных рудоконтролирующих факторов при масштабе исследований 1:200 000 выступают, как правило, наиболее общие причины рудоотложения — основные геологические процессы: осадкообразование, складкообразование, магматизм и другие, фиксируемые в реальной геологической обстановке продуктами — геологическими формациями, тектоническими структурами, магматическими комплексами и т.д. [20].

Модели масштаба 1:25 000—1:10 000 дают возможность выявить более частные причины рудоотложения, связанные с некоторыми количественными и качественными показателями геологических процессов. Таким образом, с помощью моделей рудогенеза можно с высокой степенью обоснованности выделить группы факторов, оказывающих в совокупности влияние на рудообразование, что особенно важно при выборе поисковых предпосылок и признаков при решении многовариантных прогнозных задач с использованием ЭВМ. Пример выбора факторов рудоконтроля при прогнозировании редкометалльных объектов в конкретном районе приведен в табл. 5. Во всех случаях большое значение при прогнозировании геологических рудных объектов приобретает учет глубин образования месторождений и уровня эрозионного среза, как это показано И.П. Кушнareвым [16 и др.].

Основная трудность действий геолога или реализации разработанных им системных моделей рудогенеза в прогнозную карту заключается в том, чтобы адекватно отобразить все важные для решения конкретной прогнозной задачи факторы с помощью имеющейся картографической и числовой информации. Не затрагивая специальные вопросы построения геологических моделей рудогенеза [14, 15, 20, 26, 47 и др.], отметим, что, используя некоторый набор формальных процедур, можно представить такую модель в виде эвристического решающего правила или комплексного поисково-оценочного критерия. Построение его сводится к выбору факторов, необходимых, с точки зрения геолога, для решения

Таблица 5. Схема описания рудоносных площадей различных иерархических уровней с редкометалльными объектами гидротермального генезиса [20]

Геологический объект	Информация						
	Площадь, км <sup>2</sup>	Масштаб исследования	Картографическая основа	Подразделение пород	Структуры	Магматизм	Гидротермальные изменения
Рудная зона	$n \cdot 10^3$	1 : 1 000 000	Тектоническая	Серия (ряд формаций)	Платформы; щиты; геосинклинальные системы и их структурно-фациальные зоны; структурные швы; главнейшие разломы и др.	Ряды магматических формаций	Не выделяют
Рудный узел	$n \cdot 10^2$	1 : 500 000 – 1 : 100 000	Геологическая	Формация (протоформация)	Структурно-фациальные зоны второго и более низких порядков; морфология складок, зоны глубинных разломов фундамента	Магматические формации различных формаций глубинности	Формации гидротермально-измененных пород
Рудное поле	$n \cdot 10^1$	1 : 50 000 – 1 : 25 000	Геолого-структурная	Свита	Складки второго и более низких порядков; морфология складок; зоны мелких складок; зоны глубинных разломов; фациальная изменчивость и др.	Магматические породы различных фаз внедрения; дайковые пояса	Фации гидротермально-измененных пород
Месторождение	$n \cdot 10^0$	1 : 10 000 – 1 : 2000	То же	Слой; пачка слоев	Складчатые и разрывные нарушения третьего и более низких порядков, контролирующее оруденение, и др.	Магматические тела	Парагенетические ассоциации минералов

конкретной задачи геологического прогнозирования. При этом каждый фактор подразделяется специалистом, исходя из содержательных соображений, на необходимое количество интервалов (признаков), которым геолог присваивает некоторые числовые значения, характеризующие их информативность.

Изменяя сочетания признаков и варьируя их информационными весами, геолог может моделировать различные геологические ситуации, проверять их на адекватность реальной обстановке и уточнять значения отдельных факторов рудоконтроля; в режиме обратной связи может оценивать в количественных эквивалентах влияние отдельных признаков и их комплексов на конечные результаты геологического прогнозирования.

*Процедура построения эвристического решающего правила.* Пусть какой-либо геологический объект, территория, регион  $S$  и т.д. описаны набором  $N$  различных факторов  $\{X_j\}$ , где  $j = 1, 2, \dots, N$ . В соответствии с теоретическими представлениями о модели рудогенеза и личным опытом геолог выбирает из  $N$  различных факторов такие  $n$  факторов, которые имеют отношение к описываемой им модели. Обозначим эти факторы  $\bar{X}_k$ , где  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $\{\bar{X}_k\} \in \{X_j\}$ . Каждый из факторов  $X_k$  геолог разделяет, исходя из содержательных геологических соображений, на некоторое число интервалов (признаков):

$$\bar{X}_k = (\bar{x}_k^1, \bar{x}_k^2, \dots, \bar{x}_k^{L_k}).$$

Число интервалов может быть у каждого фактора различным. Каждому из выделенных интервалов (или некоторым из них) геолог присвоит информативный вес, характеризующий значение (важность) данного интервала (признака) на процесс рудогенеза  $i_k^l$ , где  $l = 1, 2, \dots, L_k$ . Информативный вес может иметь как положительное, так и отрицательное значение\*.

Таким образом, геологом будет сформирована информационная модель объекта прогноза (эвристическое решающее правило)  $M$ , описанная в виде выборки отдельных факторов  $\bar{X}_k$ , наиболее значимых, с его точки зрения, для локализации оруденения конкретного типа. При этом каждый фактор  $\bar{X}_k$  будет разбит на отдельные интервалы  $\bar{x}_k^l$ , которым (или некоторым из них) будут присвоены информативные веса  $i_k^l$ . Общий вид такого правила приведен на рис. 12.

Для последующего машинного поиска по информации территориальной базы геологических данных ситуаций, аналогичных сформированной геологом эвристической модели  $M$ , выполним следующие операции.

---

\* Информативные веса могут быть определены также и на основе статистических оценок, гистограмм распределений и т.д.

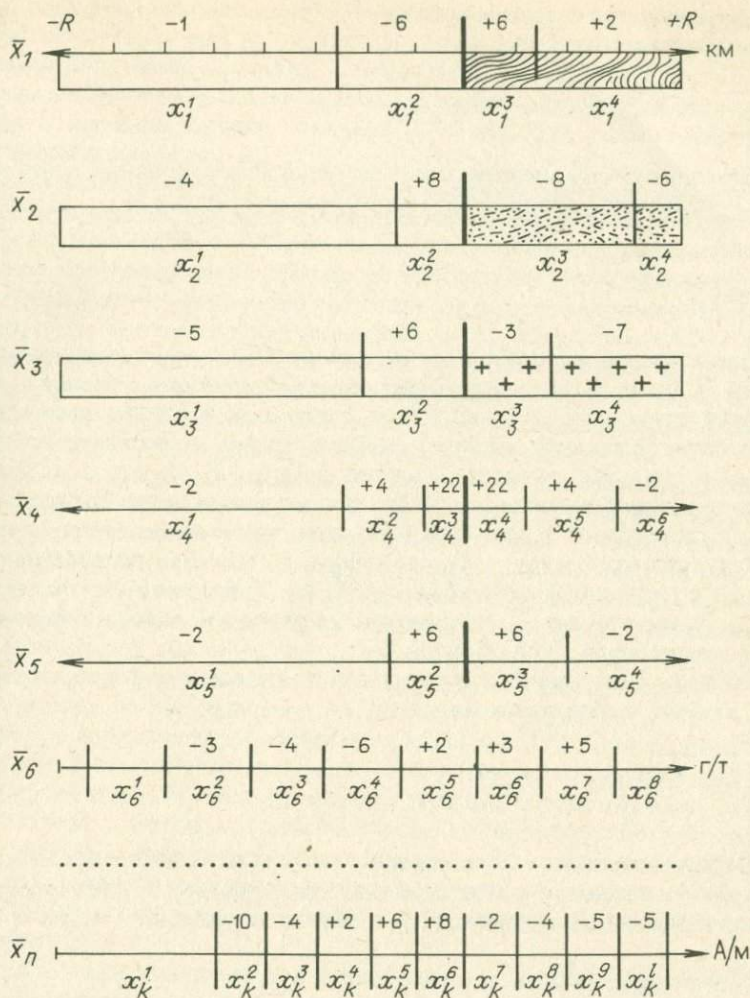


Рис. 12. Пример эвристического решающего правила по алгоритму В.В. Марченко [20].

$\bar{X}_1 - \bar{X}_n$  — геологические картографические и числовые факторы ( $\bar{X}_1$  — положение объекта относительно формации зеленых сланцев докембрия,  $\bar{X}_2$  — относительно кремнисто-терригенной формации,  $\bar{X}_3$  — относительно гранитоидных интрузий комплекса К,  $\bar{X}_4$  — относительно глубинных разломов,  $\bar{X}_5$  — относительно аномалий горизонтального градиента силы тяжести,  $\bar{X}_6$  — содержание свинца в геохимическом ореоле,  $\bar{X}_n$  — значение напряженности магнитного поля);  $x_1, \dots, x_k$  — интервалы факторов, выделенные геологом. Цифры на рисунках — относительные информативные веса ( $i_k^1$ ), присвоенные геологом или экспертами

Определим для каждого фактора  $\bar{X}_k$  интервал с максимальным информативным весом  $\bar{i}_k^l$ :

$$\bar{I}_k = \max_l \bar{i}_k^l, \quad 1 \leq l \leq L_k.$$

Вычислим сумму максимальных значений информативных весов по всем  $\bar{X}_k$  факторам, описывающим эвристическую модель М:

$$h_{\max} = \sum_{i=1}^n \bar{I}_k.$$

*Процедура машинного поиска ситуации, аналогичных эвристической модели М.* Пусть задан геологический объект (территория, регион и т.п.)  $S$ , охарактеризованный  $N$  различными факторами. В соответствии с эвристическим решающим правилом выберем из них  $n$  факторов, участвующих в описании модели М. Каждый фактор  $\bar{X}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) имеет конкретное значение в пределах каждой элементарной площадки  $s$  ( $s \in S$ ) исследуемой территории. Обозначим это значение через  $\bar{X}_k(s)$ .

Для каждого фактора  $\bar{X}_k$  определим, в какой из интервалов  $l$  попадает конкретное значение фактора  $\bar{X}_k(s)$ . Присвоим этому фактору  $\bar{X}_k$  информативный вес  $\bar{i}_k^l(s)$  данного интервала, имеющийся в эвристическом решающем правиле М.

Найдем сумму информационных весов для всех  $n$  факторов  $\bar{X}_k$ , описывающих элементарную площадку  $s$ :

$$h^s = \sum_{k=1}^n \bar{i}_k^l(s).$$

Вычислим величину  $\Delta^s$ , характеризующую отклонение в данной элементарной площадке  $s$  от максимально благоприятной прогнозируемой ситуации, описанной геологом в эвристическом решающем правиле М:

$$\Delta^s = h_{\max} - h^s.$$

Таким образом, в пределах всей исследуемой территории  $S$  получим для каждой элементарной площадки  $s$  значение  $\Delta^s$  как оценку ее перспективности по эвристической модели специалиста.

Задавая различные значения  $\Delta_{\min}^s$  ( $\Delta_{\min}^s$  — порог выделения перспективных площадей), можно построить варианты прогнозных карт и выполнить содержательный анализ причин выделения конкретных перспективных площадей, а именно: по каким факторам  $\bar{X}_k$ , интервалам  $\bar{X}_k^l$  и с какими информативными весами  $\bar{i}_k^l(s)$  выделена данная площадь (см. рис. 12).

Лучшие эвристические решающие правила оценки перспектив рудности территорий на конкретные виды минерального сырья, построенные опытными геологами и проверенные на практике, могут сохраняться в машинном банке решающих правил (банке знаний специалистов о закономерностях локализации оруденения) для последующего использования.

Возможность получения многовариантных решений при прогнозировании рудных месторождений порождает необходимость в различных критериях оценки отдельных вариантов. Принятие решения по результатам прогнозирования обычно осуществляется на основе метода экспертных оценок. В качестве возможных критериев оценки конечных результатов системного моделирования могут быть использованы: непротиворечивость геологической теории рудогенеза данного типа оруденения; соответствие выделенных перспективных участков благоприятной геологической ситуации; площадные размеры выделенных перспективных участков; отсутствие ошибок I и II родов и др.

Таким образом, метод эвристического моделирования позволяет реализовать человеко-машинную технологию анализа и комплексной интерпретации разнородной картографической и числовой геологической, геофизической и геохимической информации при решении задач геопрогноза. Метод открывает возможность: осуществления исследовательского прогнозирования на основе теоретических представлений и практического опыта геологов; сравнения полученных результатов на соответствие реальной ситуации и выполнения сопоставительного анализа материалов прогнозирования специалистов различных геологических школ и направлений; последовательного перевода качественных представлений специалистов-геологов о важности различных факторов рудоконтроля в количественную форму; поставить на службу науке и практике опыт и знания ведущих геологов о закономерностях локализации оруденения и сделать этот опыт доступным для широкого круга специалистов; осуществления классификации исследуемых площадей на основе "интегральной меры подобия" с дифференцированной оценкой каждого фактора и др.

Как свидетельствует опыт, широкая практическая реализация метода эвристического моделирования открывает возможность оценки конечных результатов прогнозирования на основе различных гипотез, концепций, моделей [11, 28, 29, 31].

На основе рассмотренного подхода возможно выполнение ретроспективного анализа имеющихся данных по отдельным регионам и территориям с целью их ревизии и переинтерпретации.

К настоящему времени известны различные подходы, используемые при решении задач количественного прогноза. Так, при региональном прогнозировании применяются методы определения ресурсов по геохимическому фону (кларкам), кластерного и статистического анализа геологических данных. Средне- и крупномасштабное прогнозирование большей частью выполняется по данным геохимических и геофизических измерений [42 и др.]. На всех стадиях применяются для этих целей и методы распознавания образов.

В работе А.Б. Каждана и Н.Н. Соловьева [7] приведены особенности оценки вероятных запасов редких и радиоактивных металлов на стадиях региональных прогнозно-металлогенических исследований, специализированных геологических съемок и поисковых работ. Прогнозные запасы потенциальных рудных узлов и полей должны рассчитываться по нескольким независимым друг от друга методам. В качестве последних могут использоваться расчеты по продуктивности потоков рассеяния, по площадной продуктивности первичных ореолов и т.д. Новым положением предусмотрено выделение прогнозных ресурсов на стадиях региональных геологосъемочных и геофизических работ и поисково-съемочных работ масштабов 1:200 000—1:50 000. Особую актуальность приобретает вопрос автоматизации работ при количественном геологическом прогнозировании.

Опыт многолетнего использования территориальных машинных баз геологических данных показывает, что они могут быть использованы в качестве основы информационного обеспечения для разработки человеко-машинных методов и технологий анализа геологической картографической информации в целях количественного прогнозирования.

В связи с системной таксономической иерархией геологических рудных объектов на различных стадиях геологосъемочных и поисковых работ меняются цели и объекты прогноза (в соответствии с уровнем имеющейся для анализа информации).

Современные математические методы могут быть использованы в целях количественного прогноза рудоносности с помощью человеко-машинных технологий при решении следующих задач: комплексной обработке всей имеющейся геологической, геофизической и геохимической информации; определении значимости геологических признаков и выделении прогнозных критериев как основы количественного прогноза; выполнении исследований по определению аналогии геологических объектов; для количественной оценки прогнозных ресурсов.

В данном случае мы не рассматриваем вопросы применения для оценки прогнозных ресурсов комплекса методов, основанных на анализе геохимической информации. Эти методы эффективны и широко применяются на практике [42 и др.].

В настоящей работе предпринята попытка на примере использования алгоритма распознавания образов с обучением на известных рудных объектах (либо на их статистических моделях) разработать доступные для широкого применения методы, позволяющие по косвенным геологическим, геофизическим и геохимическим факторам, отобранным из картографической информации, получать оценки прогнозных ресурсов.

К настоящему времени известны различные подходы, используемые при решении задач количественного прогноза по геологическим данным. По определению, прогнозны ресурсы категории  $P_3$  — это ресурсы потенциально перспективных площадей, районов, бассейнов и рудных полей, в пределах которых на основании благоприятных стратиграфических, литологических, тектонических предпосылок, выявленных при производстве в оцениваемом районе средне- и мелкомасштабных геологических съемок, прогнозно-металлогенических, региональных, геофизических, геохимических исследований, дешифрирования космических снимков, обработки результатов геоморфологических съемок возможно выявление новых месторождений. Прогнозные ресурсы определяются при этом по аналогии с известными месторождениями исходя из теоретических предпосылок.

Таким образом, для оценки прогнозных ресурсов категории  $P_3$  может быть использован метод комплексного анализа и интерпретации геологических, геофизических, геохимических, аэрокосмических и других съемок при соответствующих формулировках задач геопрогноза. Учитывая вероятностный характер геологического прогноза, оценка перспектив рудоносности должна выполняться с целью повышения надежности конечных результатов параллельно несколькими методическими приемами. Так, возможен последовательный прогноз с применением метода распознавания образов (с последовательным обучением на мелких, средних и крупных объектах). Результаты прогноза целесообразно проверять, используя другой подход (таксономическую классификацию, статистические методы и др.).

Оценка прогнозных запасов может выполняться также путем сопоставления размеров площадей эталонного объекта, запасы которого известны (площадная продуктивность  $P_s$ ), с новыми объектами, выделенными на основе метода "поиска аналога", эвристического моделирования и др. Наличие территориальной базы геологических данных позволяет использовать для целей количественного прогноза самые различные подходы, при этом надежность прогнозных оценок находится в прямой зависимости от количества совпадающих конечных результатов. Важным методологическим моментом практической реализации человеко-машинного метода количественного прогнозирования является участие геолога в процессе решения. Тем самым достигается сочетание формальных и неформальных методов анализа данных при прогнозе.

Прогнозные ресурсы категории  $P_2$  определяются как ресурсы новых месторождений, наличие которых основывается на положительной

оценке выявленных при общих и детальных поисках и при геологической съемке масштаба 1:50 000 проявлений полезного ископаемого, а также геофизических и геохимических аномалий, природа и возможная перспективность которых установлена вскрытием в единичных выработках. Прогнозные ресурсы категории  $P_2$  можно определить путем реализации нескольких методических подходов. Большое значение на этом этапе приобретает геохимическая информация. Количественное прогнозирование также рекомендуется выполнять, используя различные методики (распознавание образов, по продуктивности вторичных ореолов, по анализу комплекса геолого-геохимических и геофизических признаков методом шагово-циклической регрессии и др.).

Следует особо подчеркнуть, что процесс оценки прогнозных ресурсов, как и другие процедуры, построенные на применении человекомашинных методов и технологий, носит творческий характер. Чтобы показать некоторые из возможностей этих методов, приведен ряд примеров. Их применение позволит геологам в практической деятельности использовать самые разнообразные подходы, наиболее соответствующие конкретным геологическим ситуациям и имеющейся информации.

В зависимости от особенностей геологического строения и изученности исследуемых территорий при проведении региональных съемочных работ (в масштабах 1:200 000—1:50 000) для оценки прогнозных ресурсов в пределах перспективных участков могут быть использованы различные геологические материалы.

Оценка осуществляется методом распознавания образов с обучением на эталонах — известных рудных объектах (например, рудных месторождениях с подсчитанными запасами). Для обучения распознаванию используется не менее 3—4 объектов, каждый из которых охарактеризован несколькими элементарными площадками размером  $1 \times 1$  или  $0,5 \times 0,5$  см в масштабе используемых для анализа геологических, геофизических и других карт, полученных на этапе проведения геологосъемочных и региональных геофизических исследований. В соответствии с методической схемой на первом этапе исследования (выделения перспективных площадей) все указанные карты помещают в территориальную машинную базу геологических данных. Таким образом, каждая элементарная площадка в пределах известных месторождений (как и всей исследуемой территории) будет охарактеризована полным набором геологических и других факторов. Ниже приведена методика расчетов (по Ю.К. Бахтадзе и др. [11]).

На первом этапе подсчета прогнозных ресурсов осуществляют расчет площадных продуктивностей каждой элементарной площадки в пределах известных месторождений. Такие расчеты проводят на основе сопоставления контуров рудных тел по всем категориям разведанных запасов с сеткой контуров элементарных площадок территориальной базы геологических данных. Для каждой элементарной площадки подсчитывают суммарное количество металла (прогнозируемого компонен-

та) по всем рудным телам (включая различные горизонты), попадающим в контур каждой элементарной площадки в пределах эталонного месторождения. Общее количество металла, приходящегося на такую площадку ( $P_s = 0,5 \times 0,5$  или  $1 \times 1$  см в масштабе карты), будем называть продуктивностью элементарной площадки. Исходные данные для подсчета продуктивности берутся из материалов по подсчету запасов соответствующих месторождений.

После определения продуктивностей всех элементарных площадок в пределах всех эталонных объектов их подразделяют на несколько классов или интервалов (обычно 3–5). Такое группирование выполняется геологом с учетом вариации значений продуктивностей на основе содержательного анализа исходных данных. Средняя продуктивность классов определяется по формуле

$$P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n P_i / n,$$

где  $P_{\text{ср}}$  — средняя продуктивность класса;  $P_i$  — продуктивность элементарной площадки, входящей в данный класс;  $n$  — число элементарных площадок в данном классе.

На втором этапе количественного прогнозирования формируют выборки и проводят процедуры обучения распознаванию каждого класса от остальных в полном исходном пространстве признаков территориальной базы геологических данных. Если, например, на первом этапе были выделены четыре класса продуктивностей:  $P^I$ ,  $P^{II}$ ,  $P^{III}$  и  $P^{IV}$ , то процесс обучения распознаванию будет осуществляться последовательно по следующим выборкам:  $P^I : P^{II} + P^{III} + P^{IV}$ ;  $P^{II} : P^I + P^{III} + P^{IV}$ ;  $P^{III} : P^I + P^{II} + P^{IV}$ ;  $P^{IV} : P^I + P^{II} + P^{III}$ .

Оценка качества распознавания решающего правила классификации выполняется контрольным объектом (по элементарным площадкам, не вошедшим в выборку обучения).

Третий этап заключается в классификации на основе решающего правила всех элементарных площадок в пределах новых перспективных участков, выделенных на первой стадии геологического прогнозирования. Такого рода классификация осуществляется последовательно по всем группам (классам) продуктивностей (в нашем примере:  $P^I$ ,  $P^{II}$ ,  $P^{III}$  и  $P^{IV}$ ).

Каждой элементарной площадке в пределах перспективных участков, отнесенной к тому или иному классу в процессе последовательного распознавания, присваивается продуктивность средняя для данного класса  $P_{\text{ср}}$ .

На четвертом этапе прогнозные ресурсы отдельных перспективных участков подсчитываются как сумма продуктивностей всех элемен-

тарных площадок различных классов, выделенных на предыдущем этапе:

$$P_3 I_{\text{пу}} = \sum_{i=1}^l P_i^I + \sum_{i=1}^m P_i^{\text{II}} + \dots + \sum_{i=1}^n P_i^k,$$

где  $P_3 I_{\text{пу}}$  — прогнозные ресурсы категории  $P_3$  в пределах контура одного перспективного участка;  $P_i^I, \dots, P_i^k$  — средние продуктивности каждого класса;  $l, m, \dots, n$  — число элементарных площадок каждого класса, выделенных методом распознавания образов на предыдущем этапе.

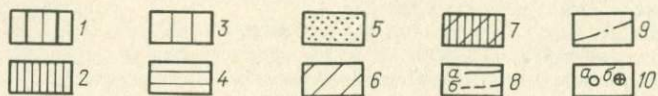
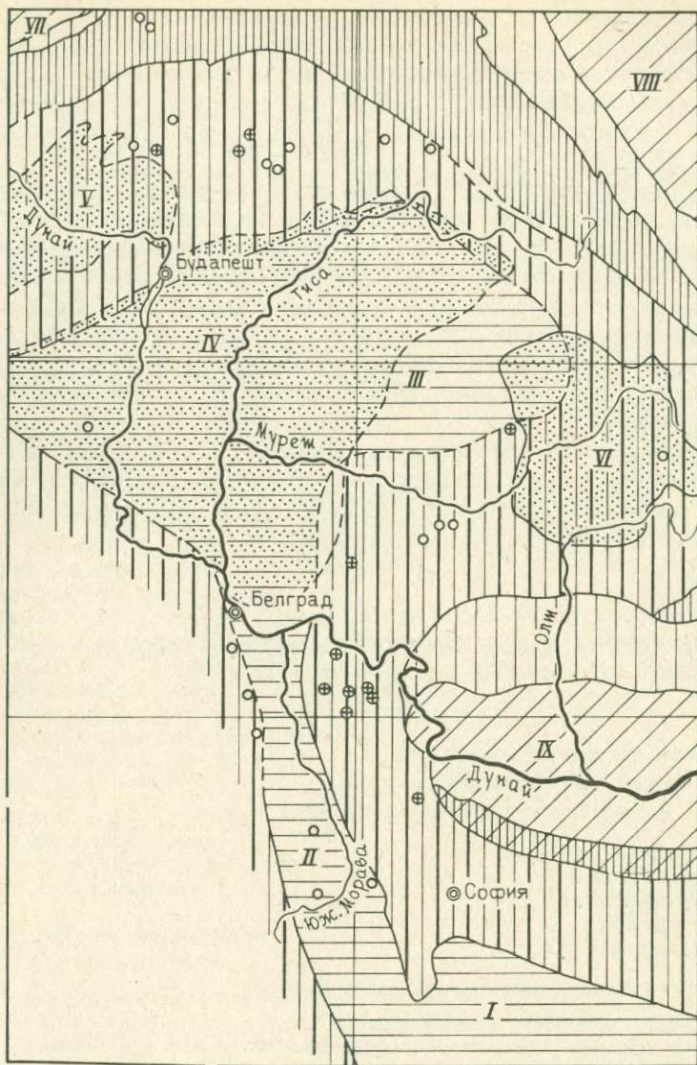
Суммарные прогнозные ресурсы  $P_3 I$  могут быть определены как сумма прогнозных ресурсов всех перспективных участков, выделенных в пределах последующей территории.

## Глава 6. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В данной главе приведены результаты применения человеко-машинных методов решения задач прогнозно-металлогенического анализа в масштабе 1:1 000 000 территории Карпато-Балканской складчатой области (общая площадь около 1 млн. км<sup>2</sup>, рис. 13). На примере железорудных месторождений вулканогенно-осадочного и скарнового генетических типов, а также месторождений полиметаллической и молибденомеднопорфировой формации показана принципиальная возможность количественной оценки степени влияния различных геологических фак-

Рис. 13. Основные структурные элементы Карпато-Балканской складчатой области (по Е.Г. Мартынову) [30].

Зоны альпийских складчатых систем: 1 — внутренние, 2 — внешние (флишевые), 3 — краевого прогиба; 4 — срединный массив; 5 — наложенные молассовые впадины; 6 — платформенное обрамление альпийских складчатых систем; 7 — переходные зоны между складчатой системой и платформой; 8 — границы основных структурных элементов (а — установленные, б — предполагаемые); 9 — важнейшие граничные разломы; 10 — вулканогенно-осадочные железорудные (а) и скарново-магнетитовые (б) месторождения. Тектонические единицы: I — Родопский массив (мегаблок), II — Сербско-Македонский массив, III — область Большой Венгерской впадины (Паннонский массив); наложенные впадины: IV — Большая Венгерская, V — Малая Венгерская, VI — Трансильванская; платформенное обрамление Карпато-Балканской области: VII — Центрально-Европейская эпипалеозойская платформа, VIII — Восточно-Европейская древняя платформа, IX — Мизийская плита



торов на локализацию оруденения и выявление закономерностей размещения месторождений на основе использования методов эвристического моделирования и распознавания образов (метода аналогий с известными рудными объектами). В работе принимали участие Е.Г. Мартынов, Э.А. Немировский, А.А. Сапунков, Л.Е. Эгель и другие исследователи [23, 30, 38 и др.].

Изучаемая территория отличается сложностью геологического строения, разнообразием видов минерального сырья и различной степенью изученности, что обусловило необходимость анализа значительных объемов комплексной геологической информации. Применение сложного математического аппарата с целью повышения качества и надежности прогнозных заключений, трудоемкость и многовариантность этого анализа предопределили необходимость использования человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации карт геологического содержания.

С этой целью на основе карт масштаба 1 : 1 000 000 (тектонической, метаморфитов, рудных формаций, магматических формаций и металлогенической) была создана машинная региональная база данных по Карпато-Балканской области, содержащая 101 фактор.

## ФАКТОРЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО КАРПАТО-БАЛКАНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

### 1. Тектоническое районирование

#### 1.1. Области альпийской складчатости

##### 1.1.1. Доальпийские тектонические единицы

1. Догерцинские
2. Раннегерцинские
3. Позднегерцинские
4. Постгерцинские
5. Раннекиммерийские

##### 1.1.2. Альпийские тектонические единицы

6. Позднекиммерийские – раннеальпийские
7. Раннеальпийские, частично среднеальпийские
8. Раннеальпийские, частично среднеальпийские флишевые
9. Единицы, сформированные в течение нескольких фаз складчатости
10. Раннеальпийские грабен-синклинии
11. Раннеальпийские грабен-синклинии под чехлом
12. Среднеальпийские флишевые
13. Среднеальпийские наложенные впадины
14. Позднеальпийские флишевые
15. Внутренняя зона позднеальпийского краевого прогиба
16. Внешняя зона позднеальпийского краевого прогиба
17. Позднеальпийские наложенные впадины

## 1.2. Области глубоко погруженного фундамента

18. Области развития чехла на архейском и протерозойском основаниях
19. Области развития чехла преимущественно на палеозойском основании

## 1.3. Области палеозойской складчатости

20. Добайкальские единицы выступов фундамента
21. Ранне-, позднебайкальские и раннекаледонские единицы выступов фундамента
22. Позднекаледонские и раннегерцинские единицы выступов фундамента
23. Позднегерцинские единицы выступов фундамента
24. Позднегерцинские единицы впадин
25. Поздние (постгерцинские) впадины

## 2. Дизъюнктивная и пликативная тектоника

### 2.1. Дизъюнктивная тектоника

26. Тектонические покровы первого порядка
27. Тектонические покровы второго порядка
28. Предполагаемые тектонические покровы
29. Надвиги
30. Скрытые надвиги
31. Разломы неустановленной формы, прослеженные
32. Разломы неустановленной формы, предполагаемые
33. Крутопадающие разломы, прослеженные
34. Крутопадающие разломы, предполагаемые
35. Важнейшие криптофрактуры
36. Разломы первого порядка (включая глубокозалегающие), прослеженные
37. Разломы первого порядка (включая глубокозалегающие), предполагаемые
38. Разломы второго порядка, прослеженные
39. Разломы второго порядка, предполагаемые
40. Разломы второго порядка (глубокозалегающие или скрытые), прослеженные
41. Сдвиговые перемещения по разломам

### 2.2. Пликативная тектоника

42. Флексуры
43. Важнейшие антиклинали
44. Важнейшие антиклинали, скрытые
45. Важнейшие синклинали

## 3. Магматические формации

### 3.1. Эффузивные формации

46. Докембрийская спилит-диабазовая геосинклиальная
47. Каледонско-герцинская спилит-кератофировая геосинклиальная
48. Каледонско-герцинская спилит-диабазовая геосинклиальная
49. Каледонско-герцинская базальт-латит-риолитовая (мелафировая) орогенная
50. Каледонско-герцинская базальт-латит-риолитовая (мелафировая) субвулканическая орогенная
51. Каледонско-герцинская риолитовая орогенная
52. Каледонско-герцинская риолитовая субвулканическая орогенная
53. Мезозойская офиолитовая геосинклиальная группа
54. Мезозойская спилит-кератофировая геосинклиальная
55. Мезозойская спилит-диабазовая геосинклиальная
56. Мезозойская трахибазальт-латитовая геосинклиальная
57. Мезозойская базальт-андезитовая геосинклиальная

58. Мезозойская андезит-риолитовая геосинклиальная
59. Кайнозойская базальт-базитовая (финальная) орогенная
60. Кайнозойская базальт-базитовая (финальная) субвулканическая орогенная
61. Кайнозойская андезитовая орогенная
62. Кайнозойская андезитовая орогенная (жильная)
63. Кайнозойская андезитовая субвулканическая орогенная
64. Кайнозойская андезит-латит-риолитовая орогенная
65. Кайнозойская андезит-латит-риолитовая субвулканическая орогенная
66. Кайнозойская риолитовая орогенная
67. Кайнозойская риолитовая субвулканическая орогенная

### 3.2. Интрузивные формации

68. Докембрийская габбро-лейкогранитовая геосинклиальная
69. Докембрийская ультрамафитовая альпинотипная геосинклиальная
70. Докембрийская диабаз-габбро-диоритовая геосинклиальная
71. Докембрийская гранит-мигматитовая геосинклиальная
72. Каледонско-герцинская гранит-мигматитовая геосинклиальная
74. Каледонско-герцинская гранит-мигматитовая гипабиссальная геосинклиальная
75. Каледонско-герцинская гранодиорит-гранитовая геосинклиальная
76. Мезозойская ультрамафитовая альпинотипная геосинклиальная
77. Мезозойская диабаз-габбродиоритовая геосинклиальная
78. Мезозойская диабаз-габбродиоритовая гипабиссальная геосинклиальная
79. Мезозойская гранит-мигматитовая геосинклиальная
80. Мезозойская габбро-монзонит-гранитовая геосинклиальная
81. Мезозойская габбро-монзонит-гранитовая гипабиссальная геосинклиальная
82. Мезозойская габбро-диорит-гранитовая геосинклиальная
83. Мезозойская габбро-диорит-гранитовая гипабиссальная геосинклиальная
84. Мезозойская щелочно-габбро-сиенитовая геосинклиальная
85. Кайнозойская диорит-гранодиоритовая орогенная
86. Кайнозойская диорит-гранодиоритовая гипабиссальная орогенная
87. Кайнозойская габбро-монцосиенитовая орогенная
88. Кайнозойская габбро-монцосиенитовая гипабиссальная орогенная

### 4. Метаморфические фации

89. Роговиковые
90. Ломонит-пренит-кварцевая
91. Лотрит (пумпеллит)-пренит-кварцевая
92. Зеленых сланцев
93. Глаукофановых сланцев
94. Эпидот-амфиболитовая
95. Амфиболитовая (пониженного давления)
96. Амфиболитовая (среднего и неопределенного давления)
97. Амфиболитовая (высокого давления)
98. Мигматиты
99. Эклогит
100. Каледонско-герцинская щелочно-габбро-гипабиссальная
101. Месторождения и рудопроявления

С целью опробования человеко-машинной технологии прогнозно-металлогенического анализа в масштабе 1 : 1 000 000 на примере железорудных полиметаллических и меднопорфировых месторождений Карпато-Балканской области были решены следующие геологические задачи:

оценка степени влияния различных геологических факторов на локализацию площадей развития различных рудных месторождений;

геологическое прогнозирование на основе эвристического подхода по моделям, построенным на основе априорных представлений специалистов-геологов об образовании месторождений;

выявление закономерностей размещения площадей развития месторождений определенных промышленно-генетических типов на основе использования принципа аналогии.

#### **АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНОГО И СКАРНОВОГО ТИПОВ**

В пределах рассматриваемой площади известны мелкие железорудные месторождения вулканогенно-осадочного типа — байкальского, каледонского, герцинского и альпийского возраста.

С целью оценки влияния различных геологических факторов на закономерности размещения площадей развития железорудных вулканогенно-осадочных месторождений и установления пространственной связи была составлена выборка из 22 месторождений указанного генетического типа. Для сопоставительного анализа рудных объектов сформировали выборку безрудных объектов (различных точек площади, априорно бесперспективных на обнаружение месторождений указанного типа).

По всему набору геологических факторов территориальной базы данных получили пространственно-статистические характеристики для этих выборок и выполнили их оценку в сопоставлении с аналогичными характеристиками (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение) для всей исследуемой территории Карпато-Балканской области. Кроме того, были рассчитаны гистограммы распределения рудных и безрудных объектов по каждому из факторов. В результате геологической интерпретации предварительно выявлены следующие закономерности, характеризующие относительную значимость отдельных геологических факторов.

Наиболее статистически устойчивая пространственная связь с орудением установлена Е.Г. Мартыновым для догерцинских единиц. Треть железорудных месторождений вулканогенно-осадочного типа (Житни-Поток, Власина, Чар-Седлар и др.) располагается в пределах догерцинских единиц, занимающих всего лишь около 5% общей площади исследуемой территории. Кроме того, значительная часть исследуемых рудных объектов находится в непосредственной близости от догерцинских единиц (до 25 км). Возможно, это связано с представлением о догерцинских единицах, как о срединных массивах, к которым примыкали внутренние части герцинских и альпийских геосинклиналей. Ранне- и

позднегерцинские тектонические единицы играют меньшую роль в локализации оруденения данного типа.

Выявлена также пространственная связь оруденения с областями развития кайнозойских андезитов. Особый интерес представляют краевые области наложенных впадин, примыкающие к неовулканикам кайнозойской андезитовой орогенной формации. Указанная группа месторождений имеет генетическую общность, по-видимому, в силу приуроченности к зоне постепенного перехода от андезитов к вулканогенно-осадочным отложениям (в горах Харгита — месторождение Мэдераш, в Вигорлат-Гутинской гряде — Гнойне, Вышне-Немецке, Сейков и в горах Земплин Банске).

Часть железорудных месторождений вулканогенно-осадочного типа приурочена к метаморфическим породам фации зеленых сланцев (район Пояна-Рускэ — месторождения Телюк и Гелар). Небольшая часть месторождений связана с метаморфическими породами амфиболитовой фации Сербско-Македонского массива (Житни-Поток и др.). К этой же группе следует отнести месторождения на контакте пород амфиболитовой фации с мигматитами (Чар-Седлар).

Анализ указанной выборки рудных объектов позволил выделить месторождение Зенгёварконь как самостоятельное, не входящее ни в одну группу. По-видимому, это своеобразие заключается в вероятной его связи с юрским вулканизмом, в то время как остальные железорудные месторождения данного типа связаны с более древним или молодым вулканизмом. Следует также отметить, что часть геологов относит указанное месторождение к осадочному генетическому типу.

Оценка эвристических моделей железорудных вулканогенно-осадочных месторождений, построенных на основе априорных представлений специалистов-геологов об условиях локализации оруденения и его связи с рудовмещающими геологическими образованиями, проводилась по методике, предложенной В.В. Марченко [20 и др.].

Е.Г. Мартыновым было составлено эвристическое решающее правило, сформированное из геологических факторов 1, 2, 5, 7, 21, 31, 47, 92 [30]. Данные факторы выбраны из следующих соображений. Существенное влияние на образование и локализацию оруденения оказали возрастные факторы (приуроченность к древним толщам догерцинских и герцинских единиц). Важное значение имеют факторы вещественного характера, приуроченность к определенным формациям, признаки тектонического характера (стадии геосинклинального развития). Наибольший информативный вес был дан породам фации зеленых сланцев и каледонско-герцинской спилит-кератофировой формации в силу того, что к ним приурочено значительное количество железорудных вулканогенно-осадочных месторождений. На основе использования этого эвристического решающего правила на ЭВМ был подсчитан вариант прогнозной карты (рис. 14, а). На данной карте максимум перспективности по эвристичес-

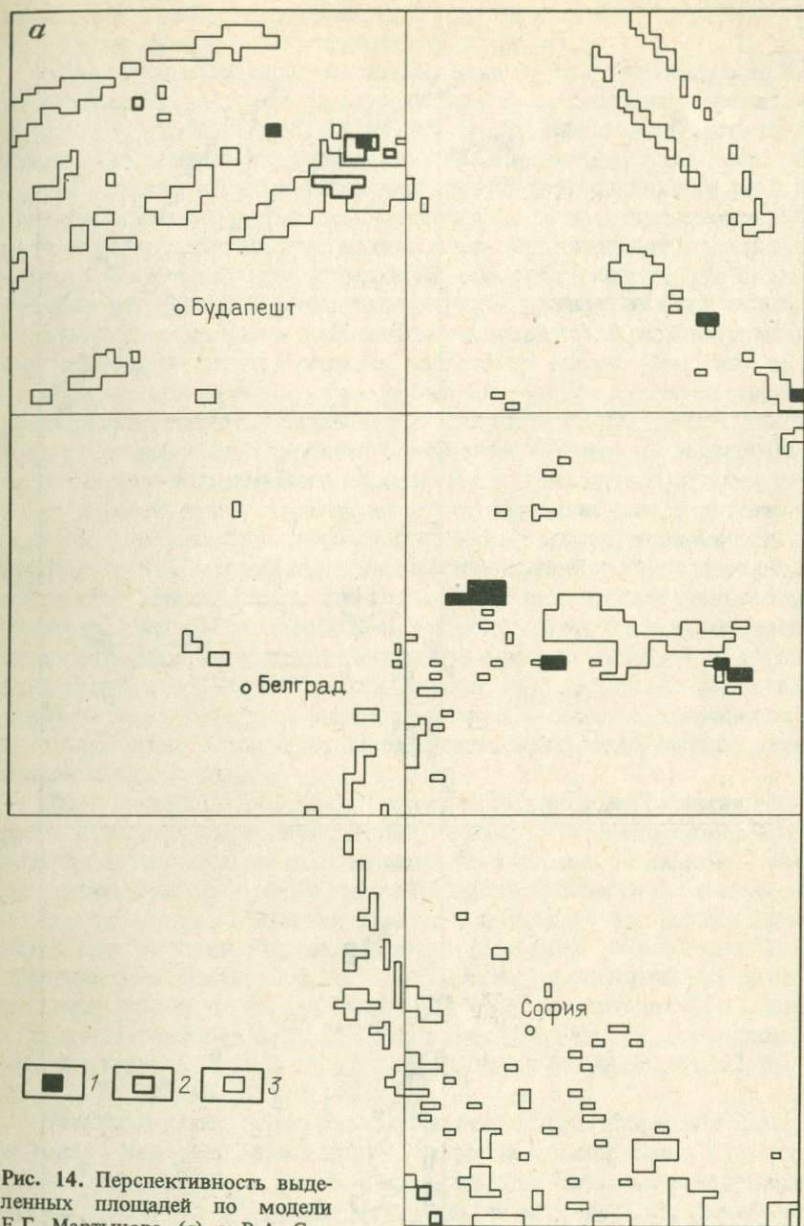
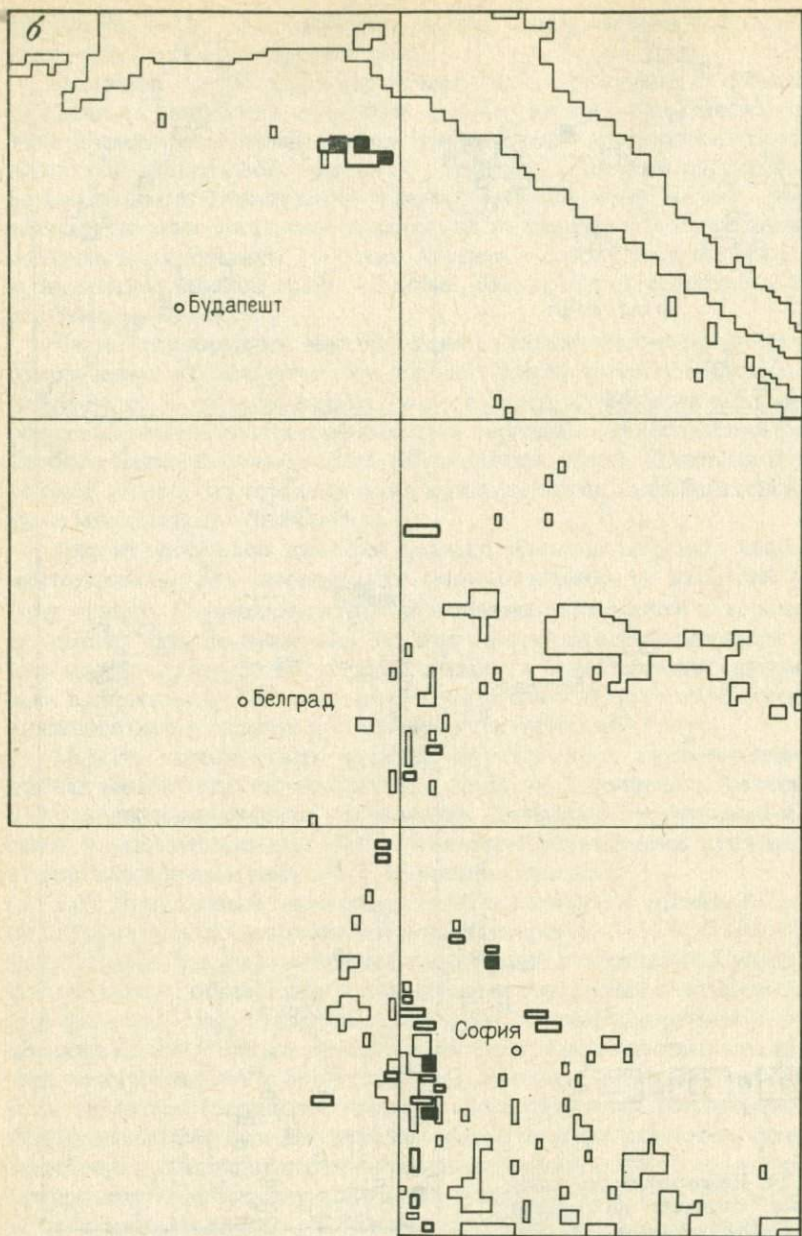


Рис. 14. Перспективность выделенных площадей по модели Е.Г. Мартынова (а) и В.А. Стаховича (б):

1 – первого порядка; 2 – второго порядка; 3 – третьего порядка [30]



Продолжение рис. 14.

кой модели приходится на Спишско-Гемерское Рудогорье, район Пояна-Рускэ, западную часть Старопланинской зоны.

В.А. Стаховичем было составлено эвристическое решающее правило из следующих факторов территориальной базы геологических данных: 1, 2, 3, 14, 21, 46, 47, 48, 49, 54, 55, 63, 65. Наиболее существенными (информативными) в данном случае выбраны факторы возрастной приуроченности геологических образований (догерцинские и раннегерцинские единицы) и факторы связи железорудных вулканогенно-осадочных месторождений с магматическими образованиями основных этапов и стадий развития складчатой области (спилит-кератофировая и спилит-диабазовая формации каледонско-герцинского и мезозойского возрастов, андезитовая — кайнозойского возраста). В результате машинной обработки получен вариант прогнозной карты (см. рис. 14, б), на которой как перспективные выделены участки преимущественного развития раннегерцинских тектонических единиц в следующих районах: Бихор, средняя часть Старопланинской зоны, Гемериды и центральная часть Сербско-Македонского массива. В пределах двух последних выявлены перспективные территории по обоим вариантам эвристических моделей, устойчивость и адекватность которых подтверждаются наличием на этих территориях железорудных месторождений вулканогенно-осадочного типа (Нижна-Слана, Власина). Остальные перспективные территории, выделенные по эвристическому решающему правилу, не имеют в своих пределах месторождений данного типа, но на одной из перспективных территорий средней части Старопланинской зоны известно гидротермальное железорудное месторождение Кремиковци, источником железа в котором могли быть более древние железосодержащие вулканогенно-осадочные толщи.

Выявление закономерностей размещения площадей развития железорудных месторождений вулканогенно-осадочного типа на основе использования принципа аналогии с известными рудными объектами — месторождениями данного типа Карпато-Балканской области было проведено по технологии распознавания образов с обучением на эталонах описанной выше выборки рудных объектов (алгоритм "Гиперпласт"). Для обучения распознаванию были использованы все геологические факторы региональной базы данных. После обработки алгоритмом "Гиперпласт" в качестве наиболее информативных оказались следующие геологические факторы: 1, 2, 3, 7, 13, 17, 26, 27, 29, 43, 46, 48, 59, 61, 62, 66, 67, 75, 82, 86, 89, 92, 96, 98, 100.

Месторождения скарново-магматической формации известны в зонах: Вепорид, Тупичницкой, Старопланинской, Сакар-Странджинской, Супрагетской и Кучайской; в покрове Бихария, неовулканитах Штьявнических гор и Сербско-Македонском массиве. Скарновые месторождения в пределах рассматриваемой площади образовались в орогенные стадии герцинского и альпийского тектоно-магматических циклов.

Все эти месторождения небольших размеров (мелкие), но некоторые из них (Крумово, Мартиново, Окна-де-Фьер) разрабатываются.

Скарновые месторождения герцинского возраста образовались при внедрении интрузий гранодиорит-гранитового состава в известняки на контакте интрузий габбро-диорит-гранитового (палеоген) и диорит-гранодиоритового (неоген) состава с карбонатными и глинисто-карбонатными толщами. Для месторождений данного типа характерны преимущественное расположение залежей в зоне экзоконтакта интрузивов, разнообразие форм рудных тел, сложность вещественного состава руд. Главный рудообразующий минерал скарновых месторождений — магнетит.

Для оценки влияния различных геологических факторов на размещение площадей развития железорудных скарновых месторождений была сформирована выборка из 11 месторождений.

В результате геологической интерпретации некоторых статистических характеристик выявлены определенные закономерности, характеризующие относительную информативность (значимость) отдельных геологических факторов региональной машинной базы данных.

Определена статистически устойчивая пространственная связь площадей развития месторождений скарново-магматического типа герцинского тектоно-магматического цикла с интрузиями гранодиорит-гранитового состава (Какава-над-Римавицей, Рудна-Глава, Црнайка и др.). Эти же скарнообразующие интрузии герцинского возраста прорывают породы докембрийской и каледонско-герцинской спилит-диабазовых формаций и образуют в экзоконтакте условия для локализации оруденения (Мартиново).

Породы мезозойской базальт-андезитовой формации являются благоприятной рудовмещающей средой для скарнового оруденения, что подтверждается данными гистограммы распределения, а также статистическими характеристиками (фактор 57). В пределах Среднегорья породы габбро-монзонит-гранитовой формации прорывают базальт-андезитовые образования, к этой зоне приурочено месторождение Крумово.

Породы, достигшие стадии метаморфизма зеленых сланцев, прорваны герцинскими интрузиями и являются вмещающей средой скарнового оруденения типа месторождения Мартиново.

Оценка эвристических моделей железорудных скарновых месторождений проводилась по двум вариантам эвристических решающих правил, составленных В.А. Стаховичем. Первый вариант, включающий в себя факторы 3, 23, 51, 61, 65, 75, 82, 85, был сформирован исходя из геологических априорных представлений об условиях образования месторождений данного генетического типа. Второй вариант получен на основе уточнения списка факторов путем статистического анализа гистограммы распределений по всей информации машинной базы геоло-

гических данных и представлен набором факторов 3, 37, 61, 64, 75, 82, 89, 92.

В результате машинной обработки получены два варианта прогнозных карт, лишь незначительно отличающихся друг от друга по расположению перспективных территорий. Это обстоятельство свидетельствует об "устойчивости" эвристических моделей в выбранном пространстве исходных геологических факторов. На обоих вариантах прогнозных карт выделяются следующие наиболее перспективные в прогнозном отношении территории: Банат, восточная часть Спишско-Гемерского Рудогорья, Старопланинская зона, восточная часть Гетского покрова и Северная Добруджа. На большинстве выделенных перспективных площадей имеются скарново-магматические месторождения (Мартиново, Ридань, Рудна-Глава, Црнайка, Тисовец и др.), а на остальных развиты скарнообразующие интрузивы гранодиорит-гранитового и габбро-диорит-гранитового состава.

Для анализа закономерностей размещения площадей развития железорудных скарновых месторождений на основе использования принципа аналогии с известными месторождениями данного типа Карпато-Балканской области был выбран следующий состав геологических факторов: 1, 2, 3, 17, 33, 35, 37, 43, 45, 46, 48, 49, 53, 67, 72, 75, 81, 82, 89, 90, 91, 92, 93. В качестве эталонов использовалась описанная выше выборка рудных объектов площадей развития скарновых месторождений железа. По технологии распознавания образов был получен вариант прогнозной карты, который подтверждает ранее выделенные наиболее перспективные территории: Банат, Северная Добруджа, внутренние зоны Западных Карпат и Старопланинская зона. Причем в пределах двух последних зон на карте, построенной с использованием метода распознавания образов, выделяются локальные участки повышенной перспективности: Спишско-Гемеровское Рудогорье (месторождения Тисовец и Какава-над-Римавицей), Трибеч, Поважски-Иновец (Выгне) и западная часть Старопланинской зоны (Мартиново).

Проведенный анализ позволил количественно показать статистически устойчивую пространственную связь площадей развития железорудных месторождений скарнового типа с интрузиями позднепалеозойского, мел-палеогенового и неогенового возраста.

#### **АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ РАЗВИТИЯ КВАРЦ-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕРЦИНСКОГО И АЛЬПИЙСКОГО ВОЗРАСТА**

Полиметаллические месторождения и рудопроявления герцинского возраста известны в зоне Татрид, Раховском массиве, в горах Веленце и Старопланинской зоне.

С целью оценки влияния различных геологических факторов на локализацию площадей развития полиметаллических месторождений герцинского возраста были проанализированы данные по выборке из 13 месторождений. По информации региональной базы геологических данных получили пространственно-статистические характеристики для каждого фактора выборки и выполнили их оценку в сопоставлении с аналогичными характеристиками (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение) для всей исследуемой территории Карпато-Балканской области. Результаты сопоставления позволили выявить следующие закономерности, характеризующие относительную значимость отдельных геологических факторов: большинство объектов выборки обучения имеет статистически устойчивую пространственную связь с карбонатными раннепалеозойскими толщами; характерна также пространственная связь с выступами догерцинского фундамента, сложного метаморфическими породами (допалеозойскими или раннепалеозойскими) фаций зеленых сланцев, амфиболитовой и мигматитов.

Месторождения кварц-полиметаллической формации альпийского возраста приурочены к неогеновым вулканитам горстового обрамления Большой Венгерской и Трансильванской впадин и к краевой части Сербско-Македонского массива — горы Штьявницкие и Втачник, Прешовские горы, Венгерское Среднегорье, Земплин-Циблешское поднятие, горы Оаш, Гутый, Циблеш, Марамуреш, в зоне Металифери, в Кучайской зоне, а также в Македоно-Родопском активизированном срединном массиве; отдельные месторождения известны в Сакар-Странджинской и Среднегорской зонах. Полиметаллические месторождения Македоно-Родопского массива приурочены к разрывным тектоническим структурам, возникшим при тектонической активизации массива. Минеральный состав рудных жил разнообразный, характерно преобладание галенита и сфалерита, а также пирита и иногда халькопирита.

Для оценки влияния различных геологических факторов на размещение площадей развития месторождений кварц-полиметаллической формации альпийского возраста были проанализированы данные по выборке из 35 месторождений. По информации региональной базы геологических данных получены пространственно-статистические характеристики для этой выборки и выполнена их оценка в сопоставлении с аналогичными характеристиками (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение) для всей исследуемой территории Карпато-Балканской складчатой области. При этом установлены следующие закономерности, характеризующие относительную значимость отдельных геологических факторов: большинство площадей развития полиметаллических месторождений альпийского возраста парагенетически связаны с мезозойскими спилит-диабазовой и базальт-андезитовой, кайнозойской базальт-базитовой (финальной) субвулканической орогенной,

кайнозойской андезитовой орогенной, кайнозойской андезит-латит-риолитовой орогенной, кайнозойской риолитовой субвулканической, мезозойской гранит-мигматитовой геосинклинальной, кайнозойской диорит-гранитовой орогенной магматическими формациями и приурочены к позднекиммерийским — раннеальпийским и частично среднеальпийским структурам. Неперспективны для выявления таких месторождений все до- и раннегерцинские структуры, не подвергавшиеся омоложению, внешние зоны краевых прогибов и мощные флишевые толщи.

#### АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ РАЗВИТИЯ МОЛИБДЕН-МЕДНОПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Месторождения молибден-меднопорфировой формации в рассматриваемом регионе распространены довольно широко, и многие из них имеют промышленное значение. Месторождения и рудопроявления этой формации известны в Венгерском Среднегорье, в зонах Металифери, Среднегорской, Тимокской и в Сербско-Македонском массиве. Все месторождение альпийские, образовались в орогенную и позднеорогенную стадии, а также при активизации Сербско-Македонского массива. Месторождения приурочены к массивам амфиболовых андезитов или к малым субвулканическим интрузиям диорит-гранодиоритового состава, а также к небольшим интрузиям диоритов, диорит-порфириров, кварц-диорит-порфириров орогенного этапа альпийского тектономагматического цикла. Все они характеризуются близкими минеральным составом и условиями формирования. Основные рудообразующие минералы — халькопирит, борнит, пирит, магнетит, ковеллин, второстепенные — молибденит, галенит, гематит.

Анализ статистических характеристик по выборке, состоящей из 12 месторождений, позволил установить некоторые закономерности их пространственного размещения.

Выявлена статистически значимая пространственная связь: 1) структурная — с догерцинскими, ранне- и позднегерцинскими единицами; раннеальпийскими, частично среднеальпийскими единицами и позднеальпийскими наложенными впадинами; тектоническими покровами первого порядка, глубинными разломами, а также с крупными синклинальными структурами; 2) парагенетическая — с мезозойскими базальт-андезитовой и каледонско-герцинской гранодиорит-гранитовой магматическими формациями; 3) пространственная — с метаморфическими породами фаций зеленых сланцев, амфиболитовой и мигматитов.

Мезозойская базальт-андезитовая формация (андезиты, их туфы и т.п.), участвуя в выполнении синклинальных структур, представляет собой комплекс пород, вмещающих месторождения рассматриваемой рудной формации, что и обуславливает, по-видимому, соответствующие

статистические закономерности. Метаморфические породы и каледонско-герцинские гранитоиды, обрамляя синклиналильные структуры, выходят на их крылья и имеют статистически значимую (пространственную) связь с месторождениями этой рудной формации.

Таким образом, опробование человеко-машинных методов для решения задач прогнозно-металлогенического анализа на примере исследования закономерностей площадей развития вулканогенно-осадочных и скарновых железорудных, полиметаллических и молибдено-меднопорфировых месторождений в пределах Карпато-Балканской области на основе использования серии карт геологического содержания масштаба 1:1 000 000 позволило подтвердить известные ранее и выявить новые закономерности площадей развития рудных полезных ископаемых. В процессе обработки и содержательной интерпретации данных появилась возможность количественной оценки информативности различных геологических факторов (табл. 6).

Таблица 6. Информативность некоторых геологических факторов пространственного размещения оруденения в пределах Карпато-Балканской складчатой области (в относительных единицах)

Номер фактора	Железорудные месторождения		Полиметаллические месторождения		Молибдено-меднопорфировые месторождения
	Вулканогенно-осадочный тип	Скарновый тип	Герцинская кварц-полиметаллическая формация	Альпийская кварц-полиметаллическая формация	
1	70,1	68,7	86,6	77,6	91,0
2	66,6	59,5	32,1	22,6	72,6
3	45,4	33,0	52,6	40,2	35,1
4	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0
5	0,0	0,0	-5,0	-5,0	-5,0
6	-9,6	-2,6	-8,7	-8,7	26,1
7	83,1	69,5	88,1	39,0	67,8
8	91,4	80,6	22,6	23,7	44,1
9	21,1	-1,9	58,5	17,9	-10,4
10	1,8	-12,8	-	-	-
11	-	-	70,4	50,0	68,2
12	-	-	-4,3	4,3	6,8
13	49,5	-5,5	85,7	46,1	25,3
14	22,7	-12,3	57,7	0,0	-29,9
15	7,6	15,2	-3,8	-13,2	3,8
16	-	-	6,5	-23,7	-13,4
17	82,2	55,6	75,6	84,4	73,3
18	-22,7	-24,8	-8,9	21,8	-24,5
19	-15,7	-18,0	-30,3	-33,7	-2,2

Продолжение табл. 6

Номер фактора	Железорудные месторождения		Полиметаллические месторождения		Молибденомеднопорфировые месторождения
	Вулканогенно-осадочный тип	Скарновый тип	Герцинская кварц-полиметаллическая формация	Альпийская кварц-полиметаллическая формация	
21	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0
22	-2,4	-0,8	3,2	-0,8	-0,8
23	4,8	0,8	4,8	-0,8	1,6
24	-15,3	-12,2	-	-	-
26	65,5	67,2	79,3	32,8	58,6
27	51,8	45,9	29,4	0,0	44,7
29	32,1	26,8	58,9	-7,1	-12,5
30	6,5	-11,1	-0,9	-0,4	-0,9
33	13,6	13,6	12,7	0,0	15,5
34	8,3	0,1	12,5	0,1	4,2
35	-18,8	2,1	-20,8	12,5	36,5
37	45,8	56,2	14,6	43,8	37,5
38	2,6	-2,6	0,9	-1,8	-5,3
39	-11,1	17,3	-30,9	19,8	42,5
41	-10,2	-13,3	7,1	15,3	27,6
42	-34,5	10,7	-29,8	-16,7	28,6
43	35,0	16,7	45,0	3,3	28,3
44	-3,4	6,6	-6,0	-6,9	2,6
45	-9,4	-9,4	-27,1	3,5	36,5
46	41,5	64,1	31,1	17,9	43,4
47	24,8	9,9	19,8	5,8	0,0
48	46,5	45,5	39,6	21,8	51,1
49	38,2	31,5	24,7	25,8	49,4
50	-0,8	1,7	0,8	21,2	17,0
51	-1,6	-4,9	1,6	3,3	8,2
52	1,6	-2,4	0,0	-2,4	-2,4
53	13,0	5,4	32,6	3,3	29,2
54	0,9	7,7	28,8	8,6	-7,7
55	-3,7	-12,0	21,3	40,7	10,2
56	0,0	5,6	0,0	8,7	0,0
57	1,9	33,3	-12,4	22,9	55,5
58	5,9	-16,8	38,6	2,0	-5,9
59	46,2	10,8	48,2	34,4	23,7
60	13,3	-	-	-	-
61	44,6	-10,8	71,1	16,9	-10,8
62	12,4	0,91	13,2	7,4	3,3
63	25,5	1,8	48,6	17,1	-9,0
64	4,5	6,3	8,1	42,3	26,1
65	4,4	0,9	-3,5	39,1	27,0

Продолжение табл. 6

Номер фактора	Железорудные месторождения		Полиметаллические месторождения		Молибденомеднопорфировые месторождения
	Вулканогенно-осадочный тип	Скарновый тип	Герцинская кварц-полиметаллическая формация	Альпийская кварц-полиметаллическая формация	
66	13,1	-49,2	41,0	32,8	18,0
67	18,6	28,3	3,5	21,2	23,9
68	5,0	-5,0	0,0	12,5	25,8
69	0,0	21,5	-10,3	27,1	65,4
71	-1,9	14,4	10,6	-1,9	13,5
72	5,5	21,1	-1,8	-3,7	34,9
73	9,7	-5,3	0,0	13,3	14,2
74	-0,8	-2,5	4,1	-0,8	-1,6
75	46,1	61,8	42,7	11,2	52,8
76	-1,6	-1,6	-1,6	-3,2	8,9
77	11,5	5,7	2,5	4,9	4,1
78	18,2	5,8	8,3	5,8	4,1
79	-1,8	-6,3	-10,0	35,5	42,7
80	-4,6	-7,2	-9,1	21,8	34,6
81	3,5	31,0	-4,3	16,4	37,1
82	29,4	34,9	16,5	5,5	22,0
84	15,1	-0,8	25,2	-2,5	-5,9
85	19,8	5,8	24,0	6,6	0,0
86	34,6	3,7	51,4	25,2	5,6
87	14,2	18,3	-1,6	15,8	8,3
88	-3,3	0,8	-3,3	21,3	11,5
89	41,1	54,2	8,4	14,0	19,6
90	15,0	32,0	-14,0	1,0	0,0
91	29,2	43,8	11,2	21,3	55,1
92	77,8	46,3	88,9	66,7	
93	2,5	10,9	-5,9	-5,0	-5,9
94	43,7	-6,9	49,4	20,7	6,9
95	13,2	21,1	-1,8	10,5	21,1
96	85,7	58,7	79,4	76,2	71,4
98	55,9	35,3	76,5	64,7	73,5
100	0,0	9,6	9,6	23,1	42,3

Следует отметить высокую оперативность и качество многовариантного прогнозно-металлогенического анализа с применением человеко-машинных методов на основе использования большого количества факторов, представленных различными специализированными картами (геологическими и рудных формаций, тектоническими, металлогеничес-

кими, глубинного строения, космоктоническими и т.д.). Создание единой карты, объединяющей множество специализированных карт, практически невозможно традиционными методами, их синтез может быть осуществлен только на основе применения человеко-машинной технологии.

## Глава 7. ВЫДЕЛЕНИЕ РУДНЫХ УЗЛОВ И ПОЛЕЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

### ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Интенсивное использование в последние годы дистанционных методов для оценки природных ресурсов повышает качество информации, увеличивает ее объем. Одной из главных задач получения необходимой информации для выбора поисковых работ является широкое использование космоснимков в рудной геологии. Космические методы и средства исследования позволяют эффективнее проводить поиски полезных ископаемых, полнее изучать тектоническое строение и выявлять взаимосвязи крупных геологических элементов земной поверхности, осуществлять выявление территорий, перспективных для локализации месторождений полезных ископаемых. Исследования в настоящее время активно развиваются, при этом открываются все новые аспекты изучения геологических ситуаций, намечаются пути, которые должны привести к более качественному решению проблем, связанных с познанием закономерностей размещения рудных месторождений в земной коре.

Обработка большого количества данных и комплексная интерпретация материалов дистанционного зондирования только традиционными способами становятся уже практически невозможными. Разрабатываемые в ряде стран системы обработки результатов космических съемок для оценки природных минеральных ресурсов, как правило, используют формальные элементы интерпретации, в то время как геология имеет дело с большим количеством неформализуемых понятий. Наиболее же полное использование всей последней информации, содержащейся в данных дистанционного зондирования и наземных съемок (геологических, геофизических, геохимических и др.), и их комплексная интерпретация открывают новые возможности для дальнейшего повышения эффективности геологических исследований. Отсюда становится понятной целевая направленность человеко-машинных методов и систем в общем комплексе обработки космических данных [21]. На рис. 15 показана принципиальная схема последовательности обработки и комп-

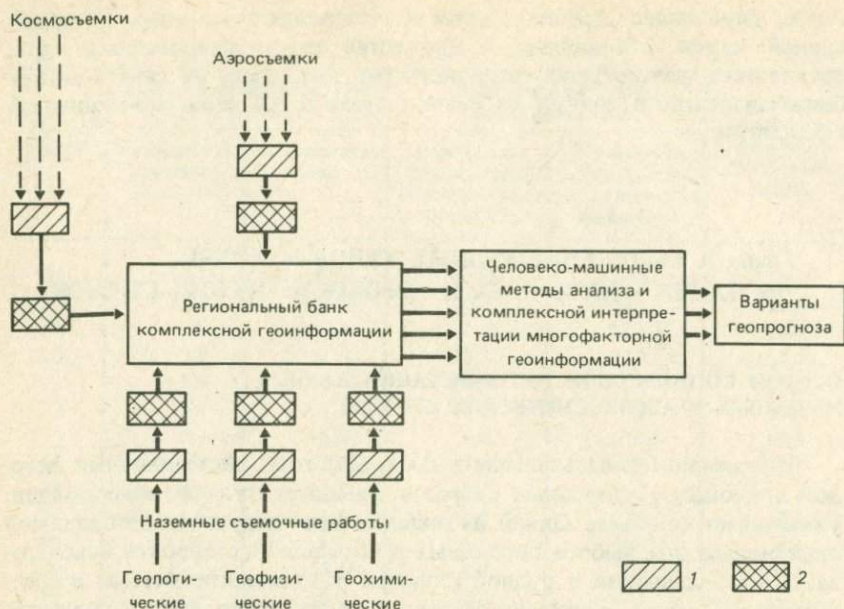


Рис. 15. Схема информационной технологии комплексного анализа данных наземных и аэрокосмических съемок при геологическом прогнозировании и оценке перспектив рудоносности территорий [21].

1 – автоматизированные системы, проблемно-ориентированные на обработку исходных данных (АСОД); 2 – автоматизированные системы, проблемно-ориентированные на решение частных задач прогноза

лексного применения данных аэрокосмических и наземных съемок при прогнозировании месторождений полезных ископаемых на основе человеко-машинных методов и технологий с использованием проблемно-ориентированных систем (типа РЕГИОН, СКАНДИНГ и др.). Данные аэрокосмических и наземных геологических, геофизических, геохимических и других съемок проходят предварительную обработку (преобразование "аналог-цифра", введение географических координат, различных поправок, осуществление трансформации и т.п.) с помощью соответствующих автоматизированных систем (АСОД-Геофизика, АСОД-Геохимия и т.д.). На основе анализа полученной информации осуществляется решение частных задач геологического прогноза: дешифрирование аэрокосмоснимков – выделение линейных элементов, кольцевых структур; интерпретация геофизических данных – изучение особенностей глубинного геологического строения и др.; обработка геохимических измерений – выделение аномальных ореолов рассеяния и др. Для этих целей

могут использоваться соответствующие проблемно-ориентированные системы.

Все эти материалы должны поступать в единый региональный банк данных. Комплексную интерпретацию всей информации в целях исследования закономерностей размещения месторождений и особенностей локализации оруденения (геологическое прогнозирование) целесообразно осуществлять на основе использования геологами человеко-машинных методов анализа геоинформации с помощью диалоговых и экспертных систем, проблемно-ориентированных на решение задач геологического прогнозирования. Эти системы позволят геологам формировать территориальные базы геологических данных по конкретным территориям (включая материалы наземных исследований и материалы космических съемок, например, в виде космофотогеологических карт) и выполнять в диалоговом режиме анализ и комплексную интерпретацию всей информации для выделения новых перспективных площадей с помощью различных математических и эвристических методов. Конечным результатом этого процесса будут прогнозные карты и оценка прогнозных ресурсов.

#### ПРОГНОЗ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЯКУТИИ И ЛАППИ (ФИНЛЯНДИЯ)

Исследование выполнено по территории Восточной Якутии (85 тыс. км<sup>2</sup>). Работы осуществляли на основе широкого использования дистанционных материалов, включая данные дешифрирования космо- и аэрофотоснимков, а также геофизических измерений.

Были поставлены следующие геологические задачи: 1) выявление основных закономерностей размещения оловянного оруденения и условий локализации рудных полей и узлов; 2) выделение перспективных участков для поисков оловянного оруденения; 3) оценка возможностей применения человеко-машинной технологии для комплексного анализа данных космических и наземных съемок. В исследованиях принимали участие Л.М. Натапов, Э.А. Немировский, А.А. Сапунков, Ю.Н. Спомиор, В.А. Яковлев и др. [23, 31].

На территории района известен ряд месторождений и рудопроявлений олова касситерит-сульфидной формации, парагенетически связанных с интрузиями гранодиоритового состава и приуроченных к зонам глубинных разломов северо-восточного простирания.

Из-за относительно высокой геологической изученности района и в связи с этим малой вероятности выявления крупных месторождений олова, обнажающихся на поверхности, поисковые работы ориентировались на обнаружение слабозеродированного и соответственно трудно-выявляемого оруденения, к тому же в условиях очень плохой обнаженности.

Сущность работы по прогнозированию сводилась к следующему. Выбирали территории, расположенные в пределах известных оловорудных зон, которые описывали комплексом карт, составленных в едином масштабе. Сведения, содержащиеся в этих картах, охватывали известные и возможные косвенные рудоконтролирующие факторы.

Задача решалась на стадии предпроектного прогноза, предшествующей полевым поисковым работам. Прогнозные построения осуществлялись в масштабе 1:200 000; при этом размер элементарной ячейки был равен  $2 \times 2$  км, что обеспечивало возможность последующей классификации участков минимальной площадью в  $4 \text{ км}^2$ .

Таким образом, исходная информация представляла собой картографический материал, сведенный в масштабе 1:200 000 и отражающий все элементы и особенности геологического строения изучаемой территории, рассматриваемой как набор различных факторов, определяющих возможность и места локализации оловянного оруденения. Сводная прогнозная карта была выдана в масштабе 1:500 000.

Перечень факторов территориальной базы данных на начальной стадии исследований насчитывал 46 наименований и содержал сведения об известных месторождениях и рудопроявлениях олова, их формационной принадлежности и масштабах оруденения, магматизма, разрывных и складчатых структурах, литологии осадочных толщ, характере магнитного поля, поля силы тяжести, признаков гидротермальной деятельности и целый ряд других картографических геологических факторов. Важное место занимали данные дешифрирования космо- и аэрофотоснимков, представляющих собой достаточно объективную информацию, часто генерализованную, значительно дополняющую и корректирующую имеющиеся геологические материалы. Эта информация оказалась особенно важной при анализе разрывных нарушений — одного из ведущих для олова рудоконтролирующих факторов, поскольку данные геологических карт оказывались не всегда исчерпывающими и достоверными. Все известные рудные объекты были разбиты на 5 классов (по особенностям генезиса, масштабам оловянного оруденения и т.п.), 40 % объектов не участвовали в анализе и использовались в качестве контрольных.

Набор рудоконтролирующих факторов определялся по данным статистического анализа (гистограммы, вариационные кривые, статистические характеристики) и методом распознавания образов. В табл. 7 приведены результаты анализа информативности основных групп факторов для рудных объектов.

Важным результатом при этом явилось то, что для каждого из рудоконтролирующих факторов были определены не только количественные оценки информативности, но и ряд других оценочных параметров, в том числе ширина зоны влияния каждого фактора, уровень концентрации рудных объектов в пределах этой зоны и т.д. (см. табл. 7).

Данные относительного вклада информации геологических, геофизи-

Таблица 7. Некоторые параметры рудоконтролирующих факторов

Наименование факторов	Оценочные параметры	Месторождения (23)	Рудопроявления		Все объекты (163)
			перспективные (48)	прочие (92)	
Складчатые структуры					
Антиклинали (осевая часть)	$R_0$	-3,9	-2,4	-3,4	-
	$R', R''$	0 -2	0 -2	0 -1	0 -2
	$N$	39	38	30	34
	$C_i$	5	13	8	-
Синклинали (осевая часть)	$R_0$	-3,7	-3,6	-3,8	-
	$R', R''$	0 -2	0 -2	0 -1	0 -2
	$N$	35	33	24	28
	$C_i$	2	0	3	-
Глубинные разломы					
Субмеридиональные	$R_0$	-6,1	-7,3	-13,7	-
	$R', R''$	+4 -4	+1 -3	+2 -4	+4 -4
	$N$	48	29	23	29
	$C_i$	14	19	44	-
Субширотные	$R_0$	-30,1	-27,9	-31,5	-
	$R', R''$	-	0 +4	-	-
	$N$	-	10	-	-
	$C_i$	-	12	-	-
Северо-восточные	$R_0$	+0,8	-10,6	-6,3	-
	$R', R''$	+10 -5	+6 -4	+7 -4	+10 -5
	$N$	78	42	54	54
	$C_i$	23	21	13	-
Северо-западные	$R_0$	-16,9	-17,5	-16,2	-
	$R', R''$	+2 -3	+4 -4	+4 -5	+4 -5
	$N$	22	23	18	20
	$C_i$	0	28	12	-
Тектонические нарушения					
северо-восточные	$R_0$	-10,2	-4,5	-6,0	-
	$R', R''$	0 -5	0 -4	0 -6	0 -6
	$N$	48	60	62	60
	$C_i$	17	2	13	-
северо-западные	$R_0$	-7,9	-8,0	-5,7	-
	$R', R''$	0 -6	0 -5	0 -6	0 -6

Наименование факторов	Оценочные параметры	Месторождения (23)	Рудопроявления		Все объекты (163)
			перспективные(48)	прочие (92)	
	$N$	61	48	70	62
	$C_i$	0	28	3	-
Литологические и магматические					
Песчаники	$R_0$	-11,9	-6,5	-10,3	-
	$R', R''$	+1 0	+1 -0	+6 0	+6 0
	$N$	4	23	19	26
	$C_i$	0	3	5	-
Алевролиты	$R_0$	-3,3	-3,1	-2,3	-
	$R', R''$	+3 0	+5 0	+6 0	+6 0
	$N$	31	34	40	39
	$C_i$	0	9	3	-
Переслаивание песчаников и алевролитов	$R_0$	+0,3	-1,4	-2,4	-
	$R', R''$	+6 0	+6 0	+6 0	+6 0
	$N$	65	43	41	46
	$C_i$	0	5	16	-
Магматические образования, выходящие на поверхность (контуры площадей развития)	$R_0$	-0,8	-0,9	-2,6	-
	$R', R''$	+4 -2	+2 -2	+3 -2	+4 -2
	$N$	83	83	78	80
	$C_i$	33	39	39	-
Магматические образования, не вскрытые эрозией (контуры отрицательных аномалий поля силы тяжести)	$R_0$	+1,3	-1,8	-2,1	-
	$R', R''$	+6 -6	+10 -4	+10 -5	+10 -5
	$N$	91	75	66	73
	$C_i$	42	34	17	-

Примечание.  $R_0$  — средняя удаленность проявлений оловянного оруденения от картографических геологических факторов, км;  $R'$  — ширина зоны влияния в пределах картографического геологического фактора, км;  $R''$  — ширина зоны влияния вне контура картографического геологического фактора, км;  $N$  — уровень концентрации рудных объектов в пределах зоны влияния рассматриваемого фактора, % общего числа рудных объектов;  $C_i$  — оценка относительной информативности фактора, в баллах (определена алгоритмом распознавания образов "Гиперпласт").

ческих и аэрокосмических факторов размещения эндогенного оруденения олова в Восточной Якутии приведены ниже:

<i>Магматические <math>C_1</math></i> . . . . .	26,9
в том числе выделенные по:	
геофизике . . . . .	11,3
геологической карте . . . . .	15,6
<i>Структурно-тектонические</i> . . . . .	58,7
в том числе выделенные по:	
дешифрированию космоснимков . . . . .	31,3
интерпретации геофизических данных . . . . .	21,1
геологической карте . . . . .	6,5
<i>Метасоматические</i> . . . . .	8,8
<i>Литолого-стратиграфические</i> . . . . .	5,6

В итоге анализа информативности геологических факторов установлено.

1. Большинство геологических рудных объектов (как месторождений, так и рудопроявлений олова) локализуется либо в пределах контура полей развития магматических образований (60%), либо в непосредственной близости от них (20%) при максимальной концентрации в пограничной зоне ( $\pm 1$  км). Этот же вывод подтверждается данными геофизических полей (локальными отрицательными аномалиями поля силы тяжести и положительными локальными аномалиями магнитного поля).

2. Одним из основных факторов, определяющих закономерности размещения магматических и рудных объектов, являются зоны глубинных разломов. В пределах "сферы влияния" глубинных разломов северо-восточного направления локализовано 54% всех рудных объектов, в том числе 78% месторождений и 42% перспективных рудопроявлений. Удалось выявить характерную и очень важную особенность размещения рудных объектов относительно зон глубинных разломов, заключающуюся в том, что максимум концентрации крупномасштабных объектов (месторождений) приходится на внутреннюю часть зоны, тогда как мелкие объекты располагаются относительно равномерно как внутри зоны, так и вблизи нее. Та же закономерность выявляется при анализе глубинных разломов.

3. Для складчатых дислокаций I и II порядков не была выявлена достаточно четкая картина рудоконтролирующей связи с месторождениями и рудопроявлениями изучаемой территории. Рудогенные объекты равномерно рассеяны как в осевых частях антиклинальных и синклиналильных структур, так и на их крыльях.

4. Обработка данных дешифрирования космических снимков показала их достаточно высокую эффективность для решения задач геологического прогнозирования. В большинстве случаев анализ факторов космической съемки позволил не только в значительной степени уточ-

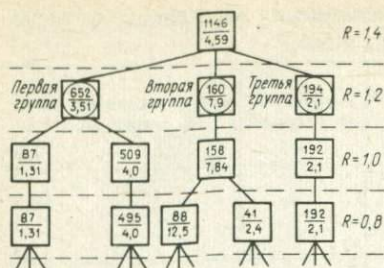


Рис. 16. Дендрограмма таксономии магматитов исследуемого района (по данным алгоритма "Транзитив").

В числителе — число точек локализации магматитов в таксоне (таксоны с количеством точек менее 30 не учитывались); в знаменателе — среднее расстояние (в км) от магматитов таксона до точек оловянной минерализации;  $R$  — мера близости в пространстве признаков. По А.А. Саункоу.

нить позицию и геологическую сущность основных рудоконтролирующих факторов (магматогенных и др.; рис. 16), но и обнаружить новые объекты рудоконтроля, не выявленные традиционными методами съемок. Высокая поисковая значимость линейных объектов (линеаментов), отдешифрированных на космических снимках, вполне очевидна, в меньшей степени это можно сказать о кольцевых структурах.

5. Анализ литологических факторов показал их малую информативность по сравнению с основными рудоконтролирующими факторами, хотя толщи переслаивания песчаников и алевролитов имеют некоторую поисковую значимость и позволяют лишь уточнить представление о минерагении исследуемой территории.

Выделение перспективных участков осуществлялось путем формирования эталона количественной характеристики объекта прогнозирования (рудного поля). С этой целью за эталонные объекты принимались известные проявления олова (в одних вариантах — и проявления, и месторождения, в других — только крупные месторождения и т.д.). Этот объект (группа объектов) аппроксимировался элементарными площадками (в переводе на масштаб исследований  $S = 4 \text{ км}^2$ ), для геометрического центра которых определялось по всем картам расстояние до каждого из ближайших геологических факторов банка данных. Совокупность таких параметров  $f(r)$ , полученных по всем ( $m$ ) картам, рассматривалась как индивидуальная количественная характеристика объекта прогнозирования. Поскольку подобную количественную характеристику легко было получить для каждой из элементарных ячеек, на которую была поделена площадь, то можно было сравнить эталонную площадь (объект) с другими площадями (объектами) исследованной территории. Следует подчеркнуть, что количественным критерием прогнозной оценки в данном случае могла бы быть любая мера близости, минимизирующая (в количественном выражении) степень отличия эталонной площади (объекта) и проверяемых площадей (объектов). Итоговая карта отражала вероятность обнаружения оловянного оруденения в каждой из элементарных площадей.

По технологии распознавания образов с обучением на известных эталонах (алгоритм "Гиперпласт") было проведено девять вариантов

прогнозирования с различными комбинациями участвующих в анализе выборок. Все упомянутые варианты построения прогнозной карты использовали в качестве конкурирующих моделей. Предпочтение было отдано варианту, в котором программой опознано максимальное количество контрольных объектов — известных месторождений и рудопроявлений (88 %).

Параллельно методом поиска аналога с использованием алгоритма таксономии "Транзитив" решались задачи районирования территории с последующим выделением участков, аналогичных в выбранном пространстве признаков эталонному рудному полю — месторождению определенного минерального типа той или иной рудной формации ("особой точке"). Тем самым решались вопросы прогнозирования качественного состава руд предполагаемого рудного объекта и оценивались их прогнозные ресурсы.

Полученные результаты послужили основой для составления карты рудоконтролирующих факторов оловянного оруденения исследуемой территории, карты закономерностей оловянного оруденения и прогнозной карты. В этих картах нашла свое отражение модель геологической ситуации, благоприятной для локализации оловянного оруденения, подтвердились значения целого ряда известных рудоконтролирующих факторов, а также выделен ряд новых критериев. В то же время полученные количественные оценки этих факторов и, как следствие, их ранжировка существенно повысили надежность и достоверность проведенных прогнозных построений. Существенно важным моментом явилось установление границ зон влияния различных факторов локализации оруденения.

Осуществление нескольких вариантов прогнозных построений позволило в итоге выделить не только площади, перспективные в отношении оловянной минерализации, но и участки, благоприятные для локализации крупномасштабного оруденения. Последнее уже является элементом прогноза более высокого уровня — количественного прогноза.

Варьируя жесткостью требований аналогии, в пределах перспективных площадей удалось выделить участки наиболее вероятной локализации оруденения, что весьма важно для проведения целенаправленного поиска и установления степени детальности наблюдений и мест максимальной концентрации внимания исследователя и основных объемов работ (рис. 17). Суммарная площадь перспективных участков составила 12,9 %.

Местоположение перспективных участков на прогнозной карте, полученной с помощью человеко-машинного анализа, на 65 % совпало с местоположением этих участков на картах, составленных традиционным методом. Однако границы этих участков в человеко-машинном варианте были установлены более четко, а сами площади оказались более локальными.

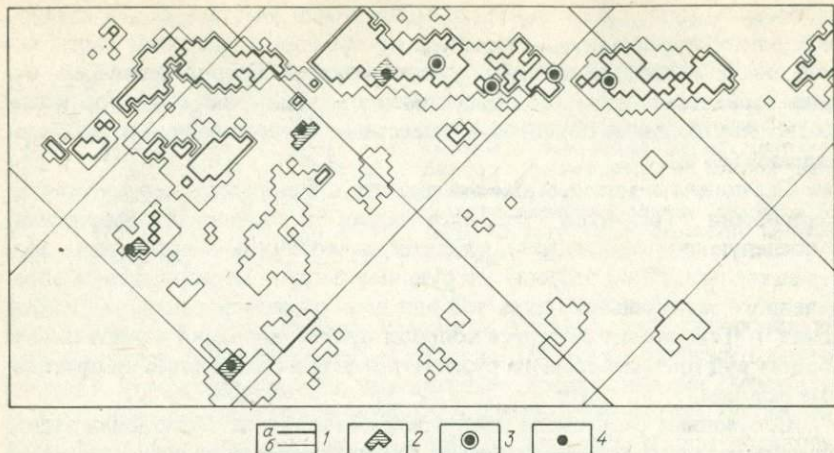


Рис. 17. Прогнозная карта, составленная с использованием человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации данных наземных геологических, геофизических и геохимических съемок и результатов аэрокосмических исследований. По Л.М. Натанову и др. [31].

1 – контуры перспективных площадей, выделенных с помощью алгоритма распознавания образов по эталонным месторождениям олова (а) и по эталонным рудопроявлениям (б); 2 – участки, на которых проведены поисково-оценочные работы; 3 – известные месторождения олова; 4 – рудопроявления олова, выявленные при поисково-оценочных работах

Размеры выделенных перспективных участков колеблются в пределах от 160 до 700 км<sup>2</sup>. Самые крупные из них охватывают рудные узлы и рудные поля с известными крупными рудопроявлениями и месторождениями олова. В пределах ряда перспективных участков располагаются известные, но недостаточно изученные рудопроявления. Проверка прогнозных построений осуществлена в процессе полевых работ.

Поисковые работы были проведены на 33 перспективных участках, выделенных с использованием человеко-машинных методов комплексного анализа информации и расположенных в пределах исследуемой территории. В результате поисковых работ выявили широко проявленную оловянную минерализацию на 18 участках; из них на 5 участках уровень содержания олова соответствовал промышленным или был близок к ним, а эрозионный срез оценен как незначительный (верхнерудный). На 6 других участках уровень содержания оказался несколько ниже промышленных. Однако результаты исследований позволили предположить значительное увеличение содержаний олова с глубиной и в связи с этим рекомендовать дальнейшее изучение этих рудопроявлений. И еще шесть участков были предложены для постановки более деталь-

ных поисковых работ с целью оценки их перспектив в отношении нахождения россыпных месторождений олова.

Достоверность прогноза оловорудной минерализации оценена в 97%; крупномасштабного оруденения с промышленным содержанием олова в рудных телах на уровне современной поверхности или на глубине — 33%. Ошибка II рода (включение бесперспективных площадей в контур прогноза) составила соответственно 3,47 и 67%. Полевые работы на исследуемой территории по выявлению площадей, перспективных на олово, позволили осуществить практическую проверку прогнозных построений, уточнить перечень и роль каждого из рудоконтролирующих факторов и соответственно после внесения корректив добиться высокой надежности и достоверности прогноза и одновременно высокого уровня его локальности, достигшего для олова 6,5%, для других металлов — от 5,5 до 13,5%. На одном участке можно ожидать наличие месторождения.

Уровень вероятности ошибок I рода (пропуск перспективных площадей) при прогнозе оловянного оруденения не превышал 5–10% (по распознаванию на контрольных объектах).

На заключительной стадии работ были подсчитаны прогнозные ресурсы категорий  $P_3$  по рудным узлам. В пределах одного из узлов их сравнили с подсчитанными запасами известных месторождений; точность подсчета прогнозных ресурсов составила 0,81.

Была также проведена оценка прогнозных ресурсов сурьмы в пределах северо-восточной части Якутии [25]. Объекты, выявленные на космических снимках, классифицировались и исследовались при проведении опорных геологических маршрутов с применением литохимического и шлихового опробования. Контуры расчетных блоков определяли с помощью человеко-машинной системы РЕГИОН с обучением на примере 18 известных рудопроявлений. В региональную базу геологических данных вошли 64 фактора, характеризующих как прямые поисковые признаки (рудопроявления, точки минерализации, шлиховые и литохимические ореолы), так и косвенные поисковые геологические признаки (зоны гидротермальных и метасоматических изменений), рудоконтролирующие факторы (литологические, стратиграфические, структурные), а также поисковые критерии, установленные по материалам геофизических исследований. Из всей совокупности факторов путем многочисленных вариаций выбрали 22 наиболее информативных фактора.

Критерием для геологической экстраполяции на неизученные перспективные объекты данных, полученных на опорных (эталонных) участках, была принята геохимическая специализация тектонических блоков, определяющая местоположение металлогенических зон. Для каждого из этих блоков рассчитали коэффициенты, позволяющие реализовать перевод единицы измерения из относительных баллов  $P_B$  в площадную продуктивность  $P_c$ .

Площадную продуктивность незаверенных участков рассчитывали по формуле

$$P_c = \beta_{Гс} P_B,$$

где  $\beta_{Гс}$  — переходный коэффициент, экстраполируемый на все объекты блока, несущего самостоятельную геохимическую специализацию.

Прогнозные ресурсы  $Q$  полезного ископаемого по категории  $P_3$  определяли по уравнению

$$Q = K_H (C_m / k_H) qh,$$

где  $K_H$  — коэффициент надежности прогноза;  $k_H$  — экстраполируемый коэффициент остаточной продуктивности;  $C_m$  — коэффициент концентрации промышленного оруденения на современном уровне эрозионного вскрытия;  $q$  — ресурсы на 1 м углубки;  $h$  — глубина оценки прогнозных ресурсов (200 м).

Коэффициент надежности прогноза равен

$$K_H = M_{пр} / M_{уч} = 15/21 = 0,70,$$

где  $M_{пр}$  — число выявленных аномалий;  $M_{уч}$  — число проверенных перспективных участков.

Коэффициент концентрации промышленного оруденения  $C_m$  экстраполирован на все анализируемые объекты территории:

$$C_m = Q_{рт} / Q_{п} = 0,001,$$

где  $Q_{рт}$  — прогнозные ресурсы эталонного рудопроявления;  $Q_{п}$  — прогнозные ресурсы участка, выделенного системой РЕГИОН и охватывающего эталонное рудное поле.

Коэффициент остаточной продуктивности равен 1, так как оценка проводилась по первичным ореолам. Ресурсы на 1 м углубки  $q$  при удельной плотности пород  $d = 2,5 \text{ т/м}^3$  равны

$$q = (P_c d) / 100 \% = P_c / 40.$$

На прогнозируемую карту наносят вычисленные запасы сурьмы по категории  $P_3$  и изолинии коэффициентов зональности  $K_3$ , дающие представление о степени эрозионного вскрытия исследуемых участков. Кроме того, вводится эмпирический коэффициент прироста запасов  $a$ , варьирующий от 0,25 до 3,0 при условии равенства параметров оруденения для всех интервалов на условную глубину до 600 м.

Методика прогнозной оценки ресурсов полезных ископаемых на

основе дешифрирования космических снимков с использованием информационно-прогнозирующей системы РЕГИОН была применена впервые. С ее помощью определены необходимые и достаточные факторы рудного контроля, дана оценка каждого из них в процессе рудообразования, на стадии региональных исследований выделены перспективные рудные объекты [25].

Исследование выполнено Г. Гаалом (Финляндия) и Р. Синдинг-Ларсеном (Норвегия) для территории Лаппи (Финляндия) с использованием системы НЧАРАН [22, 50]. Весь исследуемый район был подразделен на 732 ячейки размером  $5 \times 5$  км. В качестве исходных геологических материалов использовали сведения о наиболее распространенных в районе горных породах (силикатных и карбонатных), причем их кодирование проводили в процентах наличия этих пород в каждой элементарной ячейке. Геохимические материалы были представлены сведениями по анализам нескольких тысяч образцов с количественными характеристиками содержаний по 17 различным элементам. Для комплексного анализа использовали также карты геохимических аномалий, превышающих стандартное отклонение (наличие в ячейке — "1", отсутствие — "0"). Аналогично обработали материалы аэромагнитных измерений (арифметическое среднее, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения). Таким образом, была сформирована база данных, в которой каждая элементарная ячейка имела полный набор векторов. При этом исходное признаковое пространство было довольно значительным (до 100 факторов).

В процессе исследования осуществили два варианта прогноза: с использованием внутренних и внешних эталонов. В качестве математического аппарата классификации был применен подход, основанный на принципах характеристического анализа (алгоритм КАРА, специально предназначенный для обработки данных при прогнозе). В качестве внутренних эталонов использовали известные в районе медно-ванадиевые месторождения. Модели внешних эталонов — месторождения никеля, приуроченные к основным и ультраосновным толщам (филлиты, граувакки, перидотиты, дуниты) и пространственно тяготеющим к протяженным разломам, — были получены на примере Зеленокаменного пояса Западной Австралии. Главными рудными минералами в них являются пирротин и пентландит.

В процессе классификации каждой переменной присваивался определенный информативный вес. Прогнозирование по внутренним эталонам осуществлялось на основе обучения на известных ячейках-эталонах и последующей классификации остальных ячеек по сумме положительных информативных весов. При использовании внешних эталонов строились специальные модели в виде переменных величин.

В процессе исследования была установлена информативность признаков, в частности, наиболее важными оказались: наличие вулканических

пород; максимальное значение магнитного поля; величина стандартного отклонения магнитного поля; наличие аномалий меди, хрома; наличие ультраметаморфических пород в ячейке более 50 % и др. В итоге было выделено несколько площадей, перспективных для проведения поисковых работ на медное и никелевое оруденение и расположенных в виде полосы северо-западного простирания длиной до 215 км и шириной от 10 до 20 км.

Результаты прогноза оформлены в виде карты вероятностей успеха, при этом величина риска не превышала 20 %. Таким образом, это открыло возможность планирования геологических поисков и постановки работ, в первую очередь на наиболее перспективных участках.

Вместе с тем при этих построениях не была учтена величина эрозийного среза в районе эталонов (внешних) и исследуемой территории, а также не осуществлен обоснованный выбор размера элементарной ячейки классификации. Однако важным методологическим аспектом явилась попытка использования внешних эталонов для прогноза оруденения.

#### КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ЭВМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЛЕЯ

Исследования выполнены в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) в рамках национального проекта ресурсов урана. При этом ставились следующие цели: разработка несложной технологии комплексного анализа геологических данных; определение значимости и корреляции различных типов информации; практическое использование технологии для решения конкретных прогнозных задач [23].

Рассматривалась территория размером 179 × 119 км, расположенная к западу от центральной части плато Колорадо. Вся площадь была разделена на 21 301 элементарную ячейку, каждая размером 1 км<sup>2</sup>. Банк данных, в который вошли данные по всем ячейкам, содержал следующую информацию: геохимические параметры — 25; геофизические — аэромагнитная и аэрогаммаспектрометрическая съемки; космические — снимки "Ландсат-2" (≈ 14 000); геологические — 13 литологических подразделений, включающие 56 типов пород; сведения о рудных месторождениях — 94 залежи урана, 543 залежи рудных полезных ископаемых.

При предварительной обработке геохимических данных рассчитывались региональный фон и его вариации, различные вариограммы как функции объединения аномальных значений при различной удаленности одной аномалии от другой; осуществлялись различные расчеты взаимоотношений элементов. Геофизические измерения обрабатывались по методу крайгинга со скользящим окном; выделялись аномальные значения и т.п.

Измерения со спутника несли предварительную информацию для элементарной ячейки размером  $57 \times 79$  м. На основе этой информации путем интегрирования составлялись обобщенные сведения по площадке в  $1 \text{ км}^2$ , так же как и для всех других измерений. Геологическая информация содержала сведения о геологическом возрасте и литологии.

Комплексная обработка информации осуществлялась в интерактивном режиме — "геолог — ЭВМ". Графические данные приводились к виду, визуально воспринимаемому человеком. Многоцветные изображения с дисплея могли выдаваться в виде многотональных и многоцветных карт. На первом этапе обработки (на черно-белом дисплее) можно было визуально наблюдать региональный фон (распределение) марганца и путем несложных преобразований получить карту аномалий.

На втором этапе обработки с помощью многоцветного дисплея построили диаграммы различных отношений анализируемых параметров. Полученные результаты визуально наблюдали и сравнивали с реальной геологической ситуацией. Компьютерная программа предусматривала съемку карт на кинопленку 35 мм. Использование третьего (графического) дисплея позволило построить различные объемные диаграммы, модели и т.п. (отношения отдельных факторов, их связь с геологией, космическими и географическими данными и т.д.). В результате проведенных исследований получены отчетливые зависимости между различными рудоконтролирующими факторами; выявлены наиболее значимые из них. Это оказалось весьма полезным для познания закономерностей локализации оруденения и выдачи рекомендаций по проведению поисковых работ.

## Глава 8. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РУДНЫХ УЗЛОВ, ПОЛЕЙ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ТИПА

Основная задача применения человеко-машинных методов — исследование возможности выполнения прогнозирования в различных масштабах (от  $1:500\,000$  через  $1:200\,000$  к  $1:50\,000$ ). Составная часть этих работ — выделение геологических критериев рудоконтроля соответствующего масштаба и количественная оценка их информативности. К настоящему времени в пределах исследуемой территории проведены средне- и крупномасштабные геофизические съемки, различные специализированные (петрографические, литолого-фациальные, петрофизические и т.п.) тематические работы и обобщения. Все полученные материалы были использованы С.В. Васильевым, В.Н. Грязновым, А.А. Сапунковым и др. [3, 22, 28 и др.] для формирования территориальных машинных баз геологических данных и последующего анализа.

Район исследований характеризуется разнообразным по составу

и возрасту оруденением. Все рудные формации генетически или парагенетически предположительно связаны с теми или иными магматическими комплексами пород и магматическими циклами.

С докаледонским и раннекаледонским магматизмом, приведшим к образованию линейных гипербазитовых интрузий, связаны проявления хрома, никеля и железа, а также меди и кобальта, минерализация которых имеет подчиненное значение. Позднекаледонский и раннегерцинский магматизм привел к образованию ряда полиметаллических (иногда с молибденом и медью) месторождений и рудопроявлений. Позднегерцинские магматические циклы обусловили формирование в рассматриваемом районе большого числа молибдено-медных месторождений, иногда с вольфрамом и рядом других элементов.

Наиболее широкое развитие в исследуемом районе имеет медно-порфировое оруденение, для которого характерна тесная связь с верхнепалеозойским вулканизмом. Медно-порфировые месторождения проявлены главным образом среди образований вулканоплутонических комплексов, являясь составной частью общего процесса формирования этих комплексов; гидротермальный процесс и рудообразование проходили, по-видимому, в широком диапазоне времени, глубин и температур при весьма сложных взаимоотношениях между собственно вулканическими и плутоническими образованиями. Поэтому месторождения медно-порфировых руд различаются как по глубине формирования, так и по их структурно-морфологическим признакам, характеру гидротермального изменения пород и элементов-примесей.

Некоторые исследователи в основу классификации медно-порфировых месторождений берут фактор глубинности месторождений (положение их в вулканоплутоническом комплексе). По этому признаку выделяются три подтипа медно-порфировых месторождений.

1. Месторождения небольших глубин, локализованные в вулканогенных сериях вулканоплутонических комплексов. Характерно наличие эруптивных брекчий и широкое проявление продуктов кислотной стадии выщелачивания — алунитовых, пиррофилитовых, серицитовых, диаспоровых вторичных кварцитов, кварцевых штокверков. Глубина формирования их, по мнению различных авторов, составляет 600—1000 м.

2. Месторождения глубин сочленения эффузивных и интрузивных серий формируются в апикальных частях и экзоконтакте гипабиссальных интрузивных массивов среднего или кислого состава. Как и для первого подтипа, характерно широкое развитие продуктов кислотного выщелачивания — серицитовых, диаспоровых, андалузитовых вторичных кварцитов, аргиллитов, пропилитов, кварцевых штокверков. Глубина стыковки интрузии, а следовательно, и рудоотложения определяется в 1000—1500 м.

3. Месторождения, локализующиеся в интрузиях. Для них харак-

терно проявление типов метасоматоза, специфичных для тыловых частей метасоматической колонны, — калишпатизация, хлоритизация, эпидоти-зация, актинолитизация, окварцевание, биотитизация. Глубина форми-рования этих месторождений оценивается в 1500—2000 м.

**Прогнозирование рудных узлов.** Всю исследуемую территорию ус-ловно разделили на 18 равновеликих планшетов (квадратной формы). По информации исходных карт геологического содержания сформиро-вали машинную базу геологических данных, минимальной элементарной ячейкой которой была площадка 0,5 × 0,5 см (в масштабе карты). Коли-чественная оценка информативности геологических критериев рудо-контроля осуществлялась путем изучения эталонных выборок рудных объектов (рудных узлов, полей и месторождений медно-порфирового типа) в признаковом пространстве базы геологических данных с помо-щью алгоритма распознавания образов.

Выборка геологических рудных объектов состояла из известных рудных узлов, включающих 28 месторождений и 42 рудопроявления.

Состав информации региональной машинной базы геоло-гических данных. В качестве основы при формировании региональной базы геологических данных была использована геологическая карта мас-штаба 1:500 000.

*Стратиграфо-литологическая группа* объединяет в базе данных 25 различных факторов (на уровне формаций). Они отражают геологи-ческое строение региона, его развитие во времени (основные тектоно-магматические циклы и этапы развития) и пространстве (геологические структуры). Каждый из этих факторов был отнесен к определенному тектоно-магматическому циклу (байкальский, каледонский, герцин-ский) и этапу развития (геосинклинальный, платформенный).

*Байкальский цикл* тектогенеза. Фактор 1 — серии протерозоя. Пред-ставлены кварцево-песчаниковой, кварцито-сланцевой формациями, мра-морами, доломитами.

*Каледонский цикл* — формации ранней стадии геосинклинального развития, факторы 24, 25 — кремнисто-кварцевая формация свит нижне-го и среднего кембрия и яшмо-спилит-диабазовая — нижнего кембрия. Факторы 2—6, 8, 17 представляют собой группу разнообразных по лито-логии формаций, завершающих геосинклинальный этап развития кале-донид в исследуемом районе. Преобладающее значение имеют силурий-ские кремнисто-сланцевые и флишоидные формации.

*Герцинский цикл.* Сюда относятся геологические формации поздней стадии геосинклинального этапа развития (факторы 11—16, 22).

*Группа интрузивных формаций.* Формирование этой группы факто-ров осуществлялось на основе петрографического расчленения по соста-ву разновозрастных комплексов и фаз. Группирование интрузивных формаций по вещественному составу осуществлялось последовательно от щелочных до основных и ультраосновных разновидностей.

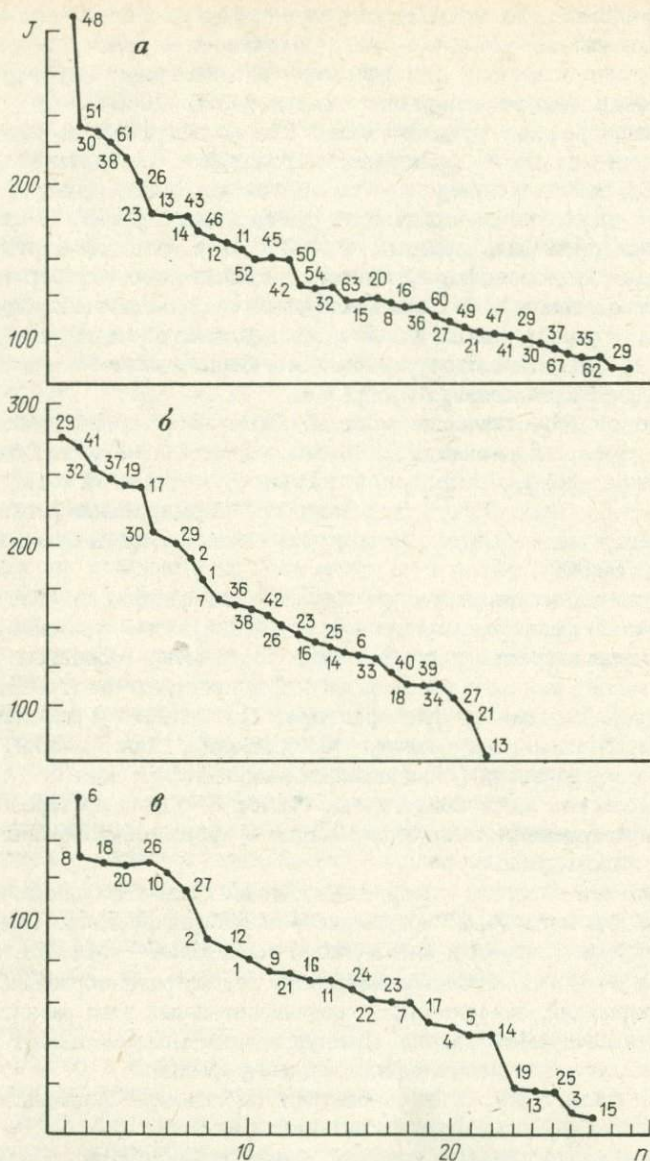


Рис. 18. Информативность факторов рудоконтроля при выделении рудных узлов (а), полей (б) и месторождений (в). По С.В. Васильеву, В.Н. Грязнову, В.В. Марченко и др.

$I$  — информативность (в отн. ед.);  $n$  — число факторов. Номера факторов см. в тексте и табл. 8

Основная масса интрузивных тел в пределах исследуемого региона относится к герцинскому тектоно-магматическому циклу и связана со становлением верхнепалеозойского наложенного вулканического пояса. Это объясняет их площадную приуроченность к крупным структурам, являющимся фрагментами пояса.

Из этой группы в базу геологических данных отдельно введены формации интрузивных комплексов каледонид, кембрия и протерозоя, развитых в двух крупных антиклинориях. Учитывая, что в исследуемом районе в качестве одного из главных поисковых критериев медно-порфирового оруденения многие авторы выделяют так называемые "пестрые" интрузивы, в базу данных были также введены соответствующие им крупные батолиты (факторы 51 и 52), выделяемые по геологическим и геофизическим данным. В качестве самостоятельного выделен также фактор 36, объединяющий малые тела гранит-порфиров и диорит-порфиров, с которыми также многие исследователи пространственно связывают медно-порфировое оруденение.

*Структурно-тектонические факторы* (23, 37—47, 53, 54, 61—63) включают различные разломы, в том числе глубинные, приподнятые блоки и поднятия на фоне верхнепалеозойских структур, оси синклиналей и антиклиналей; довольно детально отражена здесь разрывная тектоника.

Оценка информативности геологических факторов. Информативность геологических факторов для целей мелкомасштабного прогнозирования в количественном выражении определена на основе апостериорного машинного анализа выборки геологических рудных узлов, включающих 70 месторождений и рудопроявлений, с помощью алгоритма распознавания образов "Гиперпласт". На рис. 18, а приведен график распределения геологических признаков по их информативности (масштаб исходных данных 1: 500 000). Ниже приведены факторы региональной базы геологических данных и их номера (см. рис. 18, а):

#### Литолого-стратиграфические факторы

8. Флишоидная формация ( $O_{1-2}$ )
11. Андезит-трахидацит-трахилипаритовая формация ( $P_1$ )
12. Базальт-андезит-трахилипаритовая формация ( $P_2$ )
13. Базальт-трахиандезит-трахидацитовая формация ( $P_1$ )
14. Дацит-липаритовая формация ( $C_3$ )
15. Андезит-липарит-трахидацитовая формация ( $C_2$ )
16. Смешанного состава ( $C_{1-2}$ )
20. Вулканогенно-молассовая формация ( $D_1 - C_1$ )
21. Терригенно-молассовая формация ( $D_3 - C_3$ )

#### Магматические формации

26. Щелочных и аляскитовых гранитов ( $\gamma P_2$ )
27. Граносиенит-диоритовая ( $\gamma P_2, \gamma \epsilon \delta P_2, \delta \epsilon P_1$ )

28. Нормальных гранитов ( $\gamma P_2, \gamma P_1$ )
29. Гранитов каледонского цикла ( $\gamma D_3, \gamma \delta D_3, \gamma S$ )
30. Гранодиоритовая ( $\gamma \delta P_1, \gamma \delta C_1$ )
32. Диоритовая ( $\delta - \gamma \delta P_1$ )
35. Гранитогнейсовая ( $\gamma PR_3$ )
36. Малых штокообразных тел гранит- и диорит-порфиров ( $\gamma \pi, \delta \pi$ )
51. Интрузии "пестрого" состава: граниты, гранодиориты, монцониты, кварцевые диориты, габбро-нориты (выделенные по данным геофизических исследований)
52. То же, выходящие на дневную поверхность

#### Структурно-тектонические факторы

41. Разломы северо-западного направления
42. То же, северо-восточного направления
43. То же, субмеридионального направления
45. Экстенсивность разломов (число разломов в ячейке  $5 \times 5 \text{ км}^2$ ) 5 и более
46. То же, 4
61. То же, 3
47. То же, до 3
62. То же, 0–1
23. Глубинные разломы (на схеме глубинного строения)
63. Глубинные разломы предположительные (под рыхлыми отложениями)
37. Оси синклиналей, выделяемые по данным геофизических исследований
38. Оси антиклиналей, выделяемые по данным геофизических исследований
54. Останцы древних пород, залегающие на интрузиях "пестрого" состава
60. Разломы (предположительно), выделяемые по данным геофизических исследований
67. Интенсивные положительные магнитные аномалии

#### Металлогенические факторы

48. Медные и медно-молибденовые месторождения и рудопроявления
49. Полиметаллические месторождения и рудопроявления
50. Редкометалльные месторождения и рудопроявления

Наиболее информативным оказался прямой признак — проявления медной минерализации (фактор 48, информативность около 340 относительных единиц). В целях изучения информативности косвенных геологических признаков этот фактор в дальнейшем был исключен. Перечень информативных факторов (51, 52, 50, 26, 30, 11, 13, 38) позволил составить информационную модель (поисковый образ) прогнозируемого объекта — рудного узла. В содержательном плане это означает, что необходимым условием локализации оруденения медно-порфирового типа на исследуемом уровне системной иерархии геологических объектов должно быть наличие областей развития батолитов "пестрого" состава (в них наиболее перспективны формации гранодиоритов и щелочных, субщелочных разновидностей) и вулканитов относительно повышенной щелочности раннепермского возраста, выполняющих положительные структуры. Это обязательные, "сквозные" признаки. Дополнение их отдельными подробностями будет уже характеризовать более

конкретные геологические рудные объекты, т.е. следующий системный уровень, более локальные критерии, показывающие условия пространственного положения рудных полей и отдельных месторождений. Таким образом, можно выбрать наиболее информативные факторы для последующего комплексного анализа геологических ситуаций в целях более детального геологического прогнозирования.

Оценка структуры выборки рудных объектов. Все рудные объекты, известные в пределах исследуемого региона (184 месторождения, рудопоявления, точки минерализации, независимо от генетического типа и масштаба оруденения), взятые из кадастра и охарактеризованные признаками региональной базы геологических данных, были подвергнуты процедуре таксономии. При этом ставилась задача классифицировать все известные рудные объекты на отдельные группы, имеющие общие или близкие геологические факторы.

Анализ разделения выборки рудных объектов на отдельные группы (таксоны) позволил выявить некоторую закономерность в их классификации, т.е. определить, по совокупности каких факторов были объединены объекты в единую группу и, наоборот, разделены по разным группам, а также выдержанность отдельных таксонов при различных мерах аналогии.

Общими для всех крупных месторождений данного региона являются факторы: 13, 21, 23, 28, 40, 46, 47, 51, 52, 53, 60, 61, 62. В содержательном плане эти факторы отражают общность их геологического строения, выражающуюся в приуроченности к верхнепалеозойским приподнятым блокам. Для них характерны развитие гранитоидов "пестрого" состава, разрывная тектоника. Разделение ведущих месторождений на различные таксоны осуществлялось по следующим факторам: 8, 12, 15, 20, 23, 26, 27, 30, 32, 37, 38, 41, 42, 43, 50. Как правило, это территориальные ограничения, информативные лишь для отдельных месторождений. "Сквозными" факторами для всех таксонов (т.е. для всех рудных объектов) являются: 28, 39, 41, 40, 46, 47, 51, 52, 53, 54, 61.

Таким образом, с помощью метода таксономии удалось на предварительном этапе выявить перечень "сквозных" и "специфичных" факторов для различных групп медно-порфировых месторождений в пределах исследуемого района.

**Прогнозирование рудных полей.** На территории исследуемого региона сформирована база геологических данных в масштабе 1:200 000, в которую вошли все картографические факторы геологической и геологоструктурных карт для различных периодов развития. Кроме того, в базу данных были введены сведения о распространении дайковых комплексов и кварцевых жил, а также различные аномалии. В качестве объектов обучения (рудных полей) были использованы выборки из 18 известных на данной территории месторождений и рудопоявлений. Дополнительно были сформированы выборки по картам изолиний

экстенсивности и интенсивности оруденения (количества объектов и их запасов). Ниже приведены факторы региональной базы геологических данных по картам масштаба 1:200 000 и их номера (см. рис. 18, б):

1. Трахилипариты, трахидациты ( $P_{2sn}$ )
2. Андезито-базальты, андезиты, трахилипариты, известняки ( $P_{2mt}$ )
3. Трахидациты, трахилипариты, андезиты, игнимбриты ( $P_{1sb}$ )
4. Андезито-дацитовые и дацитовые липаритовые туфы ( $C_3 - P_1$ )
5. Липаритовые туфы, андезито-дациты, трахидациты ( $C_{2-3}$ )
6. Туфы, песчаники, углистые аргиллиты, известняки ( $C_1$ )
7. Туфы, аргиллиты, известняки ( $C_{1v}$ )
8. Туфы, песчаники, алевролиты ( $C_{1t}$ )
9. Вулканиты кислого и среднего состава, песчаники ( $D_3$ )
10. Песчаники, конгломераты вулканиты среднего и основного состава ( $D_{2-3}$ )
12. Вулканиты кислого и основного состава ( $D_{1-2}$ )
13. Песчаники, алевролиты ( $S_{1-2}$ )
14. Метаморфизованные породы древнего основания ( $PR_3$ )
16. Граниты нормального ряда ( $\gamma P_2$ )
17. Сиенито-граносиениты, диоритсиениты, граносиенит-порфиры ( $\epsilon, \gamma\epsilon, \epsilon\delta P_2$ )
18. Гранодиориты, диорито-гранодиориты ( $\gamma\delta P_2, \delta\gamma P_2$ )
19. Плаггиоклазовые граниты, гранодиориты, кварцевые диориты ( $\gamma P_1, \delta P_1$ )
20. Габбро-диориты, габбро, габбро-нориты ( $\nu\delta P_1, \nu P_1$ )
21. Субвулканические тела
22. Гранодиориты ( $\gamma\delta C_1$ )
23. Граниты, гранодиориты ( $\gamma D_3, \gamma - \gamma\delta D_3$ )
24. Гранитогнейсы ( $\gamma PR_3$ )
25. Области концентрации даек основного состава
26. Области концентрации даек различного состава
- 27–30. Разломы: северо-восточные, северо-западные, субширотные, субмеридиональные
31. Комплекс малых интрузий: гранит-порфиры, граносиенит-порфиры ( $\gamma\delta \pi C_1$ )
32. Мощные дайки – трещины отрыва
33. Области гранитизации ( $D$ )
34. Области максимальной мощности гранитов
35. Блоки развития гранитизированных протерозойских пород
37. Области развития вулканоплутонических образований ( $C_1$ )
38. Депрессионно вулканотектонические структуры
39. Купольные вулканоплутонические структуры
40. Древние глубинные разломы
41. Зоны разломов и их пересечения
42. Проявления редких металлов

Примечание. Факторы 33, 34, 38–41 определяются по данным геофизических исследований.

Оценка информативности признаков относительно распределения рудных объектов (см. рис. 18, б) свидетельствует о том, что наиболее значащими являются факторы, полученные по геологоструктурным картам различного временного периода развития района. Что касается материала исходной геологической карты, то к информативным отнесены

лишь 8 из 21 составляющих ее факторов. Важным моментом было то, что факторы интенсивности и экстенсивности оруденения, которые обладали высокой информативностью на предыдущем этапе прогноза (выделение рудных зон в масштабе 1:500 000), в данном случае показали низкую информативность и были исключены из дальнейших исследований. Это обстоятельство подчеркивает необходимость учета системных уровней иерархии геологических рудных объектов с присущими каждому уровню своим информативным комплексом факторов.

Всего было выполнено шесть вариантов прогноза. При этом получены следующие результаты. Вариант прогнозирования по полному набору факторов, в котором основное количество приходится на элементы геологической карты, а выборка была представлена известными в районе геологическими рудными объектами, оказался малоэффективным. Основные рудные поля классифицировались при распознавании на контроле недостаточно устойчиво.

После минимизации исходного пространства геологических признаков существенного улучшения результатов прогнозирования достигнуто не было. Это обстоятельство может быть объяснено тем фактом, что исходная геологическая карта масштаба 1:200 000 содержит недостаточно информации, связанной с описанием закономерностей размещения рудных полей, в то же время она несет много информации другого рода, характеризующей детали геологического строения исследуемой территории. Дополнительное использование информации, содержащейся в комплексах геологоструктурных карт для различных периодов развития района, позволило существенно улучшить результаты прогнозирования. При этом уверенно были выделены известные рудные поля, а также установлены новые перспективные площади, в пределах которых выполнялось в дальнейшем более детальное прогнозирование в масштабе 1:50 000 с целью определения участков, перспективных на выявление рудных месторождений.

**Прогнозирование месторождений (масштаб 1:50 000).** Геологическое прогнозирование на основе разработанных человеко-машинных методов было проведено на площади достаточно хорошо геологически изученного рудного района.

В процессе выполнения исследования были собраны, проанализированы и обработаны с учетом изложенных выше результатов геолого-геофизические материалы по исследуемому району. Общая площадь работ по 16 планшетам масштаба 1:50 000 составила 5400 км<sup>2</sup>.

Состав информации территориальной машинной базы геологических данных. База данных была сформирована в итоге анализа имеющейся информации с учетом выполненных ранее работ по выделению информативных геологических факторов.

В соответствии с критериями рудоносности для крупных месторождений медно-порфирового типа характерна приуроченность к областям развития контрастного по составу магматизма.

Таблица 8. Некоторые статистические характеристики (в отн. ед.) геологических картографических признаков [20]

Номер фактора	Геологические факторы	Для всей исследуемой территории		Для выборки всех рудных объектов		Для месторождений				
		М	Д	М	Д	№ 1 (крупное)	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
						Х	Х	Х	Х	Х
	Литолого-стратиграфические									
1	Туфы, туфопесчаники (С <sub>3</sub> )	-86,4	42,92	-69,8	45,9	-30	-95	-97	-65	-110
2	Порфириты, туфолавы (С <sub>2</sub> )	-66,9	49,85	-51,5	39,9	-23	-79	-84	-82	-58
3	Лавы, туфы, дацитовые липариты (С <sub>1v</sub> )	-52,0	48,64	-24,7	37,8	-33	15	0	-12	-17
4	Песчаники, алевролиты (С <sub>1f</sub> )	-85,7	46,54	-56,0	52,15	0	28	-17	8	-48
5	Песчаники, конгломераты (S)	-69,1	45,44	-52,5	48,1	0	-52	-34	-40	-92
	Магматические									
6	Бiotитовые порфиroidные граниты комплекса А	-75,1	46,59	-49,0	41,9	-101	-15	0	-48	-17
7	Аляскитовые граниты комплекса А	-78,0	43,36	-55,0	42,1	-32	-41	-12	-126	-91
8	Разнозернистые граниты комплекса А	-68,4	44,58	-41,8	39,8	-23	-20	-41	-40	-4
9	Дайки кислого и основного состава комплекса А	-52,5	41,64	-28,0	33,3	-28	0	-4	-4	-32
10	Гранит-порфиры и гранодиорит-порфиры	-86,1	42,16	-69,2	43,7	-41	-48	-67	-126	-29
11	Нерасчлененные дайки комплекса А	-82,9	54,17	-77,7	47,5	-94	-55	-88	-40	-126
12	Бiotит-роговообманковые граниты комплекса Б	-83,9	46,12	-89,8	47,8	-126	-52	-77	-126	-126
13	Нерасчлененные дайки комплекса Б	-86,4	52,42	-60,0	50,1	-87	-28	-17	4	-39

14	Интрузивные тела крупно-среднезернистых лейкократовых биотитовых гранитов	-110,2	32,52	-114,0	26,7	0	-93	-61	-126	-126
	Структурно-тектонические									
15	Разрывные нарушения глубинного заложения	-101,0	38,85	-110,3	29,6	-126	-126	-126	-126	-65
16	Комплексы малых интрузий, выделяемые по локальным геофизическим аномалиям (магниторазведка и гравиразведка)	-96,4	42,53	-32,9	48,4	-28	-126	-126	-126	-109
17	Вулканические аппараты, выделяемые магниторазведкой	-85,4	40,15	-95,0	36,9	-126	-20	-48	-26	-116
	Геохимические									
18	Участки с повышенным содержанием меди, выделяемые по результатам металлотометрической съемки	-63,8	44,66	-52,4	41,7	-57	-36	-34	-27	-25
19	То же, молибдена	-74,4	47,91	-77,8	41,4	-31	-107	-126	-115	-59
20	То же, свинца	-100,7	40,53	-72,4	46,7	-56	-17	0	-25	-62
21	То же, цинка	-112,9	28,08	-86,4	47,6	0	-84	-107	-90	-54
	Метасоматические									
22	Биотит-амфиболовые роговики	-45,4	47,97	-23,8	42,8	12	28	4	-8	13
23	Калишпатизированные и альбитизированные породы	-103,8	39,72	-79,4	57,9	107	-126	-126	-126	-52
24	Биотит-амфиболовые пропилиты	-47,6	44,13	-22,2	31,3	98	0	6	-20	-12
25	Вторичные кварциты	-53,8	47,09	-47,3	40,9	31	-36	-34	-27	-25
26	Прожилково-жильное окварцевание	-102,2	36,54	-84,5	43,7	-4	-52	-45	-48	-120
27	Интенсивно-измененные горные породы (участки с совмещенными стадиями метасоматоза)	-44,1	31,98	-15,0	18,9	4	-36	-4	-4	-32

Примечание. М — математическое ожидание; Д — дисперсия; X — значение признака (для элементарной площадки 0,25 см<sup>2</sup>).

Формирование машинной базы картографической геологической информации проводилось с учетом экспертного опроса геологов-производственников и представителей научно-исследовательского института. В результате проведенного опроса было отобрано 27 основных картографических геологических факторов, контролирующих, по мнению большинства экспертов, медное оруденение в пределах исследуемого района. Перечень факторов приведен в табл. 8.

Выделение площадей, перспективных на медное оруденение. Выделение площадей выполнялось по результатам прогнозирования на основе человеко-машинной технологии с использованием алгоритма "Гиперпласт".

В качестве эталонных объектов обучения первого ("рудного") класса были приняты одно крупное месторождение медно-порфирового типа и четыре мелких месторождения этого же типа. Одно месторождение, не вошедшее в выборку обучения, использовалось для контроля качества распознавания. Ввиду того, что исходное признаковое описание в машинной базе геологических данных дается для каждой элементарной ячейки размером  $0,25 \text{ км}^2$ , общее количество обучающей выборки составило 84 площадки, контрольной — 27. Информативность геологических факторов (номера факторов см. в табл. 8), полученная при распознавании, приведена на рис. 18, в.

Всего на прогнозной карте было выделено  $325 \text{ км}^2$  перспективных площадей, включая эталонные объекты (на прогнозной карте, построенной традиционным способом, общая площадь перспективных участков 1-й и 2-й очереди равна  $460 \text{ км}^2$ ).

На рис. 19 приведена схема сопоставления результатов прогнозирования традиционным способом и на основе человеко-машинных методов. Все перспективные площади, рекомендованные коллективом геологов для постановки поисково-оценочных работ (см. рис. 19, б), выделяются так же уверенно и при прогнозе с помощью человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации геолого-геофизических и геохимических данных (см. рис. 19, в). Однако в последнем случае общая площадь перспективных участков значительно локализована. Анализ геолого-структурного положения выделенных площадей с точки зрения существующих поисковых критериев медного оруденения не исключает возможности наличия промышленного оруденения. В последнее время в пределах одной из этих площадей выявлено новое месторождение.

Представляется интересным проследить изменение апостериорной информационной значимости различных групп факторов, определяющих закономерности пространственного размещения геологических рудных объектов отдельных уровней системной иерархии (табл. 9).

Как следует из табл. 9, определяющее значение для всех рудных объектов рассматриваемого типа имеют магматические факторы. Ана-

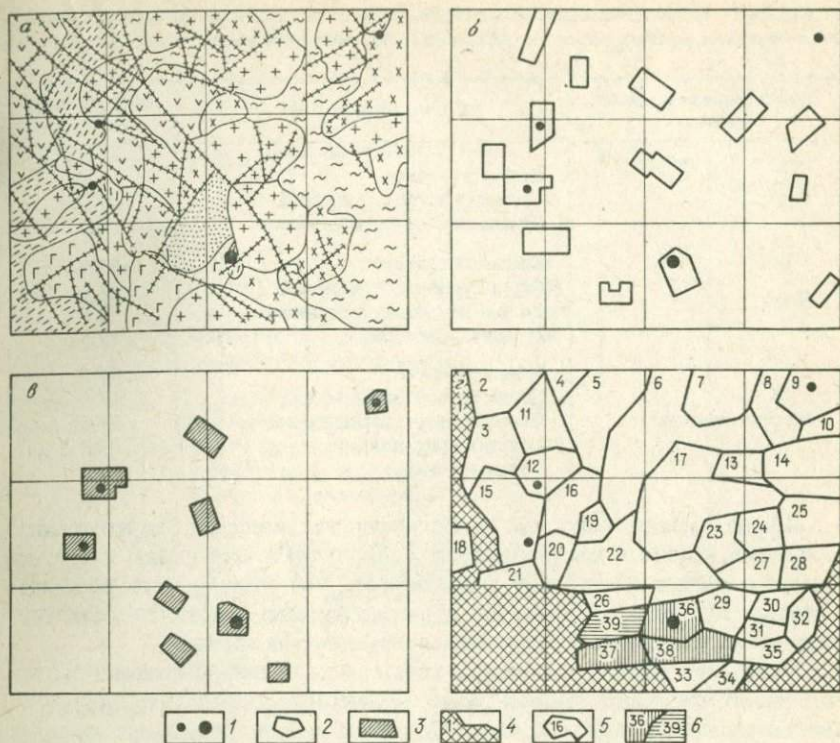


Рис. 19. Примеры результатов геологического прогнозирования:

*a* – схематическая геологическая карта района; *б* – результаты прогноза на основе традиционной методики; *в*, *г* – результаты прогноза с использованием человеко-машинных методов распознавания образа (*в*) и площадного таксономического районирования (*г*): 1 – известные месторождения, средние и крупные; 2, 3 – перспективные площади, выделенные с применением традиционной методики (2) и человеко-машинных методов (3); 4 – площадь "пустого" таксона; 5 – площади таксономического районирования; 6 – площади "уникального" описания (геологические аномалии).

логичное значение (но лишь для рудных узлов и полей) имеет группа структурно-тектонических факторов. Для рудных месторождений рассматриваемого типа в исследуемом районе значение этих факторов резко снижается. Группа литолого-стратиграфических факторов для рудных узлов имеет в общем подчиненное значение, и влияние их существенно снижается для рудных полей и месторождений. Показательно, что для рудных месторождений велика информационная значимость (а следовательно, и поисковое значение) группы метасоматических факторов. По своей величине (21,5 %) она даже выше информационной значимости прямого поискового метода – геохимических ореолов (18 %).

Таблица 9. Изменение информативности групп факторов при прогнозировании геологических рудных объектов различных системных уровней

Геологические рудные объекты	Группы факторов	Информативность, %
Узлы	Магматические	36,1
	Структурно-тектонические	37,4
	Литолого-стратиграфические	26,5
Поля	Магматические	37,5
	Структурно-тектонические	35,6
	Литолого-стратиграфические	14,4
	Металлогенические	12,5
Месторождения	Магматические	34,0
	Структурно-тектонические	12,5
	Литолого-стратиграфические	14,0
	Метасоматические	21,5
	Геохимические	18,0

Можно предположить, что наиболее перспективными, с точки зрения выявления крупных месторождений медно-порфирового типа, является сочетание областей очаговой гранитизации позднедевонского возраста с зонами пестрого магматизма, а также наличие широкого развития участков метасоматических изменений вмещающих пород.

Используя такого рода анализ апостериорной информативности геологических факторов, можно более объективно определять оптимальные комплексы поисковых методов и средств при проведении полевых работ в целях выявления месторождений.

Проведенное исследование свидетельствует также о том, что человеко-машинные методы комплексного анализа геoinформации позволяют полнее использовать имеющуюся фактуру, оперативнее получать прогнозные решения и концентрировать поиски на наиболее перспективных площадях.

Рассматриваемый подход позволил дать количественное сравнение относительной информативности геологических критериев медно-порфирового оруденения исследуемого района с медно-порфировыми месторождениями Кордильер. Сопоставление осуществлено для теоретических критериев оруденения, изложенных в работе [37], и количественной характеристики их относительной информативности (табл. 10). Вместе с тем следует отметить, что некоторые факторы рудоконтроля медно-порфирового оруденения в изучаемом районе, установленные в процессе настоящего исследования и не указанные в теоретических критериях, имеют высокую значимость. К сожалению, отсутствие некоторых данных не позволило провести сопоставительный анализ по всем факторам рудоконтроля.

Для сопоставления в табл. 10 приведены количественные оценки

Таблица 10. Количественная оценка информативности факторов рудоконтроля медно-порфировых месторождений

Группа критериев	Факторы рудоконтроля	Информативность, отн. ед.	
		Кордильеры	Исследуемая территория
Геотектоническая позиция	1. Интрузивно-вулканогенные пояса орогенной стадии развития геосинклинальных систем; реже — зоны тектономагматической активизации — порфировая группа формаций	—	130
Структурное положение и тип фундамента	1. Геоантиклинальные поднятия, краевые части срединных массивов на границе с эвгеосинклиналями; бортовые части эвгеосинклинальных трогов на границе с блоками ранней консолидации	—	74
	2. Структурно-неоднородный фундамент блокового строения. Благоприятные блоки с эвгеосинклинальным типом разреза или сложенные метаморфическими породами фемического профиля	—	126
Региональные разрывные нарушения	1. Крупные глубинные разломы, контролирующие размещение интрузий, вулканических аппаратов, а также опережающие их разломы	159	129
Рудоносные магматические формации: интрузивные и вулканогенные	1. Порфировая группа формаций: андезит-дацитовая	53	64
	андезит-дацит-липаритовая	36	42
	2. Пространственная связь со штоками, дайками, экструзивными телами: гранодиорит-порфиров	15	155
	гранит-порфиров	9	46
	кварцевых порфиров, представляющих апофизы крупных плутонов, некки, силлы, жерловые фации	86	72
Контролирующие оруденение структуры	1. Тесная связь с вулканическими структурами, жерлами вулканических аппаратов, экструзивными образованиями	126	186
Рудовмещающие породы	1. Породы, слагающие порфировые интрузии:		
	гранодиорит-порфиры	15	44
	кварцевые монзонит-порфиры	81	70

Группа критериев	Факторы рудоконтроля	Информативность, отн. ед.	
		Кордильеры	Исследуемая территория
Типы измененных пород: формации и широта распространения (от ранних до поздних)	2. Породы экзоконтактовых зон: кварцевые порфиры	48	75
	липариты	—	40
	андезиты	36	12
	1. Широкие зоны слабых изменений (пропилитизация, биотитизация, хлоритизация)	110	140
	2. Зоны аргиллитизированных пород	132	100
	3. Серицит-кварцевые и кварцевые метасоматиты	—	28
	4. Фации вторичных кварцитов	—	36
	5. Совмещение стадий метасоматоза	—	214

информативности геологических критериев рудоконтроля по 58 медно-порфировым месторождениям Кордильер Северной и Южной Америки. Абсолютные значения информативности определялись на различной методической основе, но даже сопоставительный анализ в относительном виде позволяет сделать определенные геологические выводы о важности отдельных критериев медно-порфирового оруденения на американском континенте и в пределах исследуемой территории.

Районирование территории на основе таксономии. Площадное таксономическое районирование в масштабе 1:50 000 выполнено с целью исследования возможностей человеко-машинной технологии безэталонного районирования. В методическом плане исследование выполнялось на основе машинной классификации с последовательным увеличением "радиуса близости"  $R$ , характеризующего общность сравниваемых точек выборки в принятом пространстве геологических признаков.

Фактической основой для формального машинного анализа была выборка, сформированная из массива признаков территориальной базы геологических данных. В табл. 8 приводятся некоторые математические характеристики ( $M$  и  $D$ ) по каждому признаку территориальной базы геологических данных для всей исследуемой территории, для выборки рудных объектов (месторождений, рудопроявлений, точек минерализации), а также значения признаков  $X$ , характеризующих центральные части известных месторождений (крупного и более мелких).

Из табл. 8 следует, что математическое ожидание  $M$  и дисперсия  $D$

картографических геологических признаков выборки рудных объектов существенно отличаются от аналогичных величин в целом для всей исследуемой территории. Это положение является косвенным подтверждением положения об "исключительности" геологической ситуации в пределах геологических рудных объектов (об их аномальности). Кроме того, по своей геологической ситуации крупное месторождение (практически по всем признакам) существенно отличается от более мелких месторождений.

На рис. 19 изображены результаты площадного районирования, выполненные с использованием человеко-машинной технологии на основе алгоритма таксономии "Транзитив". При минимальной величине радиуса близости  $R_0$  вся исследуемая территория "разбивается" на 39 различных по размерам площадных участков; каждый из них характеризует некую геологическую ситуацию, сходную по признакам базы данных.

Самая крупная по размерам площадь, охватывающая периферийную часть исследуемой территории, образует единый "общий" таксон (№ 1 на рис. 19, з). Эта площадь характеризуется относительно несложной (по сравнению с другими) геологической обстановкой; в ее пределах отсутствуют рудные месторождения.

При последующем увеличении радиуса близости, т.е. уменьшении степени аналогии, в общий таксон 1 (см. рис. 19, з) постепенно входят все площади в пределах исследуемой территории, за исключением участков 36, 37, 38 и 39. При максимальном радиусе близости остаются лишь три таксона: 1 (включающий площади 1–35), 36 (включающий площади 36, 37, 38) и 39.

В результате районирования оказалось, что в пределах исследуемого района четко отмечаются три специфические ("уникальные") площади, которые, по-видимому, являются геологическими аномалиями. Первая из них (36, см. рис. 19, з) охватывает непосредственно рудное поле, включающее крупное месторождение. Вторая представляет собой полосу (площади 37 и 38) близширотного простираения, примыкающую к площади 36. Третья (39) располагается к западу от крупного месторождения на пересечении региональных разломов северо-восточного и северо-западного простираения. Отметим, что эта площадь сохраняет "индивидуальность" даже при значительном увеличении радиуса близости. По-видимому, в пределах этих площадей следует провести более детальное геологическое исследование. Во всяком случае рассмотренный подход позволяет сконцентрировать внимание геологов на наличие в исследуемом районе нестандартных геологических ситуаций.

**Методические исследования.** Использование человеко-машинных методов анализа геологической информации открывает широкие возможности для оперативного построения прогнозных карт на основе теоретических знаний и практического опыта работы специалистов-геологов. Такого рода имитационное моделирование выполнялось на основе алго-

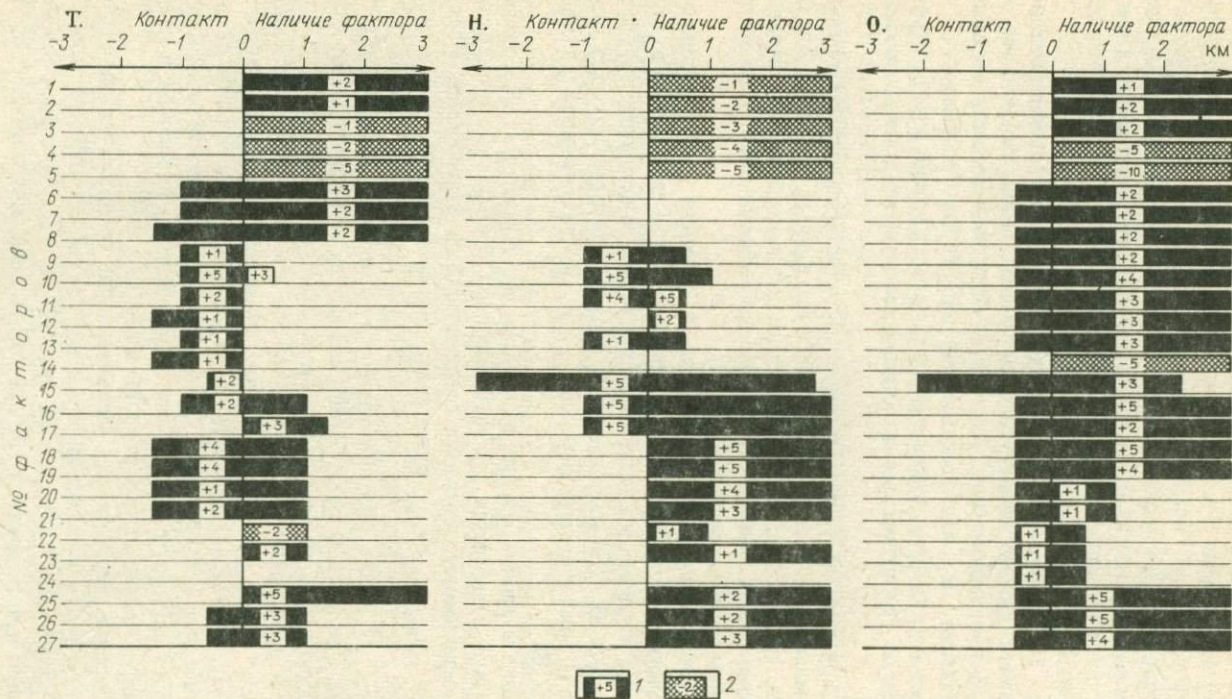


Рис. 20. Эвристические модели факторов, благоприятных для локализации промышленного оруденения в исследуемом районе, построенные геологами Т., Н. и О.

1, 2 – интервалы значений факторов, благоприятные для локализации оруденения (1) и неблагоприятные (2), и их информативные веса. Номера факторов см. в табл. 8.

ритма эвристического моделирования, предложенного В.В. Марченко [20].

Эвристические модели комплексного поисково-оценочного критерия пространственного размещения крупного медно-порфирового месторождения (как области сочетания благоприятных геологических факторов) были составлены тремя геологами (рис. 20). Геолог Т. составил модель, используя лишь свои теоретические представления; второй специалист — Н. — построил модель с учетом опыта десятилетней работы в исследуемом районе; третий — О. работал в исследуемом районе более 20 лет (см. рис. 20). Выбор факторов в рассматриваемом примере был ограничен информацией, имеющейся в территориальной машинной базе данных.

Сравнение этих моделей показывает, что специалисты по-разному оценивают значения отдельных геологических факторов. Так, например, геолог Н. в два раза выше оценивает влияние на рудоконтроль (локализацию оруденения) даек малых интрузий (фактор № 16), чем геолог Т. Геолог О. негативно оценивает наличие интрузивных тел гранитов (фактор № 14). В то же время геологи единодушно дают отрицательную оценку фактору "отложения силура" (№ 5) и положительную — прямому поисковому признаку, наличию вторичных геохимических ореолов меди (№ 18). Таким образом, даже первое сопоставление этих моделей дает возможность более детально, в количественной форме, выяснить представления геологов о роли отдельных рудоконтролирующих факторов.

Прогнозные карты, построенные по рассмотренным эвристическим моделям, приведены на рис. 21.

Анализируя полученные результаты, можно, во-первых, отметить, что все известные в районе медно-порфировые месторождения попадают в выделенные на этих прогнозных картах перспективные площади. Этот факт косвенно подтверждает достаточную представительность исходной информации и правильность определения геологами информационной значимости отдельных факторов рудоконтроля в принятом масштабе исследований. Успешное выделение этих рудных объектов является принципиальным методологическим положением. Это одна из попыток перевода качественных знаний геологов в количественную форму, удобную для геологического прогнозирования с помощью человеко-машинных методов.

Во-вторых, на прогнозных картах выделяются некоторые новые площади, поисковое значение которых должно быть определено после содержательного анализа.

Учитывая, что моделировалась ситуация, благоприятная для размещения крупного месторождения, оценим с этих позиций результаты и качество прогноза по отдельным моделям. На прогнозном карте, построенной по эвристической модели геолога Т., местоположение известного в исследуемом районе крупного месторождения определено лишь одной



Рис. 21. Прогнозные карты, построенные с использованием метода эвристического моделирования:

*a* — по модели геолога Т.; *б* — по модели геолога Н.; *в* — по модели геолога О. 1 — известное крупное месторождение (объект моделирования); 2 — перспективные площади, выделенные на основе эвристического моделирования; 3 — перспективные площади, выделенные коллективом геологов на традиционной основе

элементарной ячейкой ( $S_{T.} = 1$ ). В то же время на этой карте известные в районе средние и мелкие месторождения выделяются гораздо более уверенно и большими размерами площадей. Очевидно, эвристическая модель, построенная этим геологом, более соответствует условиям, характерным для локализации мелких и средних месторождений моделируемого типа. Геолог Н. по своей модели выделил известное крупное месторождение значительно лучше ( $S_{H.} = 8$ ). Однако на его прогнозной карте мелкие и средние месторождения выделяются все же более отчетливо. На прогнозной карте, построенной на основе эвристической модели геолога О., известное крупное месторождение выделяется весьма отчетливо и площадью, охватывающей все рудное поле ( $S_{O.} = 20$ ).

Сопоставление качества указанных эвристических моделей может быть осуществлено, например, по размерам площадей, выделенных в качестве перспективных в районе известного крупного месторождения. В нашем случае это соотношение характеризуется как 0,05:0,40:1,00.

Естественно, при этом следует учитывать, что это была одна из первых попыток практического использования метода эвристического моделирования и геологи еще не обладали необходимыми навыками построения моделей. Однако если использовать изложенный выше пример, можно сделать заключение, что модель геолога О. наиболее адекватно отра-

жает реальную геологическую ситуацию, характерную для размещения крупного месторождения. Таким образом, именно ее целесообразно сохранить в "базе знаний" для последующего использования в практической работе другими специалистами, что позволит, с одной стороны, ускорить приобретение ими опыта прогнозирования таких месторождений, а с другой — будет имитировать участие в их работе высококвалифицированного геолога.

Однако следует учитывать, что процесс перевода качественных представлений (знаний, опыта и интуиции) геологов в количественную форму — весьма сложная проблема. Поэтому, используя метод эвристического моделирования, геолог может постепенно совершенствовать свои представления с помощью человеко-машинных методов, проверяя их на реальных объектах. Особенно благоприятным представляется использование для этих целей современных персональных компьютеров.

Таким образом, человеко-машинный метод построения прогнозных карт на основе алгоритма эвристического моделирования можно рассматривать в качестве дополнительного инструмента оперативной обработки и комплексного анализа информации при геологическом прогнозировании.

## Глава 9. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РУДНЫХ УЗЛОВ И ПОЛЕЙ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В процессе практического внедрения человеко-машинных методов были решены следующие комплексы задач [5, 34, 45 и др.].

В области геологического прогнозирования: выделение перспективных площадей, по размерам соответствующих, во-первых, рудным узлам (масштабы 1: 500 000—1: 200 000), а во-вторых, рудным полям (масштаб 1: 50 000).

В области методических исследований: сравнительный анализ результатов многовариантного прогнозирования рудных узлов редкометалльных месторождений гидротермального генезиса на основании различных геологических моделей; таксономическое районирование территории рудной провинции; многовариантное прогнозирование редкометалльных рудных полей на основе различных моделей строения верхней части земной коры; выделение перспективных и бесперспективных площадей на основе эвристического моделирования; ретроспективный имитационный анализ эффективности использования геолого-геофизической информации.

В ходе проведения работ допускалось предположение, что рудные поля, относимые к одной и той же рудной формации, могут отличаться

запасами в зависимости от истории геологического развития исследуемой территории.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

### ВЫДЕЛЕНИЕ РУДНЫХ УЗЛОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Основу исходной информации составили геологическая карта масштаба 1:200 000, структурно-геологическая карта, а также геологические карты в масштабе 1:200 000. Геофизическая основа — карты гравитационных полей и их трансформаций масштаба 1:200 000—1:50 000.

Решение задач геологического прогнозирования и выполнения методических исследований осуществлялось на основе региональной и территориальной машинных баз геологических данных в масштабах 1:200 000 (для территории 105 тыс. км<sup>2</sup>) и 1:50 000 (для территории 20 тыс. км<sup>2</sup>) соответственно.

Информационная база геологических данных содержала представительные материалы, качество которых было предварительно оценено экспертами. Таким образом, с помощью региональной машинной базы геологических данных масштаба 1:200 000 представлялось возможным охарактеризовать положение любой элементарной площадки размером 4 км<sup>2</sup> в пределах исследуемой территории относительно 36 различных факторов.

Задача геологического прогнозирования в данном случае формулировалась следующим образом: "по имеющейся представительной информации региональной базы геологических данных выявить площади, аналогичные по комплексу признаков известным рудным узлам гидротермальных редкометалльных месторождений". Под рудным узлом в данном случае понимается район, состоящий из нескольких рудных полей (площадь в сотни квадратных километров) с неопределенными четко границами. Это связано с тем, что невозможно заранее строго ограничить площадь проявления региональных геологических факторов, влияющих на формирование рудных узлов и отражающих историю геологического развития. Первичный массив банка данных содержал геологическую карту региона масштаба 1:200 000, а также некоторые геофизические материалы. Для решения задачи был сформирован целевой массив, содержащий характеристики структурно-тектонических, литолого-стратиграфических и магматических факторов — всего 42 (получены в результате объединения различных факторов).

В качестве эталонных объектов I класса при решении задачи были приняты рудные узлы, включающие известные крупные и средние по запасам редкометалльные месторождения. II класс был представлен пло-

щами, в пределах которых, несмотря на достаточную геологическую изученность, были выявлены лишь мелкие месторождения и рудопроявления. Задача решалась с использованием алгоритма распознавания образцов.

На рис. 22, а приведены количественные оценки информативности геологических признаков при выделении рудных узлов гидротермальных редкометалльных месторождений.

Характерна приуроченность рудных узлов к отрицательным гравитационным аномалиям (информативность 220 отн. ед.), обусловленным гранитными массивами небольшой вертикальной мощности (до 5 км). Рудные объекты располагаются, как правило, по периферийной части таких аномалий. Высокая информативность также присуща локальным магнитным аномалиям изометричной формы, приуроченным к небольшим по размерам интрузивным и субвулканическим телам, обычно среднего и основного состава. Приуроченность рудных узлов к зонам глубинных разломов находит свое подтверждение в относительно высокой информационной значимости соответствующих факторов, выделяемых как по геологическим, так и по геофизическим данным. Большое влияние на формирование рудных узлов, по-видимому, оказывала интенсивная интрузивная и вулканическая деятельность, что отразилось в высокой информативности соответствующих комплексов.

Величины относительной информативности различных групп факторов при выделении рудных узлов и рудных полей редкометалльных месторождений гидротермального генезиса в исследуемом районе приведены в табл. 11.

Как следует из табл. 11, при поисках рудных узлов роль геологических и геофизических методов примерно одинакова (42,8 и 57,2 % соответственно). При поисках же рудных полей преобладающее значение имеют геологические методы (78 %). При этом оруденение контролируется литолого-стратиграфическими и магматическими факторами (информационная значимость 49,5 и 24,0 % соответственно).

Ввиду того что по принятому при решении данной задачи определению минимальная величина площади рудных узлов составляет первые сотни квадратных километров, к перспективным относились площади, выделенные в результате классификации исследуемой территории и включающие не менее 25 сближенных элементарных площадок ( $4 \times 25 = 100 \text{ км}^2$ ).

В результате выполненных исследований составили прогнозную карту, при этом было выявлено 19 участков общей площадью 11,5 тыс. км<sup>2</sup>. Надежность выделения перспективных площадей, определенная по результатам экзамена контрольной выборки, составила 85 %. Экспертной оценкой специалистов подтверждена геологическая перспективность выделенных площадей.

Все участки расположены в пределах территорий, подлежащих проведению поисково-картировочных работ. Вместе с тем общие размеры

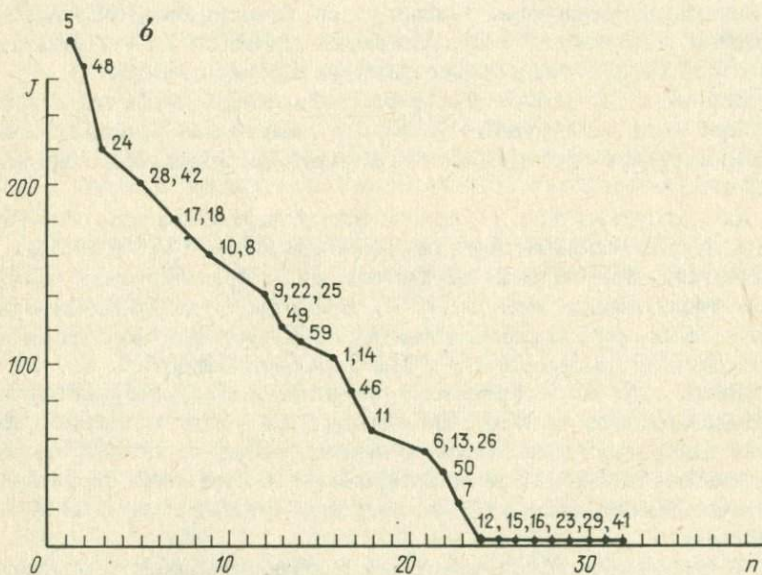
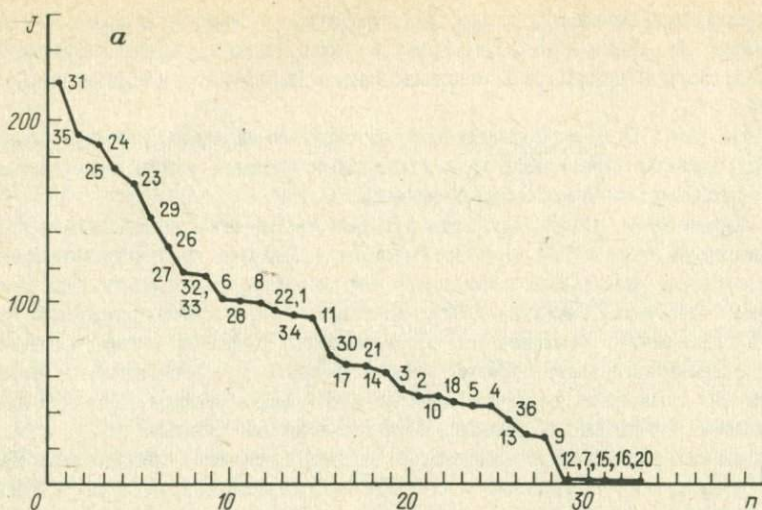


Рис. 22. Относительная информативность геологических факторов при выделении рудных узлов (а) и рудных полей (б) гидротермальных месторождений

Таблица 11. Относительная информативность групп факторов рудных узлов и рудных полей редкометалльных месторождений гидротермального генезиса в исследуемом районе

Группы факторов	Информативность (в %) при выделении	
	рудных узлов	рудных полей
Магматические	21,2	24,0
Структурно-тектонические	5,6	4,5
Литолого-стратиграфические	16,0	49,5
Итого геологические	42,8	78,0
Гравиразведка	37,2	13,1
Магниторазведка	20,0	8,9
Итого геофизические	57,2	22,0
Всего	100,0	100,0

перспективных участков не превышают 40 % подлежащих картированию площадей. Это обстоятельство позволило сконцентрировать поисково-картировочные работы в первую очередь в наиболее перспективных районах (рис. 23).

После составления прогнозной карты в пределах исследуемой территории поисковыми работами были открыты новые рудные объекты, расположенные в пределах контуров перспективных площадей.

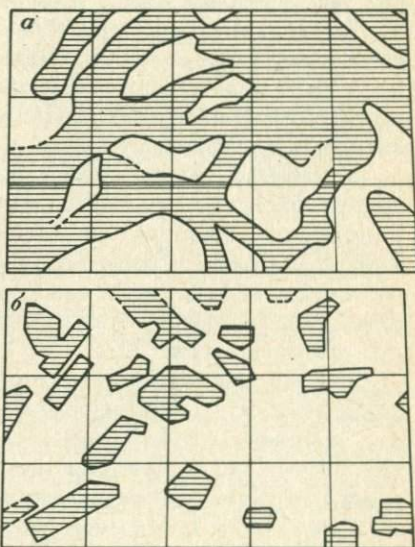


Рис. 23. Сопоставление результатов прогнозирования по традиционной методике (а) и человеко-машинным методам (б) при выделении рудных узлов. Заштрихованы перспективные площади

## ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКОВ, ПО РАЗМЕРАМ СООТВЕТСТВУЮЩИМ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫМ РУДНЫМ ПОЛЯМ

Геологическое прогнозирование было выполнено на основе человеко-машинных методов по площади 20 тыс. км<sup>2</sup> в масштабе 1:50 000 в пределах некоторых участков, выделенных в качестве перспективных на предыдущем этапе прогнозирования (в масштабе 1:200 000). Задача формулировалась следующим образом: "выделить площади, аналогичные по комплексу признаков известным рудным полям редких металлов, для постановки поисково-съёмочных работ".

Исходной информацией для решения прогнозной задачи явились материалы, полученные в результате анализа имеющихся геологических и геофизических данных, выполненного по традиционной схеме: определение природы геофизических аномалий, проведение количественных расчетов, классификация аномалий, построение схем интерпретации и разрезов. Конечные результаты интерпретации вместе с геологической картой района были использованы для формирования первичного массива территориального машинного банка геологических данных в масштабе 1:50 000. Схема геологической интерпретации глубинного строения исследуемого района содержала характеристику магматических образований, некоторые особенности метаморфических пород фундамента и основные элементы тектонического строения.

Интерпретация данных разрывной тектоники была выполнена на основе гравиматричных данных и дешифрирования высотных аэроснимков. Использование этих материалов обусловлено также и тем, что они сопоставляются с тектоническими схемами смежных районов.

Первичный массив территориальной машинной базы геологических данных масштаба 1:50 000 содержал сведения о расположении в пределах исследуемой территории 50 различных геологических и геофизических факторов, оказывающих (по мнению экспертов) наибольшее влияние на локализацию оруденения.

В качестве эталонных объектов были приняты рудные поля, включающие известные месторождения и рудопроявления, расположенные в пределах одной структурно-металлогенетической рудной зоны исследуемой территории и относящиеся к одной рудной формации (березитов).

Оценка информативности факторов, выполненная на основе алгоритма распознавания образов "Гиперпласт" при выделении рудных полей, приведена на рис. 22, б.

Можно отметить, что если позиция рудных узлов контролировалась главным образом особенностями глубинного строения по геофизическим методам (структурные и магматические факторы), то локализация рудных полей определяется в основном стратиграфо-литологическими и интрузивными геологическими факторами.

В результате прогнозирования были выделены участки, перспектив-

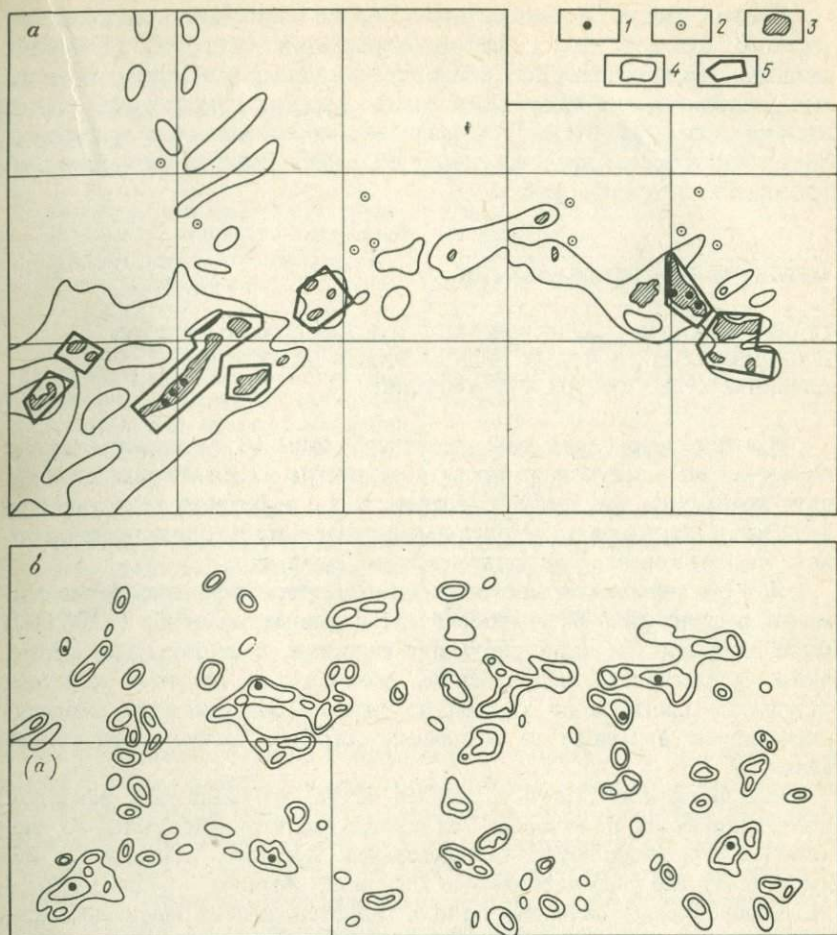


Рис. 24. Результаты геологического прогнозирования:

*a* – рудных полей (геологическая основа по рис. 7; масштаб исходных данных 1:50 000); *б* – рудных узлов (масштаб исходных данных 1:200 000; вариант 1.1); 1, 2 – эталонные объекты обучения (1 – рудные, 2 – безрудные); 3 – наиболее перспективные площади; 4 – общие контуры перспективных площадей; 5 – генерализация контуров перспективных площадей, выполненная геологами

ные для проведения поисковых работ (около 5% от всех территорий). Все участки расположены в обстановке, по мнению экспертов, перспективной для локализации оруденения. Вместе с тем общая площадь таких участков существенно меньше площадей, выделенных с использованием традиционной методики, что позволяет осуществить концентрацию поисково-оценочных работ (рис. 24, *a*).

Таким образом, использование человеко-машинных методов комплексного анализа геологической информации позволило выделить площади, перспективные для обнаружения рудных узлов редкометалльных месторождений гидротермального генезиса. Экспертный анализ позиций новых площадей устанавливает их соответствие существующим геологическим представлениям об особенностях локализации оруденения в исследуемом районе.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МНГОВАРИАНТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НОВЫХ РУДНЫХ УЗЛОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Наличие территориальной машинной базы геологических данных позволяет оперативно формировать различные целевые массивы, изменять комплексы факторов в соответствии с выбранной геологической моделью и использовать человеко-машинные методы для сопоставительного анализа конечных результатов прогнозирования.

Для решения задачи многовариантного прогнозирования (по информации региональной базы геологических данных масштаба 1:200 000) были выбраны три конкурирующие гипотезы, в соответствии с которыми осуществлено исследование, позволившее получить конечные результаты прогноза по каждой из гипотез. Эти гипотезы (модели) акцентируют внимание на различных сторонах процесса рудообразования.

Выбор модели был осуществлен исходя из различных факторов, контролирующих размещение месторождений и рудных полей по мнению тех или иных групп исследователей. При этом допускалось следующее: 1) все рассматриваемые эталонные объекты — рудные узлы — включают рудные поля эндогенных гидротермальных месторождений, минеральные ассоциации которых сформировались примерно в одно время; 2) для эталонных объектов — рудных узлов — четко проявлены два типа низкотемпературных гидротермальных изменений: березиты и натровые метасоматиты; 3) имеющиеся поисковые критерии, являющиеся основой для построения прогнозных карт, в значительной мере отражают мнения отдельных групп исследователей на генезис месторождений.

Применительно к рассматриваемому региону имелись три основные точки зрения на формирование рудных месторождений. Первая из них предполагает связь формирования месторождений со всем ходом геологической истории того или иного участка земной коры. Допускается мобилизация рудного вещества из вмещающих пород. Вторая предполагает доминирующую роль факторов структурного контроля оруде-

Таблица 12. Методическая схема многовариантного прогнозирования рудных узлов на основе различных геологических моделей

Целевые массивы (исходные признаковые модели)	Выборки обучения по эталонным объектам, связанным с формациями	Варианты прогноза
1. Факторы, отражающие связь оруденения со стратиграфией, тектоникой, магматизмом, метаморфизмом и гранитообразованием	Березитов и натровых метасоматитов	1.1
	Натровых метасоматитов	1.2
	Березитов	1.3
2. Факторы, отражающие связь оруденения преимущественно с тектоническими разломами и вулканогенно-плутоническими формациями, близкими по возрасту к оруденению	Березитов и натровых метасоматитов	2.1
	Натровых метасоматитов	2.2
	Березитов	2.3
3. Факторы, отражающие связь оруденения преимущественно с формированием и развитием гранитоидных массивов	Березитов и натровых метасоматитов	3.1
	Натровых метасоматитов	3.2
	Березитов	3.3

нения и подчиненное значение литологических факторов. При этом отрицается роль вмещающих пород как возможного источника оруденения.

Наконец, существует точка зрения о связи оруденения с формированием гранито-гнейсовых куполов. Не останавливаясь подробно на рассмотрении каждой из гипотез (моделей), можно отметить, что все они построены на соответствующем фактическом материале, исходя из опыта работ, и направлены на решение прогнозных задач.

Таким образом, исследование представлялось как работа, направленная на решение прогнозных задач в рамках конкурирующих геологических моделей. Решение этих задач было осуществлено на основе составления многовариантных прогнозных карт и выбора лучшего варианта согласно заданным критериям (количество и соотношение ошибок I и II рода, размеры выделенных площадей, соответствие их существующим геологическим представлениям и т.д.).

Ниже приводятся данные о реализации различных вариантов моделей (табл. 12).

Первая модель предполагает связь формирования месторождений с осадконакоплением, тектоникой, интрузивным и субвулканическим вулканизмом, метаморфизмом и общей металлогенией. В целом данная

модель в наибольшей степени соответствует представлениям Ю.А. Билибина, считавшего, что процессы минерализации, ведущие к возникновению минеральных, в частности рудных месторождений, представляет собой одну из многочисленных сторон единого и сложного процесса геологического развития земной коры. Данная модель предполагает вовлечение большого числа геологических характеристик, часть из которых, очевидно, не имеет прямого отношения к проблеме рудообразования. Поэтому для сокращения исходного пространства факторов строились одномерные распределения и дальнейшему анализу подвергались лишь такие факторы, которые являются "делящими" для эталонных объектов I и II классов. Такие одномерные распределения использовались для выявления статистических закономерностей пространственного положения рудных полей редкометалльных месторождений относительно тех или иных образований, являющихся в отдельных случаях поисковыми критериями. По этой модели построен целевой массив № 1 (по 36 факторам) и рассчитаны прогнозные варианты 1.1, 1.2, 1.3 (см. табл. 12).

Вторая модель предполагала связь оруденения со становлением и развитием зон долгоживущих глубинных разломов. Принципиальными отличиями этой модели от предыдущей является четкое выделение структурных факторов контроля, связь с глубинными источниками рудного вещества и, как следствие, пространственная приуроченность месторождений к вулканоплутоническим комплексам, сформированным в завершающую стадию развития, малыми интрузиями и дайками основного и среднего состава. Древние (доорогенные осадочные, вулканогенно-осадочные и интрузивные формации), за отдельными исключениями, этими исследователями рассматриваются с позиций структурного контроля ("жесткие" и "пластичные" блоки и т.п.). По данной модели был сформирован целевой массив № 2 базы данных и рассчитаны варианты 2.1, 2.2 и 2.3.

Третья модель устанавливает прямую зависимость между формированием и развитием гранитоидных массивов и оруденением. В этой постановке определяющими являются факторы метаморфизма и ультраметаморфизма и связанные с ними процессы миграции и локализации рудного вещества под воздействием тепловых потоков, идущих как из мантии, так и из гранитного слоя коры в ходе палингенного гранитообразования. В соответствии с данной моделью был сформирован целевой массив № 3 базы данных и реализованы варианты 3.1, 3.2 и 3.3.

Выбор и группирование факторов для решения задач прогнозирования осуществлялось в соответствии с заданной моделью. Так, для модели 2 основное внимание уделялось расчленению вулканоплутонических формаций орогенного периода развития и, наоборот, сведения по формациям доорогенного периода представлялись в обобщенном виде. В то же время для купольной модели принципиальной представлялась

схема расчленения докембрия и гранитоидов, развитых в полях развития докембрийских образований. В соответствии с геологическими идеями также подбирались и факторы, отражающие элементы глубинного строения.

Обучение распознаванию эталонных выборок и последующее построение прогнозных карт на основе классификации элементарных площадок (4 км<sup>2</sup>) исследуемой территории (105 тыс. км<sup>2</sup>) было осуществлено с помощью алгоритма распознавания образов "Гиперпласт". Полученные при обучении распознаванию количественные оценки информативности геологических факторов позволяют получить сведения о роли отдельных факторов с точки зрения принятых гипотез.

Детальный анализ информационной значимости факторов и выделение на этой основе критериев оруденения в пределах рудных узлов представляет собой предмет самостоятельного исследования и выходит за рамки настоящей работы, в которой показаны лишь возможности человеко-машинных методов геологического прогнозирования. Заметим лишь, что для первой модели наиболее важной оказалась пространственная связь со структурно-магматическими узлами, зонами глубинных разломов, вулканоплутоническими очагами, древними метаморфическими и магматическими образованиями докембрийского фундамента, с углисто-кремнисто-сланцевыми отложениями кембрия, с породами вулканогенно-осадочной толщи девона орогенной стадии развития и др.

Для второй модели наиболее важными оказались пространственные связи с интрузиями различных комплексов, с глубинными разломами, выделяемыми по геологическим и геофизическим данным, с гравитационными аномалиями, характеризующими особенности глубинного строения, и другими факторами.

Третья модель определяет в качестве наиболее информативных области развития фундамента с различной степенью ультраметаморфизма и гранитообразования, факторы, характеризующие области прогибов и поднятий нижнепалеозойского фундамента, интрузивные образования верхнего ордовика — нижнего силура (габбро, диориты, кварцевые диориты, гранодиориты, плагιοграниты, граносиениты), интрузивные образования нижнего кембрия (габбро-нориты, анортозиты, серпентиниты, перидотиты и др.), положительные гравитационные аномалии, характеризующие крупные структурно-магматические узлы, и др.

Сравнительный анализ результатов прогнозирования по трем моделям показал, что только одна из них удовлетворительно отвечает геологическим представлениям по всей территории и дает хорошие результаты по контрольным объектам, не имея ошибок I рода (пропуска рудных узлов), — это вариант 1.1 (см. рис. 24, б). В пределах площади, ограниченной контуром (левый нижний угол), был проведен более детальный прогноз, результаты которого приведены на рис. 24, а.

Таблица 13. Оценка вариантов прогнозных карт по различным геологическим моделям

Варианты прогноза	Число ошибок на контрольной выборке		Суммарные размеры перспективных площадей (% от общей территории)	Особенности пространственного размещения перспективных участков	Соответствие принятой гипотезе
	I рода	II рода			
1.1	—	7	24,0	Равномерное	На всей территории региона в целом соответствует
1.2	2	8	16,5	Преобладание в северной части территории	На всей территории региона соответствует (за исключением юго-западной части)
1.3	4 (2)	11	20,0 (60,0)	— " —	Не соответствует
2.1	1	5	13,4	Преобладание в восточной и северной частях территории	На всей территории региона в целом соответствует
2.2	1	10	12,6		Частично соответствует
2.3	4 (2)	11	15,0 (75,0)		Не соответствует
3.1	1	6	9,6	Преобладание в западной и центральных частях территории	Соответствует частично на отдельных площадях региона (центральная часть)
3.2	1	10	23,2		Не соответствует
3.3	4 (3)	11	26,0 (58,0)	Преобладание в восточной части	"

Примечание. В скобках даны значения параметров при снижении порога распознавания в 2 раза.

Оценка вариантов прогнозных карт масштаба 1:200 000, построенных на основе различных моделей, приведена в табл. 13. По-видимому, одним из главных критериев оценки качества прогноза следует считать соответствие результатов практической геологической ситуации. Этому положению наиболее отвечает наличие ошибок I рода, т.е. отсутствие пропуска известных эталонов прогнозируемых объектов ("пропуска цели").

Содержательный анализ ошибок I рода с позиций использованных геологических моделей дает возможность сделать вывод о том, что определенные идеи, развиваемые в работах различных исследователей, дают хорошие результаты при решении прогнозных задач только в конкретных ситуациях. Так, например, хорошие результаты для западной и центральной частей региона показывает "купольная" гипотеза (варианты 3.1, 3.2). В то же время она неприемлема для северо-восточной и южной частей рассматриваемого региона. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении гипотезы связи месторождений с линейными зонами разломов (вариант 2.2 и др.).

Чтобы уменьшить число ошибок I рода, можно снизить порог классификации (меры аналогии), но при этом увеличивается число ошибок II рода ("ложных целей"). Так, например, снижение вдвое порога классификации (распознавания) в вариантах 1.3, 2.3 и 3.3 приводит к резкому увеличению перспективных площадей, так что прогноз вообще теряет смысл.

Таким образом, в результате анализа различных вариантов прогнозирования установлено, что в целом для рассматриваемого региона может быть принята только одна гипотеза, предполагающая связь формирования месторождений со всеми процессами геологического развития земной коры (модель 1). Все другие гипотезы, в которых резко превалирует роль какого-либо одного из многих процессов геологического развития, приемлемы для решения прогнозных задач только в пределах отдельных частей региона. По-видимому, отдельные геологические факторы, используемые при построении моделей 2 и 3, соответствуют выделению геологических рудных объектов других уровней системной иерархии.

В заключение представляется возможным отметить, что применение человеко-машинных методов геологического прогнозирования позволило без дополнительной подготовки исходной информации оперативно получить окончательные результаты прогнозирования на основе различных геологических гипотез, оценить информативность геологических факторов, произвести экспертную оценку этих результатов, установить область соответствия отдельных гипотез реальной геологической обстановке и выбрать модель, которая может быть принята за основу при проведении поисково-съемочных работ в целом по рассматриваемому региону.

Вместе с тем это не исключает применения и других геологических моделей для отдельных частей региона. Следует подчеркнуть, что процедура анализа результатов прогнозирования и выбор критериев оценки вариантов с применением человеко-машинных методов приобретает решающее значение.

#### ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РУДНОЙ ПРОВИНЦИИ

Районирование исследуемой территории рудной провинции выполнено на основе алгоритма "Транзитив". Алгоритм разбивает исходные векторы (описания элементарных площадок геологической или другой карты) на группы (таксоны), обладающие сходными свойствами в пределах "радиуса близости"  $R$  (некоторой обобщенной характеристики меры аналогии). Численные значения  $R$  между двумя классифицируемыми объектами вычисляются по формуле:

$$R = (x_1 - y_1)^2/D_1 + (x_2 - y_2)^2/D_2 + \dots + (x_n - y_n)^2/D_n,$$

где  $x, y$  — значения признаков первого и второго объектов;  $D$  — дисперсия значений соответствующих признаков.

В методическом плане исследование выполнено в трех модификациях: таксономическое площадное районирование; поиск аналога априори заданного объекта ("особой точки"); геологическая "типизация" новых перспективных площадей, выделенных ранее на основе применения алгоритма распознавания образов с обучением. Исследования выполнены по информации региональной машинной базы геологических данных в масштабе 1 : 200 000.

Машинная база данных характеризовала положение любой элементарной площадки (4 км<sup>2</sup>) территории общей площадью 105 тыс. км<sup>2</sup> относительно следующих 42 факторов.

Формации догеосинклинального развития — 5 факторов (метаморфические и магматические образования докембрийского фундамента, углисто-кремнистая, углисто-глинистая, зеленосланцевая, песчаниковая).

Формации геосинклинального этапа развития района — 7 факторов (кремнисто-диабазо-спилитовая, углисто-кремнисто-сланцевая, вулканогенно-осадочная морская, кремнисто-терригенная марганценовая, вулканогенно-осадочная, флишoidная, терригенно-морская и пестроцветная прибрежно-морская).

Формации орогенного периода развития — 2 фактора (пестроцветная и андезитовая).

Формации посторогенного периода развития — 6 факторов (вулканогенно-осадочная, молассовая, осадочные и терригенные).

Магматические образования представлены 8 факторами: интрузивные образования нижнего кембрия (габбро, нориты, анортозиты, серпен-

тиниты, перидотиты), верхнего кембрия (габбро, пироксениты, реже граниты), верхнего ордовика – нижнего силура (габбро-диориты, кварцевые диориты, тоналиты, гранодиориты, граносиениты), силура (сиенит-диориты, диориты, кварцевые диориты, диорит-порфиры, сиениты), верхнего силура – нижнего девона (биотитовые и амфиболитовые граниты), девона (лейкократовые и аляскитовые граниты, гранит-порфиры, граносиениты).

Структурно-тектонические факторы представлены главным образом геофизическими данными 14 факторов (зоны разломов, значение аномалий полного модуля горизонтального градиента силы тяжести, наличие остаточных аномалий силы тяжести, наличие аномалий типа гравитационной ступени, наличие локальных аномалий силы тяжести и магнитного поля различной формы и т.п.). Все геофизические факторы имели геологическую интерпретацию.

Таксономическое площадное районирование представляет собой комплекс человеко-машинных процедур, направленных на разбиение исследуемой территории на некоторые площади, сходные между собой в пространстве исходных геологических и геофизических признаков. Районирование проведено в целях иллюстрации возможностей предлагаемого подхода, однако при этом были получены некоторые практические результаты.

Методически процедура районирования состояла в том, что по информации геологической базы данных с помощью алгоритма "Транзитив" выполнялась последовательная классификация территории при различных радиусах "меры близости":  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . В качестве критерия оптимальности был использован эвристический подход: радиус "меры близости" (аналогии) выбирался методом последовательных приближений так, чтобы в "бесперспективную" площадь (таксон) не вошло бы ни одно из известных рудных полей и крупных месторождений. Так, например, если при  $R_n$  какое-либо известное рудное поле или крупное месторождение входило в "общий" таксон, то в качестве "оптимальной" меры близости выбиралось значение  $R_{n-1} < R_n$ , при котором известный рудный объект не входил в состав "общего" таксона. Такая оптимизация осуществлялась в интерактивном режиме, т.е. после каждого увеличения и последующей классификации специалист-геолог анализировал полученный промежуточный результат и давал заключение о проведении дальнейшей классификации. На рис. 25 приведен оптимальный вариант районирования. На нем показаны рудные поля редкометалльных месторождений гидротермального генезиса.

Как следует из схематической карты, один "общий" таксон (заштрихованные площади) объединяет более 70% всей территории исследуемой рудной провинции. С общегеологических позиций этот таксон характеризует области сочленения кристаллического поднятия с площадями развития молодых платформенных образований. В центральной

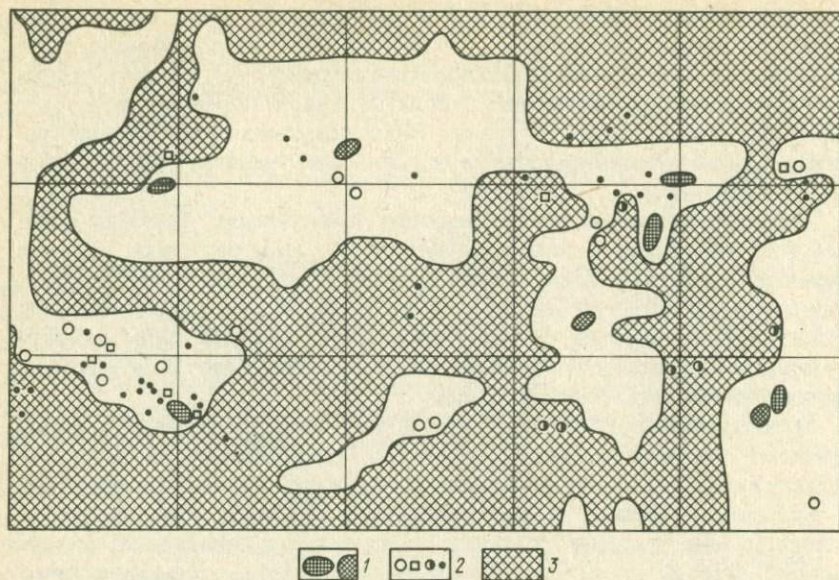


Рис. 25. Карта результатов площадного таксономического районирования (масштаб исходных данных 1:200 000).

1 — рудные поля; 2 — месторождения, рудопроявления, точки минерализации; 3 — граница области распространения общего ("пустого") таксона

части площади, входящие в состав "общего" таксона, имеют, как правило, относительно несложное геологическое строение (области развития интрузивных образований двух-трех комплексов). Сопоставление результатов районирования с картой рудоносности показало, что ни одно из промышленных рудных полей редкометалльных месторождений не расположено на площади "общего" таксона. В его пределах находится лишь 24 % от всего количества мелких и средних месторождений и 36 % точек минерализаций и аномалий.

Таким образом, этот таксон характеризует площади, существенно отличающиеся в принятом пространстве исходных геологических и геофизических признаков от площадей, в пределах которых располагаются крупные рудные поля гидротермальных эндогенных месторождений; условно можно назвать этот таксон "пустым". Наоборот, площади, не входящие в "пустой" таксон, имеют сложное геологическое строение, во многом сходное с ситуацией вблизи известных рудных полей и промышленных месторождений. Очевидно, поиски новых крупных рудных полей гидротермальных месторождений следует ориентировать в первую очередь на изучение площадей, расположенных в пределах этого "рудного" таксона.

Отметим, что это исследование было проведено как по редкой (каждая четвертая элементарная ячейка), так и по густой сети (по всем ячейкам). При этом прослеживается "наследственность" в проявлении "пустого" и "рудного" таксонов, последний, однако, разделяется на ряд дополнительных подгрупп.

Выполненное исследование свидетельствует о принципиальной возможности использования человеко-машинных методов для площадного таксономического районирования как дополнительного средства анализа геологической картографической информации при составлении прогнозных заключений.

### Поиск аналога априори заданного объекта (особой точки)

Основная цель состояла в определении в пределах исследуемой территории площадей, аналогичных в исходном пространстве признаков (с некоторой "мерой близости", так как полных аналогов в природе не существует) какому-либо конкретному априори заданному геологическому объекту — "особой точке" (элементарной площадке).

Исследования проведены в масштабе 1:200 000 для территории 105 тыс. км<sup>2</sup> по информации машинного банка геологических данных по 42 геологическим и геофизическим факторам. Методически исследование выполняли в следующей последовательности. Специалист — геолог-интерпретатор выбирал некоторую элементарную площадку (особую точку), затем на основе таксономии проводил поиск аналогов этой точки (распознавание образа "без поощрения") по признаковому описанию банка данных при начальной "мере близости"  $R_0$ . В случае отсутствия новых точек-аналогов операцию повторяли при  $R_1 > R_0$  и т.д.

На рис. 26 представлены результаты поиска аналогов изложенным способом для трех объектов: рудных полей редкометалльных месторождений гидротермального генезиса (особые точки 1 и 2) и рудных полей эндогенных месторождений (особая точка 3). Результаты машинной классификации при  $R_0$  (т.е. поиск аналога, полностью совпадающего по значениям всех признаков с каждым из указанных месторождений в отдельности) показали, что в пределах исследуемой территории такие точки отсутствуют. При увеличении "меры близости" до  $R_1 > R_0$ , т.е. при внесении некоторого допущения в исходных признаках или "уменьшении подобия"\* также не удалось выявить новых площадей. Однако в непосредственной близости от самой особой точки появилась некоторая область (см. рис. 26). При последующем увеличении "меры близости"

---

\* Например, если по одному фактору "положение относительно глубинного разлома" особая точка имела значение 1 км, то допускалось варьирование  $\pm 1,2$  км и т.п. (по всем другим факторам аналогично).

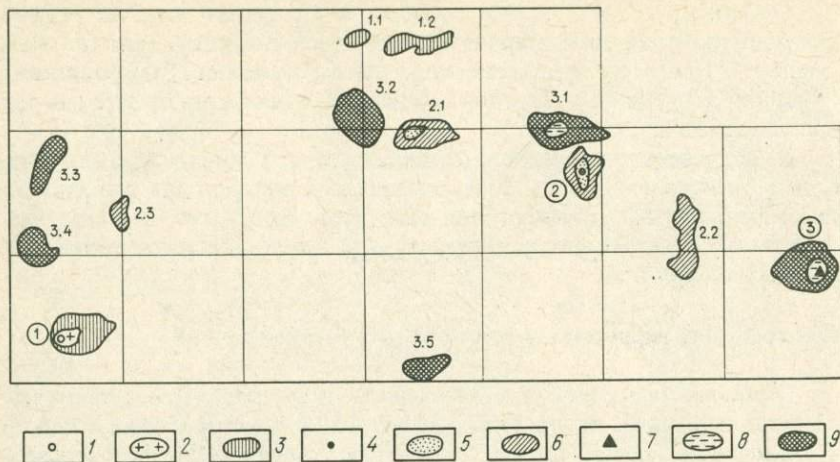


Рис. 26. Схема результатов поиска аналога априори заданного объекта (элементарной площадки геологической карты – особой точки):

1 – рудное поле (особая точка 1); 2 – области, аналогичные особой точке 1 при "мере близости"  $R = 2$ ; 3 – то же, при  $R = 3$ ; 4 – рудное поле 2 (особая точка 2); 5 – области, аналогичные особой точке 2 при  $R = 2$ ; 6 – то же, при  $R = 3$ ; 7 – рудное поле 3 (особая точка 3); 8 – области, аналогичные особой точке 3 при  $R = 2$ ; 9 – то же, при  $R = 3$ . Цифрами на схеме даны номера участков

$R_2 > R_1$  область "подобия", окружающая особую точку, увеличивалась. Вместе с тем в северной части исследуемой территории появились две новые площадки: 1.1 и 1.2. Очевидно, правомерно ставить вопрос об аналогии новых площадей не с особой точкой, а лишь с ее площадной характеристикой при  $R_2$ . Именно с этих позиций геолог может выполнять содержательный анализ и составлять заключение о перспективности новых площадей 1.1 и 1.2.

Представляются интересными результаты, полученные при поиске аналога особой точки 3. Последовательное районирование при  $R_0, R_1, R_2$  и  $R_3$  показало результаты, аналогичные изложенному выше примеру, с той лишь разницей, что при  $R_3$  были выявлены четыре новые площадки. При этом оказалось, что в пределах площадки 3.2 расположено известное месторождение, а на площадях 3.3 и 3.4 – рудопроявления этого же типа.

Многочисленные исследования показали, что в пределах исследуемой территории размером 105 тыс. км<sup>2</sup> в масштабе 1 : 200 000 нет двух абсолютно одинаковых точек (аналогичных в исходном признаковом пространстве геологических и геофизических факторов). Это положение является вполне допустимым и является доказательством принципиальной возможности анализа имеющихся карт геологического содержания с помощью человеко-машинных методов.

## Геологическая типизация новых перспективных площадей

Одним из наиболее распространенных математических методов, используемых в прикладной геологии для оценки перспективности новых объектов, являются методы распознавания образов.

Применение этих методов предполагает выполнение процедуры обучения распознаванию образа, для чего требуется иметь набор некоторых объектов-эталонов, описанных одинаковыми характеристиками. Процедура обучения распознаванию образа в наиболее общем виде сводится к выделению некоторых общих для всех эталонных объектов свойств и определению для них некоторых "весовых" значений, при которых наилучшим образом происходит распознавание новых объектов (получение машинного решающего правила классификации). Однако выделенные на этой основе новые перспективные площади обладают свойствами, "общими" для всех эталонных объектов. В то же время возникает вопрос: к какому из использованных для обучения геологическому типу эталонного геологического рудного объекта наиболее "близка" каждая из выделенных новых перспективных площадей? Такая характеристика необходима, например, для последующей количественной оценки возможных масштабов прогнозных ресурсов, определения геологического типа оруденения и возможных технологических свойств руды.

С целью такой геологической типизации перспективных площадей, выделенных с использованием алгоритмов распознавания образов, на предыдущем этапе был применен метод таксономической классификации. Методологически он был реализован также на основе алгоритма "Транзитив". Классификация выполнена для территории в 105 тыс. км<sup>2</sup> в масштабе 1 : 200 000 по информации региональной базы геологических данных (36 факторов). На рис. 27 представлен фрагмент схематической карты результатов использования таксономии для типизации площадей, выделенных по данным классификации с помощью алгоритма распознавания образов "Гиперпласт". В результате классификации на основе решающего правила, построенного этим алгоритмом по шести эталонным объектам — рудным полям (1—6), в пределах исследуемой территории было выявлено 65 различных по размерам новых площадей. Применение таксономической классификации позволило осуществить типизацию вновь выявленных перспективных площадей. Результаты применения таксономии для геологической типизации 38 перспективных площадей (номера см. на рис. 27), выявленных методом распознавания образов, приведены ниже:

Номера рудных полей (эталонных объектов)	1	2	3	4	5	6
Перспективные участки	15, 24, 28, 29, 36—40, 43—45	7, 11, 12, 25—27, 30	41, 42	19—21	1—3, 33—35	55—59, 61—64

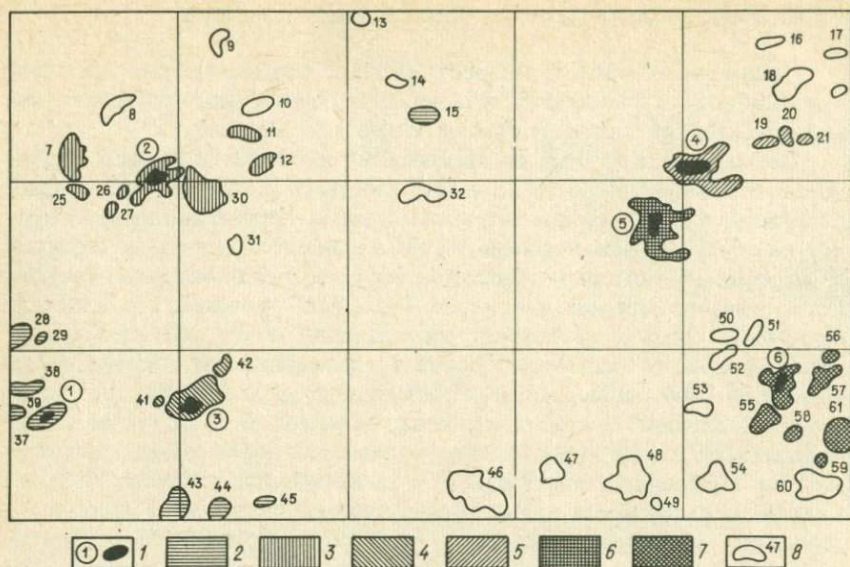


Рис. 27. Фрагмент карты результатов "типизации" новых перспективных площадей, выделенных с использованием метода распознавания образов при обучении по шести рудным эталонным объектам.

1 — эталонные рудные объекты и их номера (в кружках); перспективные площади: 2 — наиболее сходные с эталонным объектом 1, 3 — то же, с объектом 2, 4 — то же, с объектом 3, 5 — то же, с объектом 4, 6 — то же, с объектом 5, 7 — то же, с объектом 6; 8 — перспективные площади, имеющие сходство одновременно с многими объектами, и их номера

При практическом проведении такого рода типизации с помощью человеко-машинных методов большое значение приобретает выбор оптимальной величины "меры близости". Естественно, что при  $R = R_{\infty}$  все объекты, в принципе, войдут в одну общую группу. Поэтому в данном исследовании был применен следующий эвристический подход: последовательно увеличивая  $R$  (для каждого эталонного объекта отдельно), так, что при  $R_0 < R_1 < R_2 < \dots < R_n$  геолог-интерпретатор, анализируя получаемые промежуточные результаты, наблюдал при этом, чтобы в общий таксон (например, для эталона 1) не попал какой-либо другой эталонный объект (например, 2). Если это происходило при  $R = R_n$ , то за  $R_{\text{опт}}$  принималось  $R_{\text{опт}} = R_{n-1}$ .

Как показало исследование, 27 участков из 65 располагаются в таксонах, объединяющих несколько эталонных объектов, и, следовательно, обладают свойствами, присущими сразу нескольким рудным полям. В то же время для каждого из 38 участков явно преобладают свойства какого-либо одного из эталонных объектов ("геологического типа").

Необходимо подчеркнуть, что изложенные выше результаты действительны лишь для принятого исходного признакового описания территории (36 геологических и геофизических факторов). В то же время они наглядно иллюстрируют значительные возможности человеко-машинных методов анализа геологической информации. Весьма перспективным представляется применение для этих целей персональных ЭВМ.

#### МНОВОВАРИАНТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУДНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В основу исследования, выполненного в масштабе 1:50 000, были положены четыре варианта признакового описания модели строения верхней части земной коры в пределах рассматриваемой территории (юго-западная часть исследуемого региона размером 20 тыс. км<sup>2</sup>, см. рис. 24, б).

Первые три варианта характеризовались постепенным увеличением полноты описания геологического строения верхней части земной коры по геологическим и геофизическим данным, в четвертой — описание производилось лишь по геофизическим данным.

В первом варианте использовали геологические данные по поверхности палеозойского фундамента; во втором — эти данные были дополнены характеристикой магматических образований, залегающих ниже поверхности фундамента. Третий вариант дополнительно включал описание состава и строения докембрийского фундамента, а также соотношения структурных элементов в различных структурных этажах. Кроме того, были использованы сведения о субвулканических и экструзивных фациях (по гравимагнитным данным). Наконец, четвертый вариант был построен лишь на основе геофизических данных (гравиразведки и магниторазведки), при интерпретации которых в первую очередь учитывался состав горных пород на различных глубинах. Перечень групп факторов, использованных для формирования целевых массивов, характеризующих различные модели, приведен ниже в табл. 14. Все факторы были выбраны из территориальной машинной базы геологических данных, используемых при прогнозировании новых рудных полей.

По факторам, отобранным при формировании указанных выше четырех геологических моделей, были созданы четыре целевых массива.

В качестве эталонных объектов были приняты известные редкометалльные рудные поля, вмещающие гидротермальные месторождения (I класс) и непромышленные месторождения и рудопроявления редких металлов гидротермального генезиса (II класс). Все объекты расположены в пределах одной структурно-металлогенической зоны и связаны с формацией березитов. Исследования по всем моделям выполнены при одной гипотезе рудообразования и постоянной выборке обучения. В ито-

Таблица 14. Информативность различных групп факторов

Группа факторов	Модели			
	1	2	3	4
Литолого-стратиграфические (1-18)	342	315	261	—
	64	38	28	
Магматические (22-29)	166	170	132	—
	31	21	14	
Литолого-стратиграфические и магматические, выделяемые по геофизике (41-72)	—	313	311	284
		37	33	49
Соотношение простираний структур в различных этажах (73-75)	26	32	214	298
	5	4	23	51

Примечание. В числителе — в относительных единицах, в знаменателе — в процентах.

ге исследования были получены четыре варианта прогнозных карт. Фрагмент результатов многовариантного прогнозирования приведен на рис. 28. Представляют интерес величины относительной информативности геологических факторов, полученные при распознавании (см. табл. 14). Характерно, что для модели 3, показавшей лучшие результаты, наиболее важным оказался фактор 39 — участки с секущим простиранием пород в верхнем и нижнем структурных этажах. Это обстоятельство свидетельствует о том, что рудные поля пространственно тяготеют к узлам тектонической перестройки, т.е. к активным тектоническим зонам долгоживущих разломов.

Другим информативным фактором является приуроченность к структурно-магматическим узлам с вулканогенными образованиями основного состава, где умеренно и неравномерно проявлены процессы ультраметаморфизма и гранитообразования. Наконец, важное значение имеет фактор наличия в породах доюрского фундамента вулканических образований среднего и основного состава, выделяемых магниторазведкой. Это обстоятельство позволяет выбирать оптимальный комплекс поисковых методов, применение которых позволит получить наиболее ценную информацию для поисков месторождений конкретного типа.

Оценка вариантов осуществлялась с учетом ошибок на контрольной выборке и соответствии принятой модели, как это показано в табл. 15.

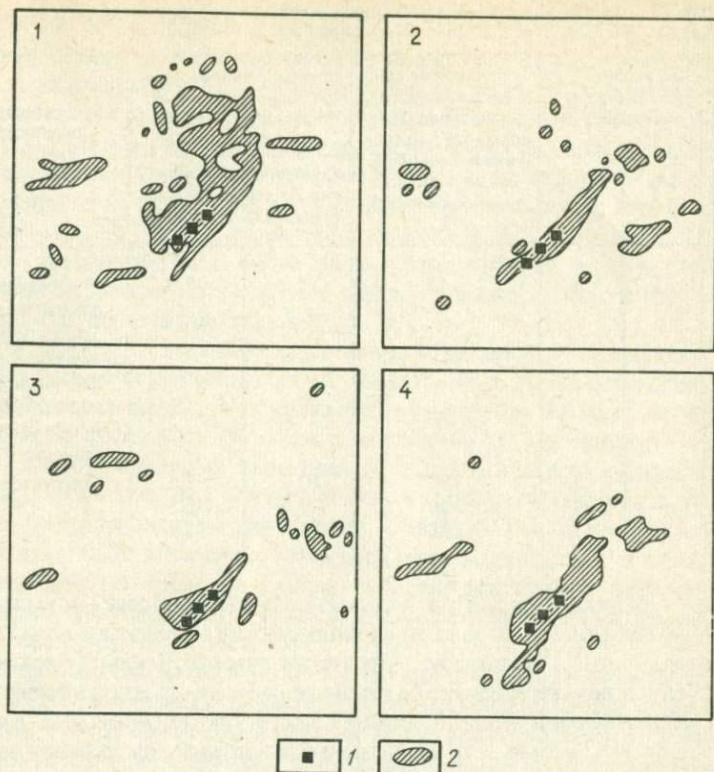


Рис. 28. Результаты многовариантного прогнозирования рудных полей на основе различных моделей (1–4) строения верхней части земной коры [45]

1 – эталонные объекты; 2 – перспективные площади

Для варианта 3, наиболее полно учитывающего особенности геологического строения на поверхности и на глубине, наблюдается наименьшее количество ошибок. В результате исследования, выполненного в человеко-машинном режиме, предпочтение было отдано модели 3, основанной на учете факторов геологического строения на различных гипсометрических уровнях с комплексированием методов геологии и геофизики.

Как следует из табл. 15, вследствие отсутствия сведений по глубинному строению результаты прогноза по первому варианту (см. рис. 28) частично не соответствуют реальной геологической обстановке: некоторые перспективные участки располагаются среди непродуктивных формаций.

В то же время на модели, построенной по материалам интерпретации гравимагнитных данных, отражающим геологическое строение поверх-

Таблица 15. Оценка вариантов прогнозных карт для различных моделей

Номер варианта	Число ошибок на контрольной выборке		Отношение общей площади эталонных объектов по данным машинной обработки к истинным размерам, %	Суммарные размеры перспективных площадей в % от общей площади		Соответствие принятой модели
	I рода	II рода		С учетом эталонных площадей	Без учета эталонных площадей	
1	1	4	162	16,0	7,9	Частично не соответствует (часть перспективных площадей располагается среди непродуктивных формаций)
2	—	3	154	10,0	2,5	Соответствует
3	—	1	134	9,0	2,3	”
4	—	3	122	12,0	5,9	”

ности и глубинных горизонтов, получены результаты более приемлемые, чем по первой модели, отражающей лишь данные о геологическом строении поверхности. Установлено, что геофизические данные, характеризующие глубинное геологическое строение рассматриваемой территории, вносят существенный вклад в решение задачи прогнозирования. Анализ выделенных по модели 3 перспективных площадей, выполненный специалистами, устанавливает соответствие их существующим геологическим представлениям об особенностях локализации оруденения в районе.

Таким образом, изложенный пример свидетельствует о значительных возможностях человеко-машинных методов комплексного анализа геологической и геофизической информации при научно-методических исследованиях.

#### ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ И БЕСПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ МЕТОДОМ ЭВРИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Геологическое прогнозирование выполнено на основе учета теоретических знаний и практического опыта специалиста. Масштаб исследования 1:50 000, общая площадь — 20 тыс. км<sup>2</sup>. Классификация выполнялась по элементарным площадкам размером 0,25 км<sup>2</sup>.

Для определения площадей, перспективных на обнаружение новых гидротермальных месторождений редких металлов формации березитов, геологом Л. с помощью алгоритма эвристического моделирования было построено эвристическое решающее правило (поисково-оценочный кри-

терий). Из этого правила следовало, что специалист считает перспективными площади: располагающиеся не ближе чем 2 км от постороженных толщ; находящиеся в приконтактных областях вулканогенно-терригенных толщ; приуроченные к локальным гравитационным аномалиям и т. д. и, наконец, лежащие не далее чем 0,5 км от разломов, выделяемых по геолого-геофизическим данным. Каждому из априорно выделенных "благоприятных" интервалов признаков специалист присвоил информативный вес "1". Остальным интервалам были присвоены веса "0". Естественно, что возможна и более дифференцированная оценка априорной информативности — это зависит лишь от знаний и опыта специалиста. Общий вид правила приведен на рис. 29.

На основе эвристического решающего правила и машинного банка данных с помощью ЭВМ была построена карта областей сочетания факторов, благоприятных для локализации оруденения по всей исследуемой территории (рис. 30). При этом установлено, что все площади с известными месторождениями выделяются на ней в качестве перспективных.

При сравнении этой карты с результатами прогнозирования, полученными с использованием алгоритмов распознавания образов (с обучением на известных эталонных объектах), оказалось, что все перспективные площади, выделенные на основе человеко-машинного распознавания, одновременно выделяются и по данным районирования на основе эвристического решающего правила.

В то же время можно заметить, что при использовании эвристического подхода выделяется значительно больше перспективных площадей, чем при прогнозировании на основе обучения по известным эталонным объектам. Это, по-видимому, объясняется тем, что в последнем случае выделяются лишь площади, аналогичные по сочетанию и информативному весу признаков площадям, в пределах которых располагаются конкретные эталонные объекты (месторождения), а при эвристическом моделировании выделяются все площади, благоприятные для концентрации гидротермального оруденения в более широком аспекте (в том числе и такого типа, который неизвестен в настоящее время в пределах исследуемой территории).

Специалист Л., используя алгоритм эвристического моделирования, построил другое эвристическое решающее правило. Оно включало признаки, неблагоприятные, с его точки зрения, для локализации оруденения (на рис. 29 оба эти правила совмещены). К неблагоприятным признакам в рассматриваемом аспекте специалист Л. относит наличие постороженных толщ, отсутствие или значительное удаление исследуемых участков от вулканогенно-терригенных толщ, расположение их в "нормальных" геофизических полях, расположение участков далее чем 2,5 км от разломов, выделяемых по геолого-геофизическим данным, и т. д. В данном случае всем неблагоприятным признакам специалист присвоил информативный вес "-1". На рис. 30 изображены также и эти результаты.

Номер фактора	Интервалы значений признаков	Факторы
1		Постороженные толщи (Т - J - Р - С)
2		Вулканогенно-терригенные толщи (D <sub>2</sub> + 3)
3		Осадочно-вулканогенные толщи (D <sub>1</sub> - 2)
4		Вулканогенно-терригенные толщи (O <sub>2</sub> + 3)
5		Вулканогенно-терригенные толщи (O <sub>1</sub> - 2)
6		Осадочно-вулканогенные толщи (O <sub>3</sub> - S <sub>1</sub> )
7		Зеленсланцевые толщи (PR <sub>3</sub> )
8		Спильты и диабазы (Ст ?)
9		Толщи кристаллических образований (PR <sub>3</sub> - AR)
10		Гранитоидные интрузии (T <sub>2</sub> ?)
15		Гранитоидные интрузии, не выходящие на дневную поверхность (D <sub>2</sub> ?)
16		Мелкие интрузии основного состава, не выходящие на дневную поверхность (O <sub>3</sub> - S <sub>1</sub> )
17		Гранитоиды, не выходящие на дневную поверхность (S <sub>1</sub> ?)
18		Габбро-диориты, не выходящие на дневную поверхность (S <sub>1</sub> ?)
19		Изометрические локальные магнитные аномалии, соответствующие интрузиям среднего и основного состава
20		Эффузивные тела, не выходящие на дневную поверхность



Рис. 29. Эвристическое решающее правило геолога Л. локализации факторов, благоприятных для обнаружения оруденения конкретного типа.

1 - области значений признаков, благоприятных для локализации оруденения искомого типа; 2 - то же, неблагоприятных для локализации оруденения

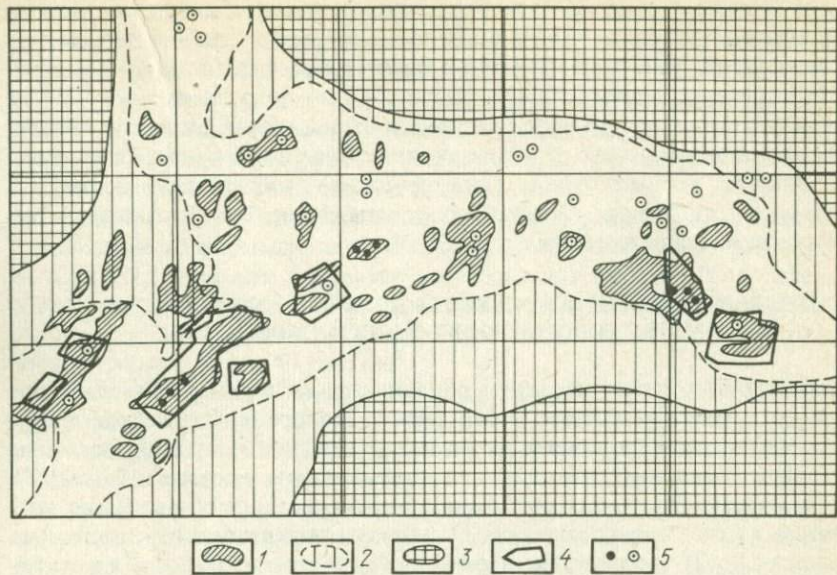


Рис. 30. Результаты выделения площадей различными методами:

1, 2 – эвристического моделирования (1 – перспективные, 2 – бесперспективные); 3 – таксономического районирования (бесперспективные); 4 – распознавания образов (перспективные); 5 – известные месторождения и рудопроявления

Как следует из рис. 30, на основе эвристического решающего правила к бесперспективной относится почти половина всей исследуемой территории. Характерная деталь – в пределах выделенной бесперспективной территории не располагается ни одно из известных в районе месторождений, рудопроявлений, точек минерализации. Из 37 известных точек минерализации редкометалльного оруденения лишь две расположены в ее пределах.

Одновременно было выполнено выделение бесперспективных площадей в пределах исследуемой территории методом таксономического районирования. При этом постулировалось, что рудные объекты должны располагаться на площадях со сложным (исключительным или аномальным) геологическим строением, обусловившим перераспределение рудных компонентов и их локальную концентрацию; площади же с более простым геологическим строением являются менее благоприятными для концентрации редкометалльного оруденения. Исходя из этого, с помощью алгоритма таксономической классификации "Транзитив" было выполнено районирование в пределах исследуемой территории (размер элементарных площадок  $0,25 \text{ км}^2$ ). В качестве критерия оптимальности в данном случае был также использован эвристический под-

ход: радиус "меры близости" выбирался методом последовательных приближений таким, чтобы в пределах бесперспективной площади не оказывалось ни одного известного рудного объекта. Оптимальный вариант такого таксономического районирования показан на рис. 30. При сопоставлении этих данных с результатами выделения бесперспективности площадей на основе теоретических представлений и опыта специалиста-геолога (эвристическое моделирование) наблюдается достаточно хорошая сходимость. Однако геолог относит к бесперспективным несколько ббльшие площади (рис. 30).

#### РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ИМИТАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Суть настоящего исследования заключалась в том, чтобы на основе ретроспективного анализа совокупности геолого-геофизической и другой информации на различные временные периоды построить с помощью человеко-машинных методов прогнозные карты масштаба 1 : 200 000, соответствующие принятому периоду времени, и оценить качество этих затрат со следующих позиций: 1) размеры выделенных перспективных площадей; 2) соответствие прогноза результатам проведенных в последующие годы геологоразведочных работ (в первую очередь, положение вновь обнаруженных рудных узлов в пределах перспективных площадей, выделенных на основе ретроспективного анализа геолого-геофизической информации).

Проанализировав имеющиеся фактические материалы, историю открытия промышленных месторождений в районе, авторы исследования пришли к выводу, что наибольший интерес представляет оценка эффективности методики прогноза на основе применения человеко-машинных методов анализа данных по информационному уровню 1964 г. К тому времени в районе были известны несколько рудных узлов, причем наиболее интересные объекты редких металлов, открытые позднее, к тому времени еще не были известны [45].

Исходными материалами служила геологическая карта региона по состоянию на 1964 г. Следует отметить, что эта карта, составленная для закрытого мощным чехлом рыхлых отложений и к тому времени слабо изученного района, базировалась в значительной степени на материалах интерпретации гравимагнитных съемок. Кроме того, использовалась карта гравимагнитных съемок и схема интерпретации по ним. В качестве эталонных объектов были использованы известные на начало 1964 г. рудные поля редкометалльных месторождений.

Решение задачи ретроспективного прогнозирования было выполнено с применением человеко-машинных методов анализа и комплексной интерпретации геолого-геофизической информации (на 1964 г.), представленной геологическими факторами и некоторыми элементами глубинного строения, определенными по геофизическим данным.

Использованная для решения ретроспективного прогнозирования геолого-геофизическая информация с точки зрения современных знаний о районе была весьма схематичной. Это в первую очередь относилось к геологическим факторам, в частности, к возрастной индексации отдельных формаций, а также к имеющимся эталонным объектам, принадлежащим к различным рудным формациям и отличающимся характером гидротермально-метасоматических изменений.

Решение задачи классификации, получение решающего правила и определение информационной значимости отдельных признаков было выполнено с помощью алгоритма распознавания образов "Гиперпласт" в соответствии с принятой методической схемой. На основе полученного по исходной информации решающего правила построена прогнозная карта для площади около 40 тыс. км<sup>2</sup>.

Анализ полученной таким образом ретроспективной имитационной прогнозной карты показал, что если при использовании традиционной методики геологического прогнозирования по материалам 1964 г. было выявлено в качестве перспективных 32 % от всей исследуемой территории, то применение человеко-машинных методов позволило установить, что размер перспективных площадей здесь не превышает 21 % (при 80 % вероятности успеха). При использовании для прогноза новых данных, полученных за последние годы, оказалось, что традиционный прогноз относит к перспективным 19 % территории, а человеко-машинные методы геопрогноза всего лишь 11,5 % при 85 % успеха.

Наиболее интересен факт, что все важные в промышленном отношении геологические рудные объекты, открытые после проведения поисково-съёмочных работ масштаба 1 : 50 000 по всей исследуемой территории, весьма отчетливо были установлены при использовании человеко-машинного анализа материалов 10-летней давности масштаба 1 : 200 000. При этом, как указывалось, общие размеры перспективных площадей были почти наполовину меньше, чем выделенных при использовании традиционной методики.

Этот пример убедительно свидетельствует о том, что при использовании традиционных подходов имеющаяся исходная информация учитывается далеко не полностью. Следовательно, здесь имеются значительные резервы повышения эффективности геологических исследований при широком применении человеко-машинных методов геологического прогнозирования. Кроме того, этот пример свидетельствует также о необходимости и целесообразности переинтерпретации огромного числа имеющихся геологических материалов, что не только уточнит наши представления о закономерностях локализации оруденения, но и позволит выделить новые источники минерального сырья, в том числе в пределах детально изученных районов.

## Глава 10. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НОВОГО ДЛЯ ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА ТИПА ОРУДЕНЕНИЯ

По структурно-формационному районированию район исследований занимает промежуточное положение между Алданским щитом и Монголо-Охотской складчатой системой, располагаясь в основном в Становом блоке и восточной части Нерчугано-Шилкинского блока Олекмо-Станового складчатого пояса [24, 29].

В геологическом строении района принимают участие архейские, протерозойские и мезозойские образования. Структурные условия локализации редкометалльного оруденения в значительной степени определяются крупными разрывными нарушениями субширотного северо-западного и северо-восточного направлений, отраженными в магнитных и гравитационных полях. Определенную роль играли и овально-кольцевые структуры, отдешифрованные на космоснимках. Как правило, крупные рудные узлы приурочены к местам сочленения разнонаправленных структурных элементов.

Большинство рудопроявлений редких металлов, выведенных на современную поверхность, сопряжены с более широкими геохимическими аномалиями, которые на изученной площади фиксируются потоками элементов-спутников (свинец, медь, цинк, висмут, вольфрам, иногда — молибден, ртуть, мышьяк, бор). Состав геохимических аномалий, сопровождающих оруденение, варьирует от моноэлементных редкометалльных до сложных полиэлементных в зависимости от таких факторов, как возраст оруденения (усложняется от древних к молодым), формационный тип, уровень эрозионного среза, ландшафтные условия, однако, как правило, более богатые руды сопровождаются более интенсивными и контрастными потоками рассеяния. Выдерживаются также пространственные иерархические системные соотношения, т.е. отдельным рудным телам соответствуют геохимические аномалии площадью в первые квадратные километры, рудным полям — десятки, рудным узлам и зонам — сотни квадратных километров.

*Состав машинной базы данных и методика исследований.* По всей исследуемой территории сформирована машинная база геологических данных; в качестве исходных были использованы карты: геологическая (масштаб 1 : 200 000), космофотогеологическая (1 : 500 000), потоков рассеяния (1 : 200 000) и полезных ископаемых (1 : 200 000). При этом карты геологического содержания были преобразованы с помощью ЭВМ таким образом, что каждая элементарная площадка (2×2 км в масштабе карты) характеризовалась ее точным пространственным положением относительно ближайших контактов всех имеющихся на карте факторов [20].

Для поисков нового типа редкометалльного оруденения, аналоги которого отсутствуют в пределах исследуемой территории, наряду

с другими подходами был использован метод эвристического моделирования [20]. При этом в качестве исходных данных были использованы модели поисково-оценочных критериев, построенные геологами В.В. Домчаком, В.И. Пугачом, В.Н. Третьяковым, Р.А. Мостовой, В.Н. Грязновым [29]. Пример эвристического подхода приведен на рис. 31.

Сравнение моделей, построенных по алгоритму эвристического моделирования, показало, что все специалисты высоко оценивают информативную значимость таких факторов, как ореолы рассеяния и проявления редких металлов, жильные образования кислого состава мезозойского возраста, поля развития гидротермально-измененных пород и другие, т.е. их поисковое значение не вызывает сомнений. Однако были разные взгляды геологов на важность ряда факторов, о чем свидетельствует не только различная оценка информативной значимости отдельных интервалов, но и полное исключение из "личной модели" некоторых геологических факторов, которые различными геологами определены в качестве необходимых.

Так, например, геолог Т. исключает из своей модели архейские отложения, в то время как для геолога Д. они являются важными и он присваивает им значительный информативный вес. Или геолог П. отрицательно оценивает в поисковом значении такие магматические факторы, как лейкократовые граниты нижнемелового и юрского комплексов, а геологи Д. и М., наоборот, придают им положительные значения информативности. Подобное моделирование, подчеркивая неоднозначность мнения геологов на процессы рудообразования в районе, в то же время открывает широкие возможности для творческого и оперативного изучения накопленной информации и сравнительного анализа конечных результатов прогноза. Преимуществом такого метода является также и то обстоятельство, что при поисках аналога в качестве эвристической модели-эталона могут быть приняты объекты из других рудных районов. Используя метод эвристического моделирования, можно сформировать такого рода эталоны для двух промышленных месторождений редких металлов висмут-сульфидно-кварцевой и кварц-сульфидно-полиметаллической формаций, расположенных вне пределов исследуемой территории. Полученные результаты показали принципиальную возможность поиска площадей, геологическая обстановка которых близка геологическим рудным объектам, находящимся далеко за пределами района. Такой подход к анализу геологической информации открывает возможности для использования метода эвристического моделирования при районировании слабоизученных территорий, а также для поисков месторождений новых формаций, неизвестных до настоящего времени в пределах района исследований.

На основе площадного таксономического районирования была выявлена также площадь "уникального" описания в исходном пространстве признаков (геологическая аномалия). Кроме того, были использо-

Номер фактора	Вне фактора				Положение контакта	Внутри фактора		
	-4	-3	-2	-1		+1	+2	+3 км
1							+2	
2							+2	
3							+2	
4		+3	+5		+7		+5	+3
5	+1		+2	+3		+3	+2	+1
6			-2	-5			+7	
7							+1	
8		+2	+4		+6		+4	+2
9	+1		+2		+3		+2	+1
10			-2	-5			-7	
11				+1		+2		+1
12				+1		+2		+1
13		+1	+3		+5		+3	+1
14			+2	+6	+8			
15						+2		
16		+1		+1	+2			
17			+2	+2				
18			+2	+4				
19		+1		+2	+3	+4		
20	+2	+4	+6	+8	+10			
21		+1		+2				
22	+2	+4	+5	+6				
23		+1		+2				
24	+1		+2		+4			
25		+1			+2			
26	+1		+2		+3			
27	+1		+2		+4			
30	+4		+6		+8			
31		+1		+2				
34		+2		+3	+5			
35			+2	+5	+7			
36			+1	+2	+3			
37			+2	+5	+7			
38				+3	+5			
39			+2	+5	+7			
40	+1	+2	+4	+6				
41			+2	+5	+7			
42		+1	+2	+3				
43		+1	+3	+4				
44			+1	+2	+3	+4		
45	+1	+2	+4	+8	+10			

Рис. 31. Модель локализации редкометалльного орудения в исследуемом районе — эвристическое решающее правило, составленное Р.А. Мостовой (информативные веса факторов)

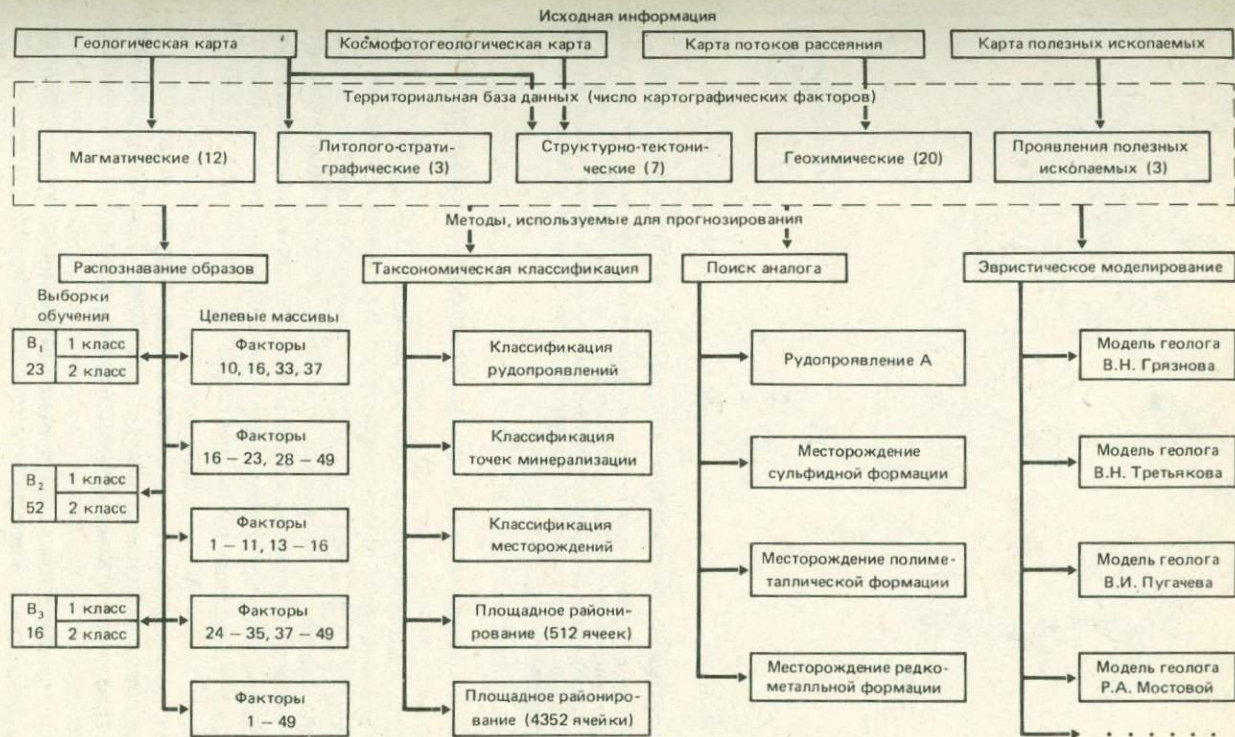


Рис. 32. Технологическая схема человеко-машинного прогнозирования редкометалльного оруденения конкретного типа в исследуемом районе. По В.Н. Грязнову

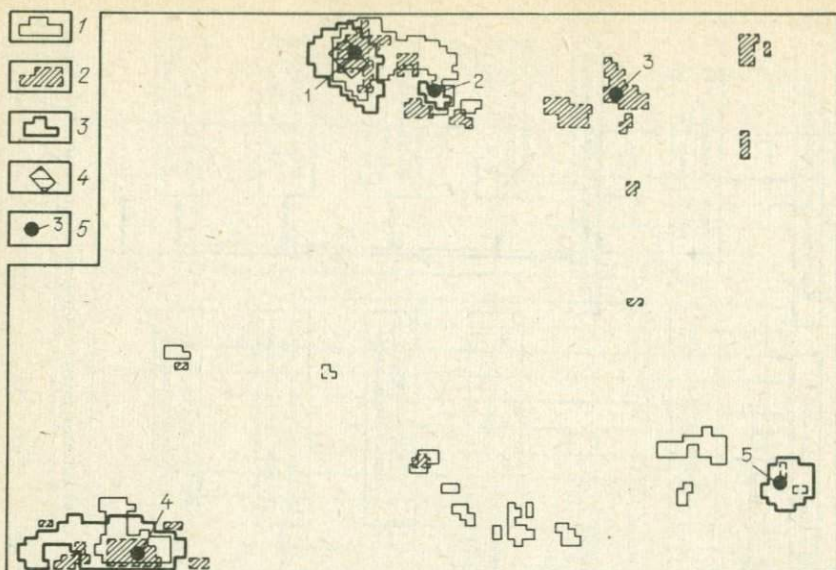


Рис. 33. Результаты многовариантного геологического прогнозирования [29].

1–3 – контуры перспективных площадей, выделенных методом распознавания образов (1), эвристического моделирования (2) и особой точки (3) – аналог расположен за пределами исследуемой территории; 4 – контуры площади "уникального описания в исходном признаковом пространстве" (геологическая аномалия); 5 – перспективные участки и их номера

ваны и другие методические подходы. Методическая схема исследований приведена на рис. 32.

Редакция конечной прогнозной карты (рис. 33) осуществлялась с учетом всех вариантов прогнозирования и их качества, которое определялось исходя из следующих критериев: совпадения прогнозных площадей, выделяемых несколькими методами; анализа общей геологической обстановки, т.е. наличия прямых или косвенных признаков оруденения; экономических соображений, т.е. общая площадь перспективных участков не должна была превышать 4–5% от всей территории исследования.

*Результаты исследования.* Всегда было выделено пять участков, представляющих наибольший интерес для более детального изучения (рис. 34). В результате полевой проверки выделенных участков установлено следующее.

Участок 1 расположен в северо-западной части исследуемой площади. В структурно-металлогеническом отношении он находится в Северо-Становой рудной зоне и приурочен к узлу пересечения разломов северо-

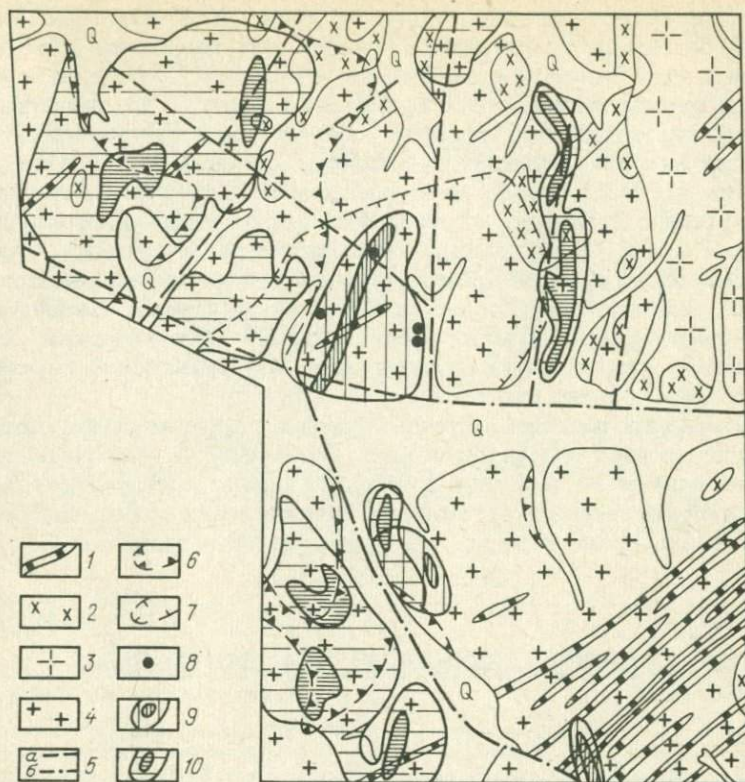


Рис. 34. Результаты поисково-оценочных работ, проведенных на участке № 1:

1 – верхнемеловые дайки диоритовых порфиров ( $\gamma\delta\pi K_1$ ); 2 – верхнемеловые субвулканические тела гранодиорит-порфиров ( $\mu\gamma\delta\pi K_1$ ); 3 – верхнеюрские – нижнемеловые гранодиориты порфировидные ( $\gamma\delta J_3 - K_1$ ); 4 – древнестановой комплекс: плагиограниты и биотит-амфиболовые граниты, нередко гнейсовидные ( $\gamma_1 PR_1$ ); 5 – линии тектонических нарушений (а – установленные, б – предполагаемые); 6, 7 – границы гидротермально-метасоматических изменений пород березитового (б) и пропилитового (7) типов; 8 – места отбора штучных проб с высоким содержанием редких металлов; 9, 10 – ореолы рассеяния редких металлов с эпицентрами максимальных содержаний

западного простирания и системы разломов северо-восточного участка, трассируемых поясом даек. Большая часть участка сложена нижнепротерозойскими гранитами, гнейсо-гранитами, прорванными в мезозое мелкими субвулканическими телами гранодиорит-порфиров, дайками диоритовых порфиров. Площадь участка разбита густой сетью разнонаправленных тектонических нарушений на мелкие блоки.

В пределах контура этого участка при проведении полевых литохимических поисков по потокам рассеяния были выявлены интенсивные

аномалии редких металлов, свинца и цинка. Дополнительное более детальное геолого-геохимическое изучение этой территории позволило выявить здесь высококонтрастный вторичный ореол рассеяния и вторичные ореолы свинца, цинка, вольфрама и висмута. Пространственно ореолы перечисленных элементов образуют изометрично-кольцевую комплексную геохимическую аномалию с ореолом редких металлов в центре и последовательно окаймляющими его по периферии ореолами цинка, свинца, вольфрама, висмута. Конформно с вторичными ореолами развиты поля гидротермально-метасоматически измененных пород. В общем виде вторичные ореолы рассеяния редких металлов контролируются березитизацией (окварцеванием, серицитизацией, карбонатизацией, пиритизацией), а также пропилитизацией (окварцеванием, серицитизацией, хлоритизацией, эпидотизацией, карбонатизацией, пиритизацией, вкрапленностью магнетита).

В границах развития вторичных ореолов редких металлов обнаружены интенсивно катаклазированные, окварцованные, карбонатизированные породы с тонкой вкрапленностью пирита, галенита, сфалерита, халькопирита, шеелита и магнетита. Концентрация редких металлов в указанных образованиях достигает промышленных содержаний.

## Глава 11. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Ниже приведены результаты выделения в Болнисском рудном районе участков, перспективных для локализации медного оруденения на площади 900 км<sup>2</sup> в масштабе 1:50 000 и последующего подсчета прогнозных ресурсов категории Р<sub>3</sub>. Работа выполнена Ю.К. Бахтадзе, С.Н. Кандауровым, В.И. Лордкипанидзе и др. [11 и др.].

По схеме металлогенического районирования Грузии этот район граничит на севере с Храмским рудным узлом, а на юге — с Локско-Алавердским рудным районом [43]. Наиболее древние образования представлены метаморфической свитой нижнего палеозоя мощностью от 0,5 до 1 км (см. рис. 35). Мезозойские отложения представлены вулканогенно-осадочными образованиями нижней и средней юры общей мощностью до 600 м. Отложения верхнемеловой системы широко представлены вулканогенно-карбонатно-терригенной толщей сеномана общей мощностью до 1000 м. Выше них прослеживаются вулканогенно-осадочные отложения нижнего турона (до 400 м). Палеогеновая система представлена среднеэоценовыми вулканогенно-осадочными и вулканогенными образованиями андезитового и липарито-дацитового состава общей мощностью до 2000 м. Четвертичные отложения представлены в основном аллювиальными отложениями мощностью до 100–150 м.

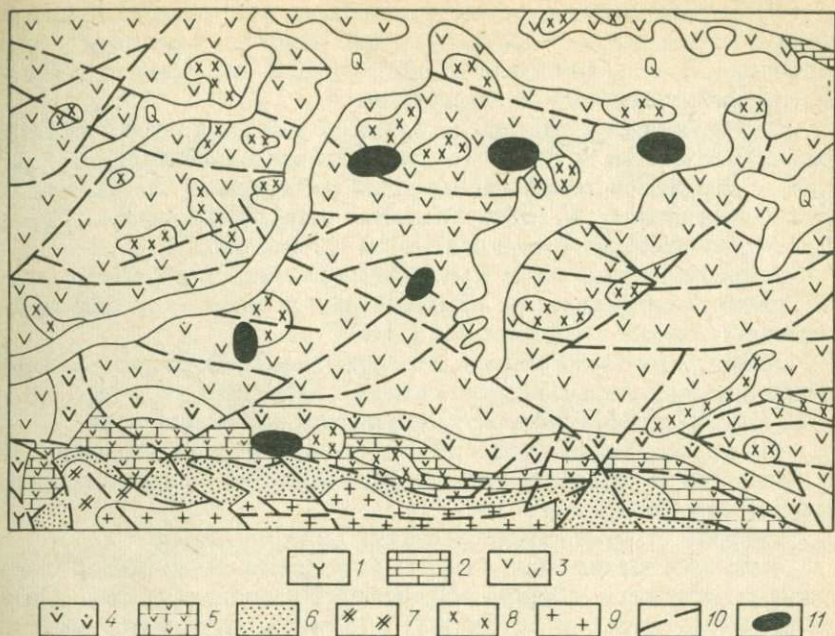


Рис. 35. Схематическая геологическая карта центральной части исследуемого рудного района. По Ю.К. Бахтадзе и др. [11].

Осадочные и вулканогенные образования: 1 — среднеэоценовые; 2 — кампан-дантские; 3 — верхнеэоцен-сантонские; 4 — нижнеэоценовые; 5 — сенонские; 6 — юрские; 7 — нижнепалеозойские породы; 8 — мезокайнозойские интрузивы; 9 — интрузивы центральной части главного массива; 10 — разрывные нарушения; 11 — рудные месторождения

Интрузивные магматические породы, представленные в основном гранитоидами, слагают центральную часть Локского массива. По возрасту они делятся на две группы: позднепалеозойские и среднеюрские. Представлены они серией пород от кварцевых диоритов до гранитов. Широко развиты в районе гипабиссальные и субвулканические образования, связанные с мезо-кайнозойской вулканической деятельностью.

Характерной особенностью тектонического строения района является наличие многочисленных разрывных нарушений северо-западного, северо-восточного и субширотного направлений. В районе имеются разноориентированные брахискладки и куполовидные поднятия, часто связанные с палеовулканическими структурами.

В Болнисском рудном районе известны месторождения и многочисленные рудопоявления меди, полиметаллов, ртути, железа, марганца и ряда других полезных ископаемых.

Наибольший промышленный интерес представляют месторождения меди и полиметаллов, относимые, по В.В. Панцулая, к сложной медно-колчеданно-барит-полиметаллической формации, на примере которых было выполнено настоящее исследование.

*Выделение перспективных площадей.* Прогнозная оценка территории осуществлялась на основе комплексного анализа косвенных признаков — материалов геологосъемочных и региональных геофизических работ, помещенных в территориальную базу геологических данных. При ее формировании было использовано 129 факторов:

литология, стратиграфия и магматические образования района — 48;  
дифференцированные по направлению и интенсивности разрывные нарушения, снятые с геологической карты, — 12;

элементы аэрофотоснимков, дешифрируемые как разрывные нарушения и подразделенные по направлениям и интенсивности, — 16;

результаты аэрогамма-спектрометрических наблюдений — 30;

аномальное гравитационное поле со своими трансформантами — 9;

аномальное магнитное поле по данным аэромагнитной съемки со своими трансформантами — 7;

высотные отметки рельефа со своими трансформантами — 7.

Выделение перспективных площадей осуществлено на основе технологии распознавания образов с обучением. В качестве рудных эталонов были использованы 6 месторождений и 18 рудопроявлений медноколчеданно-барит-полиметаллической и медно-полиметаллической жильной формаций. Общая площадь рудных эталонов составила 134 элементарных ячейки размером 0,25 × 0,25 км каждая. В качестве безрудных эталонов использовались 268 элементарных ячеек, отобранных случайным образом в пределах исследуемой территории.

Анализ вариационных кривых значений признаков по эталонам и результатам многовариантного обучения системы при разных сочетаниях рудных и безрудных эталонов позволил сократить исходное признаковое пространство со 129 до 48 признаков, наиболее устойчивых к изменению эталонных выборок, на основе которых и было получено решающее правило распознавания, использованное для выделения перспективных площадей.

В результате классификации были конкретизированы все площади, выделяемые при традиционных методах прогнозирования, а также выделен ряд новых участков, хорошо согласующихся с геологией района (рис. 36). Для оценки возможностей человеко-машинной технологии выявлять скрытые месторождения по картографической геологической информации был поставлен эксперимент, при котором из выборки рудных эталонов было изъято одно из месторождений, перекрытое молодыми лавовыми потоками и аллювиальными отложениями мощностью 200 м. Никакими традиционными геолого-геофизическими и геохимическими методами это месторождение на поверхности не обнаруживается. Оно было найдено при систематическом разбуривании территории.

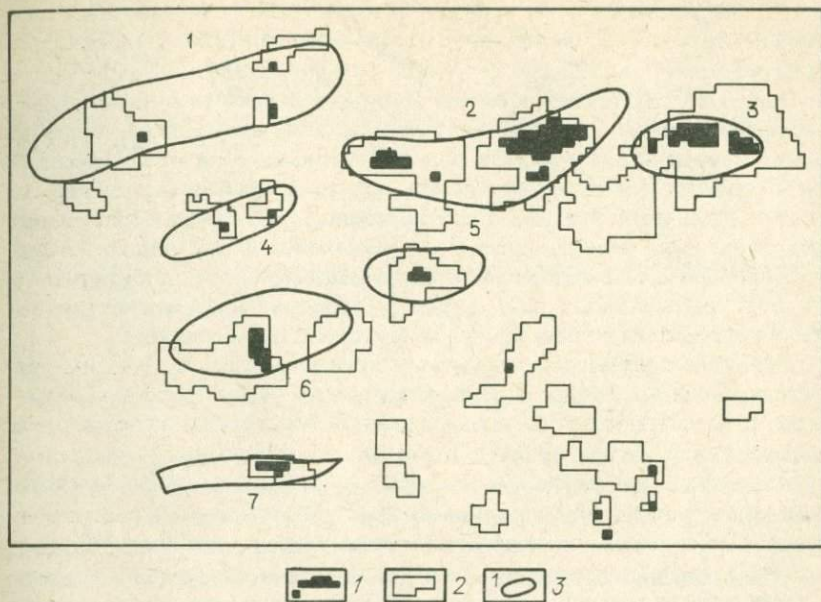


Рис. 36. Схема геологического прогнозирования в пределах центральной части исследуемого района. По Ю.К. Бахтадзе и др. [11].

1 – известные рудные месторождения – эталонные объекты; 2 – перспективные площади, выделенные на основе человеко-машинной технологии геологического прогнозирования (только по картографической информации); 3 – перспективные площади, выделенные на основе традиционных методов геологического прогнозирования с учетом данных буровых работ, и их номера

После обучения распознаванию образа на оставшихся эталонах и последующей классификации территории контрольное (скрытое) месторождение было выявлено весьма отчетливо и надежно.

Для количественной оценки прогнозных ресурсов был использован алгоритм распознавания образов с обучением. В качестве эталонов выбрали четыре месторождения медноколчеданно-барит-полиметаллической формации, по которым имелись сведения о запасах по промышленным категориям. Для каждой из элементарных ячеек, расположенных в пределах этих месторождений, подсчитали площадную продуктивность по меди (т.е. суммировались запасы меди по всем рудным телам различных горизонтов в пределах данной ячейки). Все элементарные ячейки с подсчитанной продуктивностью (всего 85 ячеек) были подразделены на 4 класса со средней продуктивностью 1, 5, 10 и 40 условных единиц. В первом классе оказалось 48 таких ячеек, во 2-м – 21, в 3-м – 13 и в 4-м – 3. Процесс обучения распознаванию состоял в получении решающего правила, позволяющего отличить каждый из классов от остальных

трех. В результате анализа вариационных кривых и многовариантного обучения распознаванию образов исходное признаковое пространство было сокращено со 129 до 50 наиболее информативных факторов для распознавания различных классов. Полученные таким образом решающие правила использовались для классификации выделенных на предыдущем этапе перспективных площадей. Выделяемые при этом элементарные площадки (ячейки) относились при распознавании к одному из четырех эталонных классов. Постулировалось, что такая ячейка имеет продуктивность, равную средней продуктивности эталонного класса, к которой она была отнесена при распознавании. Сумма продуктивностей всех распознанных элементарных ячеек нового перспективного участка определяла полные прогнозные ресурсы по категории  $P_3$ .

Проверка полученных результатов осуществлялась путем сопоставления прогнозных ресурсов, определенных по рассматриваемой технологии, с подсчитанными по промышленным категориям запасами двух месторождений, оставленных для контроля; прогнозными ресурсами, подсчитанными специалистами по рудным площадям традиционными методами с учетом поисково-разведочных работ; оценкой прогнозных ресурсов всего района, выполненной коллективом геологов в 1982 г.

Сопоставление прогнозных оценок показало следующие результаты. Для контрольного месторождения, относящегося, как и 4 эталонных месторождения, к медноколчеданной формации, прогнозные ресурсы оказались на 2% меньше подсчитанных по промышленным категориям запасов. Для второго контрольного месторождения, относящегося к медно-полиметаллической жильной формации, подсчитанные прогнозные ресурсы оказались на 22% больше, чем подсчитанные запасы.

Сопоставление продуктивностей перспективных площадей (см. рис. 36), подсчитанных с применением человеко-машинных методов по косвенным картографическим геологическим данным, с результатами подсчета прогнозных ресурсов, выполненного квалифицированными специалистами с учетом буровых работ, показано ниже:

Участки, прогнозные ресурсы (в %) по которым определены традиционной методикой (с учетом данных буровых работ):

1 . . . . .	69
2 . . . . .	110
3 . . . . .	78
4 . . . . .	17
5 . . . . .	87

Контрольные месторождения с запасами (в %), подсчитанными по промышленным категориям:

6 . . . . .	98
7 . . . . .	122
В целом по району . . . . .	95

Примечание. Участки 2 и 5 наиболее изучены; участок 3 перекрыт молодыми лавами и аллювием мощностью 200 м; участок 4 наименее изучен.

Сопоставление прогнозных ресурсов в целом по Болнисскому рудному району, рассчитанных с помощью человеко-машинных методов по косвенным данным, с результатами прогнозно-оценочных работ, выполненных коллективом специалистов в 1982 г. с учетом материалов поисково-разведочных работ, показало различие в абсолютных цифрах не более 5 %.

## Глава 12. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

### ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ГЕОИНФОРМАЦИИ

В последние годы все большее распространение получает анализ геологических ситуаций на основе использования искусственного интеллекта. В качестве главного инструментария такого анализа служат так называемые "экспертные системы", содержащие базы знаний ("гносеобазы") о закономерностях локализации оруденения конкретных типов различных полезных ископаемых. Для таких систем характерен отход от применения традиционных методов программирования. С помощью таких программ обрабатывают различные факты и используют эвристические приемы, которые применяет эксперт (эксперты) [51 и др.]. Набор фактов (знания) и эвристические приемы (эмпирические правила) вводят в ЭВМ. Специальные программы используют эти эмпирические приемы для работы с сохраняемыми в системе знаниями в соответствии с запросом пользователя. Ход рассуждений системы может быть раскрыт пользователю с тем, чтобы показать ему, как система пришла к тому или иному конкретному выводу. Типичная схема экспертной системы приведена на рис. 37.

Основными составляющими частями экспертной системы являются два главных элемента: база знаний и механизм логических выводов (дедуктивная машина). В базах знаний содержатся конкретная информация относительно геологического объекта (например, рудного месторождения), факты, цифры, практические условия залегания, геологические модели и т.п. Дедуктивная машина — это комплекс программ, который обращается к базе знаний и по ее информации вырабатывает совет, рекомендацию или предполагаемое решение.

Современные экспертные системы содержат также подсистему сбора знаний, помогающую эксперту или инженеру-администратору системы базы знаний и специалисту-геологу, работающему с системой, формировать, вести и развивать базу знаний. Системы содержат также средства обучения для работы с системой, поясняющие, какие знания, правила и

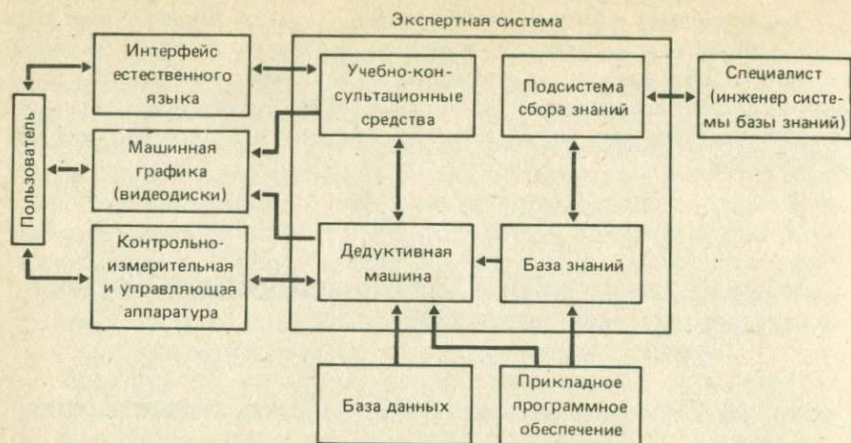


Рис. 37. Типовая структура экспертной системы [53]

какой логический ход рассуждений привел к данному заключению. Система может одновременно ответить пользователю, почему она задает ему тот или иной вопрос.

Первая апробация экспертной системы ПРОСПЕКТОР была осуществлена в 1982 г. Группе геологов и одновременно системе была дана информация по результатам полевых работ в районе шт. Вашингтон (США). Геологи, проанализировавшие материал на основе традиционного подхода, дали отрицательную оценку перспектив участка на выявление молибденового оруденения, в то время как система дала положительный ответ, подтвержденный впоследствии результатами бурения.

При работе система получает от пользователя информацию о регионе (например, данные о типе горной породы, минеральных ассоциациях, характере гидротермальных изменений и т.п.). Далее она приводит эту информацию в соответствие с заложенными в ее базу знаний моделями оруденения конкретного типа. При необходимости система запрашивает дополнительную информацию. На любой стадии пользователь может "вмешаться" в работу системы с тем, чтобы дать новую информацию, изменить имеющиеся данные или запросить оценку у системы. Для контроля хода рассуждений системы используется сложная сеть получения логических выводов и заключений, в которой узлы соответствуют различным утверждениям из области геологии (например, наличие благоприятных интрузий, даек, геохимических ореолов и т.п.). Влияние правдоподобия одного утверждения на правдоподобность другого оценивается с помощью правил вывода. Геолог, работающий с системой, подготавливает модель в виде сети получения вывода. В 1982 г. система содержала пять моделей (разработанных пятью экспертами). Эти модели

представлены 541 утверждением и 327 правилами. Пользуясь этими моделями и входными данными, система способна корректировать правдоподобность гипотез при изменении исходных условий.

### ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Экспертные системы представляют одно из центральных направлений в области исследований по разработке искусственного интеллекта [23]. Система ПРОСПЕКТОР разработана в Стенфордском исследовательском институте (США) и является компьютерной программой, с помощью которой предпринимается попытка смоделировать мыслительный процесс опытного геолога при прогнозировании месторождений рудных полезных ископаемых. В ней закодированы знания и умозаключения различных экспертов-геологов в области рудной геологии в виде совокупности логических правил. Теоретические основы, принципы построения и функционирования системы изложены в работах [51, 52, 53 и др.]. К настоящему времени она включает группу экспертных моделей, описывающих различные типы рудных месторождений (порфиоровые, урановые, свинцово-цинковые, вулканогенные, полиметаллические, сульфидно-никелевые и др.), разработанные опытными геологами на основе общетеоретических положений и собственных взглядов и представлений. Таким образом, при работе с системой геолог-пользователь, обладая минимумом базовых знаний, необходимых для поддержания диалога с ЭВМ, может непосредственно использовать при своих прогнозных построениях знания и опыт ведущих специалистов, заложенные в компьютер.

Первое экспериментальное опробование системы ПРОСПЕКТОР было проведено с целью решения проблемы выбора участков, благоприятных на опоскование концентрированного молибдено-порфиорового оруденения. В качестве опытного полигона был выбран участок Маунт-Толман, расположенный в западной части шт. Вашингтон (США). Рассматриваемая территория имеет длинную историю поисков и мелко-масштабных разработок, причем промышленная разведка молибденита началась в 1964 г. и продолжалась различными компаниями вплоть до 1979 г., когда был предпринят описываемый эксперимент. К его началу в результате проведения буровых и геологоразведочных работ в районе был установлен ареал молибден-порфиорового оруденения.

Прогнозирование осуществлялось на основе экспертных моделей молибден-порфиорового оруденения. В качестве конечных морфологических элементов совокупности молибдено-порфиоровых месторождений рассматривались месторождения типа "капюшон" (Клаймакс, шт. Колорадо) и зонального вертикального цилиндра (Компачча, Перу). В каче-

стве исходных данных использовалась геологическая, геофизическая и геохимическая информация.

В систему вводилась информация о содержании флюорита, вольфрама, турмалина, пирротина, пирита, гидротермальных изменениях (включая калиевый метасоматоз, филлитизацию, грейзенизацию, пропицитизацию и т.п.), жидкостных включениях, интрузивных образованиях, геологических контактах, разломах, структурных элементах (радиальных, концентрических и куполовидных), магнитных аномалиях и аномалиях вызванной поляризации.

Диалог с машиной осуществлялся следующим образом. На основе заложенных в ЭВМ логических правил, устанавливающих вероятностные связи между конкретными, наблюдаемыми фактами и вытекающими из них "элементарными гипотезами", формировались вопросы пользователя. Например: "Имеет ли место калиевое изменение на участке прогноза?" Однозначный отрицательный ответ ("нет") на этот вопрос подразумевает максимальную вероятность интенсивного молибдено-порфирового оруденения. Положительный или отрицательный ответ сам по себе не является благоприятным, однако настраивают программу на режим задания вопросов, касающихся границ и ареала распространения калиевого изменения. В результате в компьютер вводится новая порция данных, которая в сочетании с предыдущей информацией может привести к весьма благоприятным выводам.

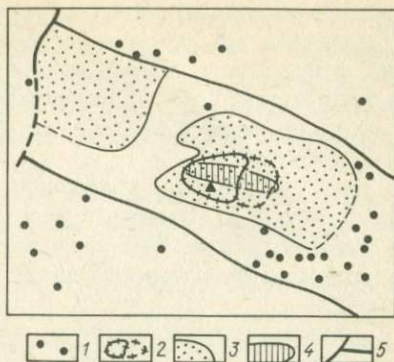
По вариантам прогнозирования, проводившегося с использованием молибдено-порфировых месторождений типа "капюшон" и зонального вертикального цилиндра, получены сходные результаты. Данный факт, по мнению организаторов эксперимента, свидетельствует о том, что месторождение Маунт-Толман по своей морфологии, по-видимому, занимает промежуточное положение между названными типами месторождений.

В результате практического опробования с помощью системы к северо-западу и юго-востоку от известного месторождения были выделены новые перспективные участки. На них были проведены разведочное бурение и детальные картировочные работы, что привело к открытию нового молибдено-порфирового оруденения, более крупномасштабного, чем открытое в 1978 г. В разрезе открытое месторождение имеет форму тарелкообразного кольца, венчающего крупный батолит. Морфологически оно весьма отлично от модельных месторождений. Несмотря на столь неожиданное различие, главным положительным результатом эксперимента было то, что система ПРОСПЕКТОР локализовала положение крупной, ранее неустановленной зоны минерализации в изучавшемся районе. Полная протяженность зоны интенсивной молибден-порфировой минерализации в районе Маунт-Толман объективно не могла быть установлена с большой точностью до проведения разведочных работ.

Сравнение результатов прогнозных оценок системы ПРОСПЕКТОР

Рис. 38. Молибдено-порфировое месторождение Маунт-Толман, открытое с помощью экспертной системы ПРОСПЕКТОР [23].

1 — мелкие рудные разработки; 2 — участок молибдено-порфирового оруденения, известный до 1978 г.; 3 — зоны минерализации, оконтуренные буровыми работами; 4 — зона наиболее интенсивной минерализации, оконтуренная буровыми работами; 5 — границы молибденового месторождения



с данными по геологии месторождения Маунт-Толман, полученными после проведения геологоразведочных работ на местности, показало следующее:

северо-западный участок (рис. 38), практически не изученный до прогноза, сейчас может рассматриваться в качестве нарушенной разломами и частично эродированной зоны молибдено-порфировой минерализации;

неперспективная территория между северо-западным и юго-восточным участками, по-видимому, представляет эрозионное разграничение частей ранее существовавшего более крупного месторождения;

перспективный участок, выделенный системой, полностью перекрывает месторождение в его современных границах. Часть участка, получившая наиболее высокую оценку, перекрывает зону максимальной минерализации. Более точные количественные результаты получены по данным буровых скважин;

юго-восточное окончание перспективной зоны совпадает с границей геохимического опробования. Возможно, месторождение продолжается и дальше на юго-восток, хотя и на большей глубине;

основной недостаток оценки, выработанной системой, заключается в том, что с ее помощью нельзя определить всю протяженность месторождения. Это связано с тем, что при прогнозе использовалась устаревшая и неполная информация, основанная на картографических данных главным образом для зоны калиевого изменения.

В результате осуществленного эксперимента доказана действенность и практическая значимость использования экспертной системы искусственного интеллекта, которая адекватно отражает ограниченные, но соответствующим образом подобранные и связанные элементы знаний и суждений в конкретной проблемной области и позволяет использовать их для практических нужд.

В последние годы в США разработаны экспертные системы для обработки геофизической информации, поисков нефти и газа и раздельного

прогнозирования их залежей, анализа сейсмических данных и другие. Практически все системы являются собственностью отдельных компаний, в силу этого в открытой печати практически отсутствуют какие-либо публикации, касающиеся этих разработок. Система ПРОСПЕКТОР в настоящее время используется при поисках месторождений нефти и газа на Аляске.

В Международном научно-исследовательском институте проблем управления Э.А. Немировским и Р.Р. Сейфуль-Мулюковым разработана экспертная система РИФ, предназначенная для анализа ситуаций, благоприятных для прогнозирования залежей в нестандартных ловушках [23].

Следует, однако, отметить, что применение экспертных систем не решает всех проблем прикладной и теоретической геологии. Эти системы содержат базы знаний, позволяют рекомендовать геологам варианты прогнозных решений и т.п. Они, образно говоря, позволяют геологам оперативно "получать консультацию" самых опытных специалистов, имитировать их участие в выработке прогнозного решения, ускорить приобретение опыта. Но эти системы в то же время в какой-то мере и "сковывают" собственную творческую инициативу и интуицию специалистов. Поэтому наиболее перспективен такой тип систем, который позволит объединить лучшие черты, присущие информационно-прогнозирующим, экспертным системам и системам комплексного анализа видеоизображений. Именно в этом направлении и развиваются сейчас исследования.

### **Глава 13. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЗ ДАННЫХ И ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ГЕОИНФОРМАЦИИ**

Стратегия социально-экономического развития отдельных регионов и стран во многом определяется фактическим состоянием и перспективами развития минерально-сырьевой базы. При этом минеральные ресурсы уже нельзя рассматривать лишь в качестве исходной базы для развития промышленности: значение их существенно возросло и затрагивает вопросы экономической политики, внешней торговли, технологии, экологии и т.д.

Проблема обеспеченности различными видами минерального сырья приобретает глобальное значение. Это обусловлено рядом взаимосвязанных причин: возрастающим дефицитом минерального сырья в связи

с ростом его потребления и невозобновляемостью природных источников; возрастанием доли удельных затрат на обеспечение минеральным сырьем в связи с увеличивающейся глубиной отработки запасов и удорожанием геологоразведочных работ; необходимостью учета экологических последствий изменения окружающей среды как следствия увеличения объема и глубины горных выработок.

Все это определяет необходимость использования комплексного системного подхода при анализе перспектив развития минерально-сырьевой базы при долгосрочном планировании.

Как показывает ретроспективный анализ обеспеченности мировой добычи минерального сырья разведанными запасами основных видов полезных ископаемых, сырьевой потенциал в мире еще далеко не использован. Надежное обеспечение промышленности всеми необходимыми минералами и рудами будет и впредь осуществляться (не считая таких важных аспектов, как комплексное использование сырья, его экономия и т.п.) путем проведения геологоразведочных работ во всех странах с учетом изученности геологического строения отдельных территорий и регионов и наличия в них различных рудных формаций.

Проблема управления перспективным развитием минерально-сырьевой базы заключается прежде всего в целенаправленной концентрации геологопоисковых и разведочных работ на конкретных территориях с тем, чтобы в наиболее короткие сроки и с минимальными затратами обеспечить непрерывное пополнение запасов полезных ископаемых. В соответствии с этим весьма актуальным вопросом становится повышение эффективности и конкретности геологического прогнозирования и оценки перспектив рудоносности отдельных территорий на основе комплексного системного подхода и применения новейших информационных технологий. Такой подход является весьма перспективным и открывает новые возможности как для интеграции усилий геологов, так и для дальнейшего развития прикладной геологии. Создание и использование человеко-машинных систем и региональных баз геологических данных определяют качественно новый этап развития традиционных методов геологического прогнозирования. Этот этап характеризуется формированием и многоцелевым использованием интегрированных баз данных, оперативным ретроспективным анализом накапливаемой информации, комплексным исследовательским прогнозированием в зависимости от различных факторов и геологических гипотез, новых открытий и решением сложных многопараметрических информационно-логических задач управления и оптимизации поисково-разведочных работ.

На рис. 39 приведена схема разработки вариантов развития минерально-сырьевой базы (МСБ) с использованием банков данных и человеко-машинных методов анализа геоинформации. Предлагаемая схема представляет собой технологический цикл расчета возможных вариантов развития МСБ и содержит четыре последовательно выполняемых этапа [21].

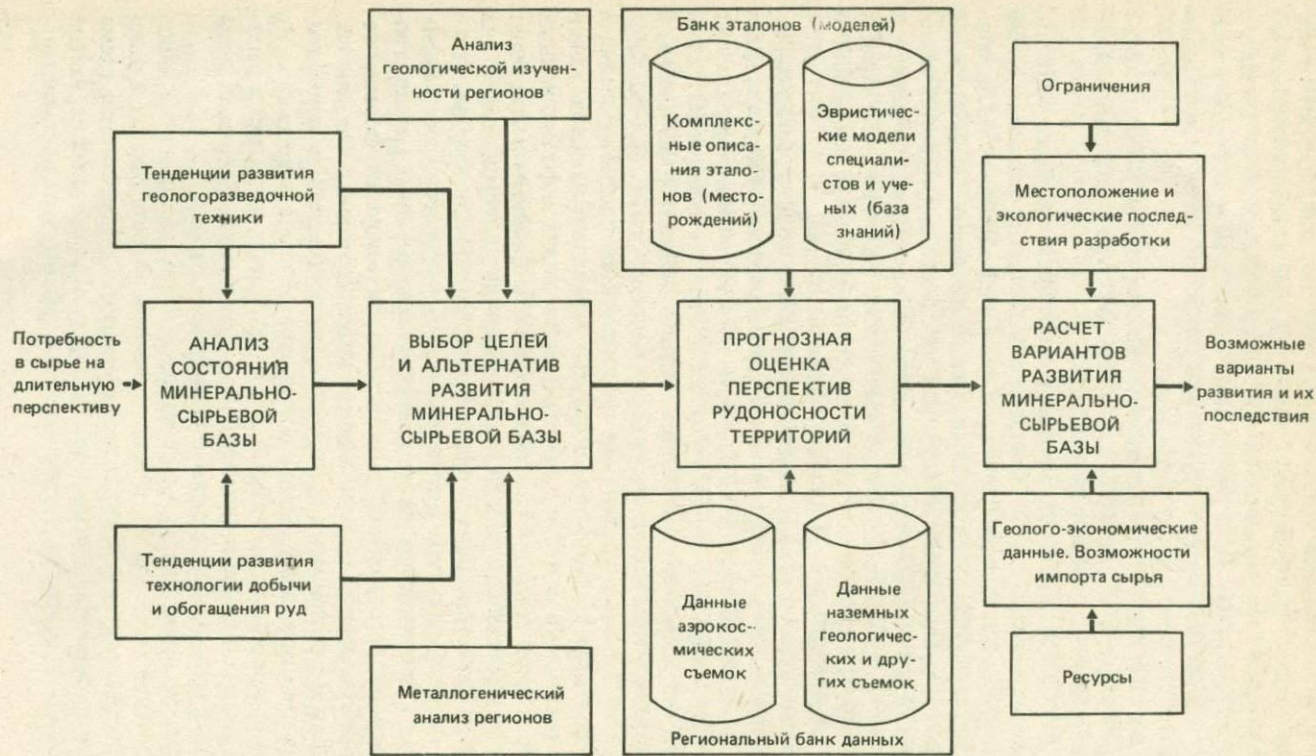


Рис. 39. Схема процесса прогнозирования минеральных ресурсов с использованием баз данных и человеко-машинных методов [21]

На первом этапе осуществляется анализ состояния МСБ, рассматриваются тенденции потребления сырья, оценивается его потребность с учетом выявленных и прогнозных запасов. Исходными данными для этапа являются задания государственных органов на перспективу. Такого рода анализ осуществляется с помощью информационно-поисковых и экспертных систем. На данном этапе используется машинный банк данных, содержащий сведения о наличии и об изменении величины запасов полезных ископаемых. При этом учитываются тенденции развития геологоразведочной техники и горной технологии добычи и обогащения полезных ископаемых.

На втором этапе осуществляется выбор целей и альтернатив перспективного развития МСБ. Основной задачей, решаемой на этом этапе, является составление рекомендаций, т.е. выбор стратегических направлений развития работ: металлогенических провинций, регионов и т.п. для последующего детального анализа и оценки перспектив их рудоносности как возможных объектов для постановки более детальных исследований. Специалисты, учитывая степень геологической изученности, металлогеническую специализацию, а также географическое размещение, на основе автоматизированных систем регионального прогнозирования определяют возможные альтернативные варианты стратегии перспективного развития геологических исследований.

На третьем этапе обозначаются конкретные перспективные площади, дается оценка их прогнозных ресурсов. Очевидно, на этом этапе имеются значительные возможности для сочетания традиционных способов геологического прогнозирования и использования современных методов и систем анализа и интерпретации многофакторной информации, сохраняемой в территориальных банках данных. При этом наряду со всевозможными математическими подходами могут использоваться эвристическое и имитационное моделирование, проверка концепций специалистов различных геологических школ и направлений. Применение такого подхода позволит более полно использовать огромные объемы накопленной геологической (в том числе картографической), геофизической и аэрокосмической информации. Весьма полезным является накопление и использование знаний специалистов и ученых о закономерностях размещения месторождений в виде эвристических решающих правил и моделей.

На четвертом этапе выполняются расчеты вариантов перспективного развития МСБ на основе использования экономико-математического моделирования. При этом учитываются различные геолого-экономические характеристики, технологии добычи и обогащения полезных ископаемых, экологические последствия отработки месторождений, имеющиеся материальные и другие ресурсы, возможности экспорта сырья и т.д. В настоящее время такого рода модели, реализованные в проблемно-ориентированных человеко-машинных системах, уже используются на практике.

Центральным звеном в рассмотренной схеме является третий этап — прогнозная оценка сырьевых ресурсов регионов, так как все перспективные варианты развития МСБ должны опираться на надежные геолого-экономические заключения о возможных запасах всех необходимых полезных ископаемых.

Предлагаемый подход к дальнейшему совершенствованию процессов прогнозирования минерально-сырьевых ресурсов, предусматривающий дополнение традиционных методов современными средствами хранения и обработки информации (базы данных и знаний, человеко-машинные методы и системы), позволит повысить качество и эффективность геологических прогнозных заключений, создаст предпосылки для использования методов экономико-математического моделирования вариантов развития минерально-сырьевой базы и управления на этой основе процессами поисков новых источников минерального сырья и их своевременного и сбалансированного освоения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные средства обработки и анализа данных, представляемые информатикой прикладной и теоретической геологии, позволяют решать все новые и новые задачи. В дальнейшем ЭВМ будут в возрастающих масштабах использоваться для теоретического моделирования геологических процессов и явлений как в локальном, так и в глобальном масштабах; прогнозирования новых источников топливно-энергетических и рудных ресурсов; прогнозирования альтернативных стратегий перспективного развития минерально-сырьевой базы.

Однако внедрение современных методов анализа геологической информации пока еще отстает от требований жизни. Одна из причин этого положения, препятствующая дальнейшему резкому повышению эффективности исследований в области теоретической и прикладной геологии, — не недостаток вычислительной техники в геологических организациях, а разобщенность исследований по ее практическому применению и отставание в обучении студентов и геологов навыкам пользования новыми человеко-машинными методами обработки и анализа геологической информации.

Имеющийся опыт проведения научных исследований и внедрения отдельных разработок в этой области свидетельствует о том, что такие методы воспринимаются широким кругом геологов и созвучны традиционной методике геологического прогнозирования. Их применение существенно повышает производительность творческого труда геологов.

Первоочередными мероприятиями, направленными на устранение указанных негативных явлений, будут следующие. *В научном плане:* дальнейшее развитие современных человеко-машинных методов и технологий, что соответствует внедрению достижений научно-технического прогресса в народное хозяйство ("электронизация" геологии). Составляющими компонентами в данном случае являются теоретическая и прикладная геология, информатика, кибернетика, математика, системный анализ и др. Это позволит создать надежную основу для широкого внедрения методологии вычислительного эксперимента в геологической науке и практике. *В организационном плане:* создание организаций принципиально нового типа — научно-инженерных центров (типа внедренческих фирм), проблемно-ориентированных на внедрение новейших научных достижений и разработок в практику; обучение геологов современным методам анализа информации; разработку наиболее прогрессивных технологий и человеко-машинных методов обработки данных и обеспечение переинтерпретации огромного объема накопленной геологической информации (в том числе картографической) в целях выявления новых источников минерального сырья.

Рассматриваемый подход к комплексному анализу геологической информации будет развиваться и совершенствоваться непосредственно

самими геологами. Как микроскоп открыл геологам новые возможности познания материального мира, так и информатика уже сейчас раскрывает широкие перспективы для дальнейшего прогресса геологической науки и практики. Эвристические модели, составленные крупными геологами и проверенные на практике, — это не искусственный, а "естественный интеллект", сохраняемый в базах знаний. Весьма перспективно также раскрытие механизма геологической интуиции при разработке вариантов прогноза и принятии решений о перспективах территорий. О. Куваев отмечал, что интуиция — лучшее обобщение опыта.

Нет сомнения в том, что в будущем не только в геологических экспедициях, но и в отдельных партиях и отрядах будут применяться персональные компьютеры, связанные (по радио) с мощными вычислительными центрами, базами данных и знаний. Это позволит совершенно по-новому оценивать перспективы исследуемых территорий, необычайно расширит кругозор и возможности геологов. Вся имеющаяся информация (от космоснимков до описания шлифов) будет использоваться с гораздо большей эффективностью, а технические средства, обеспечивающие такую обработку и анализ данных, будут для геологов XXI в. тем же, чем являлась в свое время логарифмическая линейка для инженеров. Методологические основы этого направления уже создаются и реализуются в настоящее время.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкиров Б.Г., Попов Ю.В. Вопросы прогнозирования крупных эндогенных месторождений. — В кн.: Экономика минерального сырья и геологоразведочных работ. М., ВИЭМС, 1981, 66—75 с.
2. Бугаец А.И., Дуденко Л.Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Л., Недра, 1976.
3. Васильев С.В., Зейлик Б.С., Яковлев В.А. Результаты опытно-производственного опробования системы РЕГИОН в пределах Казахстана. — В кн.: Проблемы управления перспективным развитием ТЭК стран — членов СЭВ. М., 1982, с. 238—244.
4. Воронин Ю.А. Исследование операций при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых. Новосибирск, Наука, 1983.
5. Еремеев А.Н. Системный метод при выделении и оценке геологических объектов. — Советская геология, 1976, № 2, с. 12—21.
6. Каждан А.Б. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых (научные основы поисков и разведки). М., Недра, 1984.
7. Каждан А.Б., Соловьев Н.Н. Поиски и разведка месторождений редких и радиоактивных металлов. М., Недра, 1982.
8. Кибернетика. Дела практические. М., Наука, 1984.
9. Куликовская И.И., Шумилин Г.М. О проектировании интерактивных графических систем. — В кн.: Методика комплексной обработки геолого-геофизической информации с помощью математических методов и ЭВМ при прогнозировании и оценке месторождений. М., вып. 2, 1977, с. 123—136.
10. Козловский Е.А., Питерский В.М., Комаров М.А., Кибернетика в бурении. М., Недра, 1982.
11. Количественная оценка прогнозных ресурсов полезных ископаемых с использованием человеко-машинной технологии / Б.А. Чумаченко, В.В. Марченко, Э.А. Немировский, В.А. Яковлев, Ю.К. Бахтадзе и др. — Советская геология, 1984, № 3, с. 3—11.
12. Константинов Р.М. Математические методы количественного прогноза рудоносности. М., Недра, 1979.
13. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Шишаков В.Б. Морфогеническая типизация меднопорфировых месторождений. — Советская геология, 1981, № 10, с. 28—40.
14. Кривцов А.И., Нарсеев В.А. Геологоразведочный процесс и прогнозно-поисковые комплексы. — Советская геология, 1983, № 1, с. 17—27.
15. Кусевич В.И., Зеликовский Л.П. Опыт построения моделей формирования месторождений (на примере рудных месторождений Южной Ферганы). — В кн.: Методика комплексной обработки геолого-геофизической информации с помощью математических методов и ЭВМ при прогнозировании и оценке месторождений. Вып. 1, М., 1975, с. 49—74.
16. Кушнарев И.П. Глубины образования эндогенных рудных месторождений. М., Недра, 1982.
17. Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. М., Наука, 1979.
18. Лаудон Т. ЭВМ и машинные методы в геологии. Под ред. Д.А. Родионова. М., Мир, 1981.
19. Линдсей П., Норман Ф. Переработка информации у человека. М., Мир, 1974.
20. Марченко В.В. Человеко-машинный анализ карт геологического содержания. — Советская геология, 1982, № 7, с. 13—26.
21. Марченко В.В. Совершенствование процессов регионального прогнозирования сырьевых ресурсов с использованием банков данных и человеко-машинных

систем. — В кн.: Проблемы управления развитием топливно-энергетического комплекса стран — членов СЭВ. М., 1982, с. 198 — 210.

22. *Марченко В.В., Немировский Э.А., Сапунков А.А.* Человеко-машинные системы анализа графических данных при геологическом прогнозировании. М., ВИЭМС, 1984.

23. *Марченко В.В., Немировский Э.А., Сейфуль-Мулюков Р.Р.* Прикладная геокибернетика. М., ВИНТИ, 1986.

24. *Металлогеническая карта региона БАМ. Масштаб 1:2 500 000. Объяснительная записка / Е.Е. Бельтнев, Ю.В. Богданов, В.Н. Гурьянова и др. Л., Недра, 1981.*

25. *Методика* прогнозной оценки сурьмяного оруденения с использованием автоматизированно-поисковой системы РЕГИОН. — Пристендовый лист ВДНХ-85. М., Мингео СССР, ПО "Аэрогеология", с. 1 — 4.

26. *Методика* решения поисковых задач при ГГК / М.Л. Сахновский, И.А. Ногина, П.А. Литвин, М.Б. Рыбаков. — В кн.: Глубинное геологическое картирование. Л., 1981, с. 206 — 234.

27. *Немировский Э.А.* О математических методах оценки перспектив рудоносности территорий. — В кн.: Применение математических методов и ЭВМ в горных отраслях промышленности. 17-й Международный симпозиум АПКМ-80. М., Наука, 1980, т. 2, с. 238 — 246.

28. *Опыт использования АИПС/ЕС РЕГИОН для прогнозирования месторождений полезных ископаемых (на примере рудных районов Казахстана) / В.Н. Грязнов, А.А. Сапунков, В.В. Марченко, С.В. Васильев и др. — В кн.: Применение математических методов и ЭВМ при обработке информации на геологоразведочных работах. Свердловск, 1980, с. 10 — 12.*

29. *Опыт прогнозирования нового для исследуемого района типа оруденения на основе использования человеко-машинной технологии / В.Н. Грязнов, В.В. Домчак, И.Ф. Бровчук и др. — Экспресс-информация, М., ВИЭМС, 1985, серия 7, вып. 10.*

30. *Опыт опробования человеко-машинных методов комплексной интерпретации геологической информации при решении задач прогнозно-металлогенического анализа в масштабе 1:1 000 000 (на примере Карпато-Балканской складчатой области) / В.В. Марченко, Э.А. Немировский, В.А. Яковлев и др. — Экспресс-информация, М., ВИЭМС, 1985, вып. 3, с. 9.*

31. *Опыт системного анализа при прогнозе и поисках оловянного оруденения / Л.М. Натапов, Ю.Н. Спомпор, Б.А. Чумаченко, В.В. Марченко и др. — Советская геология, 1983, № 8, с. 3 — 11.*

32. *Островский Э.Я., Урсов А.А., Конторович Р.С.* Целевой прогноз как принцип рационального комплексирования результатов геоизмерений. — Советская геология, 1984, № 11, с. 33 — 40.

33. *Основные принципы составления и условные обозначения металлогенических прогнозных карт рудных районов / Е.Т. Шаталов, А.В. Орлова, К.В. Яблокова и др. М., Недра, 1963, с. 194.*

34. *Павлов Б.Н., Корниенко А.И., Зеликовский Л.П.* Сравнительный анализ методик обработки гравимагнитных данных при оценке рудоносности площадей. — В кн.: Методика комплексной обработки геолого-геофизической информации с помощью математических методов и ЭВМ при прогнозировании и оценке месторождений. М., 1977, вып. 2, с. 73 — 86.

35. *Прохоров Ю.В., Родионов Д.А.* Формальная постановка задачи геологического прогнозирования. — В кн.: Математические методы при прогнозе рудоносности. М., 1977, с. 17 — 23.

36. *Результаты сопоставления эффективности различных алгоритмов распознавания образов при решении некоторых геологических задач / А.Н. Еремеев, Р.Г. Пи-*

нелис, Е.П. Власов, В.В. Марченко и др. — В кн.: Математические методы в геологии. М., 1975, вып. 2, с. 5—19.

37. *Рудоносность* и геологические формации структур земной коры. Л., Недра, 1981.

38. *Рудные формации Карпато-Балканской области* / И.П. Златогурская, Е.Г. Мартынов, В.А. Стахович и др. М., Недра, 1978, с. 240.

39. *Самарский А.А.* Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент. — Коммунист, 1983, № 8, с. 31—42.

40. *Сапунков А.А.* Технология автоматизированного формирования территориальных банков комплексных геологических данных. — Экспресс-информация, М., ВИЭМС, 1985, вып. 3, с. 12.

41. *Современное состояние и перспективы применения информационных и математических методов при прогнозировании и оценке рудоносности территорий* / Ю.И. Михайлова, А.А. Иванова, К.А. Маркова, И.А. Неженский, В.М. Терентьев. — В кн.: Математические методы, информатика и вычислительная техника при региональных геологических и прогнозно-металлогенических исследованиях. Л., 1978, с. 41—50.

42. *Соловов А.П.; Куршев П.А.* Опыт оценки прогнозных запасов металла по вторичным ореолам рассеяния. — В кн.: Геохимические основы поисков и прогнозирования рудных месторождений. Новосибирск, 1978, с. 150—163.

43. *Твалчрелидзе Г.А., Панцулая В.В.* Основные закономерности формирования и размещения месторождений полезных ископаемых на территории Грузии. — В кн.: Геология СССР. Т. X. Грузинская ССР. М., Недра, 1964, с. 9—31.

44. *Фаворская М.А.* Прогноз при поисках эндогенных рудных месторождений. — Советская геология, 1981, № 10, с. 20—28.

45. *Чумаченко Б.А., Власов Е.П., Марченко В.В.* Системный анализ при геологической оценке перспектив рудоносности территорий. М., Недра, 1980.

46. *Чумаченко Б.А., Немировский Э.А., Марченко В.В.* Система комплексного анализа наземных и космических данных для нужд геологии (Регион—СКАНДИНГ). — В кн.: Основные направления разработки количественных методов прогнозирования нефтяных и рудных месторождений. М-лы международного симпозиума. Алма-Ата, 1985, т. 1, с. 84—88.

47. *Шехтман П.А., Королев В.А.* Принципы прогнозирования геологических позиций крупных гидротермальных месторождений. — Изв. АН СССР, серия геологическая, № 9, 1979, с. 114—123.

48. *Ширяев Е.Е.* Новые методы картографического отображения и анализа геоинформации с применением ЭВМ. М., Недра, 1977.

49. *Широков В.Ф.* На пути к пятому поколению компьютеров. М., МНИИПУ, 1985.

50. *Gaal G., Sinding-Larsen R.* Mineral resource assesment by integration of geological, geochemical and geophysical data: an example from Finnish Lapland. — XXVII IGG., 1984, v. VIII, p. 392.

51. *Duda R.O., Gaschnig I.G., Hart P.E.* Model desgn in the PROSPECTOR consultant system for mineral exploration, — In: Expert systems in microelectronic age. Edinburgh Univ. Press., 1979, p. 153—167.

52. *Kasvand T.* Computerized vision for the Geologist. — J. for Mathematical Geology, 1983, 15, N 1, p. 3—24.

53. *Manuel T.* The pell-mell rush into expert systems forces integration issue. — Electronics, N 26, 1985, p. 54—59.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
Глава 1. Возможные пути повышения эффективности геологического прогнозирования . . . . .	8
✓ Глава 2. Основы методологии человеко-машинного анализа информации при геологическом прогнозировании . . . . .	20
✓ Глава 3. Принципы формирования территориальных машинных баз картографических геологических данных . . . . .	46
Глава 4. Информационно-прогнозирующие системы — современный инструментарий комплексного анализа геоинформации . . . . .	79
Глава 5. Человеко-машинные методы решения задач геологического прогнозирования . . . . .	99
Глава 6. Решение задач прогнозно-металлогенического анализа . . . . .	126
Глава 7. Выделение рудных узлов и полей по данным наземных и аэрокосмических съемок . . . . .	143
Глава 8. Прогнозирование рудных узлов, полей и месторождений медно-порфирового типа . . . . .	157
Глава 9. Прогнозирование рудных узлов и полей редкометалльных месторождений . . . . .	177
Глава 10. Прогнозирование нового для исследуемого района типа оруденения . . . . .	206
Глава 11. Количественная оценка прогнозных ресурсов . . . . .	212
Глава 12. Геологическое прогнозирование на основе искусственного интеллекта . . . . .	217
Глава 13. Совершенствование процессов прогнозирования минеральных ресурсов на основе использования баз данных и человеко-машинных методов анализа геоинформации . . . . .	222
Заключение . . . . .	227
Список литературы . . . . .	229

Гр. Юк.

4981

МЕДИА