

В.Г. Пономарев, Е.П. Вострокнутов, В.А. Акимцев

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА— ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТРАТИФОРМНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ



НОВОСИБИРСК 1991

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ И МИНЕРАЛОГИИ

В.Г. Пономарев, Е.П. Вострокнутов, В.А. Акимцев

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА—
ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СТРАТИФОРМНОГО
ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО
ОРУДЕНЕНИЯ

НОВОСИБИРСК 1991

УДК 553.04(571.51):681.32

ББК В19.11 Д451.3

П563

Пономарев В.Г., Вострокнутов Е.П., Акимцев В.А. Экспертная система - инструмент прогнозирования стратифицированного полиметаллического оруденения/ АН СССР, Сиб.отд-ние, Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. Науч. ред. Э.Г.Дистанов, Г.С.Федосеев.- Новосибирск, Изд. ОИГГМ СО АН СССР, 1991. - 119 с.

ISBN 5-7623-02-01-6

Освещается проблема применения экспертных систем в области прогнозирования месторождений полезных ископаемых. На основе оригинальных разработок дается описание технологии построения баз данных в системе "Генезис" - инструментальном средстве геолого-прогнозного комплекса. В качестве примера рассматривается геологическая модель прогноза стратиформного свинцово-цинкового оруденения Енисейского края и ее функциональная схема в экспертной системе.

Представляет интерес для специалистов, использующих математические методы и персональные компьютеры типа IBM PC XT/AT при решении задач геологического прогнозирования, а также для геологов, привлекающих новые методы и технологии прогнозирования месторождений полезных ископаемых.

Научные редакторы

д-р геол.-мин. наук Э.Г.Дистанов
канд. геол.-мин.наук Г.С.Федосеев

Рецензенты

д-р геол.-мин.наук А.А.Попов (КазИМС МГ СССР)
канд. геол.-мин. наук Э.Г.Кассандров (СНИИГТИМС МГ СССР)

ISBN 5-7623-02-01-6

© В.Г.Пономарёв, Е.П.Вострокнутов,
В.А.Акимцев, 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивная компьютеризация научного и производственного процессов заставляет искать новые формы взаимодействия пользователя и вычислительной машины, что приобретает особое значение в условиях широкого распространения современных ПЭВМ, способных имитировать логику рассуждения человека. Несмотря на то, что проблема искусственного интеллекта разрабатывается уже несколько десятков лет, реальные успехи в этой области можно, по-видимому, ожидать только с появлением машин пятого поколения, позволяющих коренным образом изменить технологию человеко-машинных взаимоотношений.

В последние годы в области автоматических методов обработки геологической информации значительное внимание уделяется экспертным системам (ЭС), которые призваны выполнять диагностические и консультационные функции. Они манипулируют знаниями специалистов (экспертов) на основе символической логики. Привлекательность подобных разработок обусловлена их способностью реализовывать одну или несколько версий по принятию решений. ЭС широко применяются в медицине, технике, военном деле и других областях. Геологические же науки в этом отношении занимают довольно скромное место, хотя истоки первых разработок и успешного применения ЭС связаны именно с геологией (PROSPECTOR). Поэтому появление новых работ по данной тематике является достаточно актуальным, тем более, что авторы предлагаемой вниманию читателя книги — геологи, занимающиеся созданием оригинальных методов обработки геологической информации. Читатель найдет здесь сведения по идеологии и технике конструирования ЭС: описываются главные типы систем компьютерного прогнозирования на основе различных моделей представления геологических знаний, обращается внимание на специфику обработки "нечеткой" информации, обсуждаются преимущества ЭС-оболочек, и становится

очевидным, что создание ЭС — творческий процесс, связанный с решением множества вопросов: выбор или создание специализированного языка для описания базы знаний, разработка схем логического вывода, элементаризация процесса создания базы знаний и др.

Осознание полезности ЭС, которые нередко именуются гибридными интеллектуальными системами, не всегда однозначно: некоторое недоверие к ним носит чисто психологический характер, так как отладка системы — интерактивный процесс, создающий иногда ложное впечатление механической "подгонки" работы системы под конечный результат. Во второй главе показано, что эти действия необходимы как своеобразная калибровка (эталонирование) системы. Более того, для создания ЭС необходимы так называемые проблемно-ориентированные языки программирования, которые (в отличие от традиционных) направлены на отражение логических отношений, а не на обработку числовых данных.

ЭС являются своеобразными концентраторами достижений в определенной предметной области, поскольку не только содержат и хранят новейшие данные, но и обеспечивают прямой доступ (через открытые файлы) к знаниям наиболее опытных специалистов. Непременное свойство современных ЭС — превосходство над пользователем по уровню компетентности: только в этом случае они могут обеспечить свое предназначение — стать "практически интересными и полезными". В процессе диалога с машиной обязательно происходит структурирование знаний, корректируются представления об исследуемых объектах. Пользователь путем введения априорных или вычисленных вероятностей активно влияет на результаты, что, естественно, не снимает профессиональной ответственности за окончательно принятые решения. Качество же ЭС зависит от того, насколько точно понят и реализован механизм построения заключений на базе логически осмысленных эвристических категорий и понятий. В этой связи самостоятельный интерес для специалистов представляют заключительные главы, в которых рассмотрены типовые ситуации возникновения полиметаллического оруденения, подробно описываются ведущие факторы, предопределяющие генетическую специфику изученных объектов, обсуждаются результаты конкретной реализации разработанной экспертной системы "Генезис" с вложенной в нее моделью "АНГАРА".

Г.С.Федосеев

ВВЕДЕНИЕ

Повышение экономической эффективности геолого-разведочных работ осуществляется, с одной стороны, за счет технического перевооружения геологической службы, а с другой - благодаря дальнейшему совершенствованию методических приемов прогнозирования и более четкой организации поисковых и оценочных работ. В основе методики традиционного прогнозирования лежит система геологических и генетических критериев и признаков (геотектонических, металлогенических, рудно-формационных, магматических, литолого-фациальных, минералого-геохимических, геофизических и генетических (источник - перенос - концентрация)). Анализируя комплекс таких признаков, можно предсказать области возможной локализации оруденения, его размеры и качество / 29,57,58,66 /. Ошибки прогноза, как правило, обусловлены неоднозначностью информации о геологическом строении исследуемой территории и непосредственно о самом объекте, а также сложностью используемых прогнозных процедур, требующих одновременного учета многих критериев. Кроме того, поток геологической информации, собираемой на четырех уровнях: космос - воздух - земля - скважина, все время растет. Сегодня стало очевидным, что он не может быть эффективно переработан традиционными способами. Как следствие, значительная часть дорогостоящей информации не востребуется из фондов. "Невооруженному" интеллекту геолога все труднее охватить сотни параметров, составляющих описание объекта, и выявить среди них те главные, которые позволят ему сделать верное прогнозное заключение.

Выход из, казалось бы, тупиковой ситуации наметился благодаря разработке компьютерных прогнозирующих систем. Исследования в этом направлении ведутся с 60-х годов. При этом изучаются как методические основы традиционного процесса прогнозирования для придания им математической основы / II /, так и конкретные методики компьютерного прогнозирования, что позволило создать ряд производственных прогнозирующих систем / 20,27,61 /. Последние базируются не на традиционных методах решения прогнозных задач, имеющих, как правило, качественный характер, а на количественных моделях, применяемых в математической статистике и теории распознавания образов.

Применение количественных методов компьютерного прогноза имеет несомненные преимущества, так как позволяет упорядочить процедуру прогнозирования, ограничить субъективизм, присущий традиционному процессу прогноза, учесть практически неограниченный материал. Однако количественным методам свойственны и принципиальные недостатки. Являясь по существу формальными, они не могут учитывать содержательные представления о возможных процессах возникновения месторождений. Кроме того, часто без внимания остаются существующие ограничения привлекаемых математических моделей, например, по типам распределений, классам объектов в пространстве признаков и т.д.

В последнее десятилетие в различных областях науки и техники отмечается активное внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ), представляющих математическую основу для реализации на ЭВМ задач, для решения которых требуется обработка "знаний", а не просто "информации" / 39,53,71 /.

Такой подход был развит в так называемых экспертных системах / 52,54,80,82 /, которые уже успешно внедрены в такие области, где компьютеры раньше либо не применялись, либо их использование было связано с существенными трудностями: постановка медицинского диагноза, управление сложными техническими системами, обработка естественного языка / 34,67,72 /. Главное различие между вышеупомянутыми программами и ЭС заключается в их структуре. В экспертных системах не используется фиксированная логика, а включается база знаний, которая содержит все правила, необходимые для выполнения задач геопрогноза. Качество ЭС зависит от качества правил базы знаний и эффективности работы модуля вывода.

Общая цель применения ЭС в геолого-прогнозных исследованиях состоит в том, чтобы представить в виде компьютерных программ неоднозначные, нечеткие, неструктурированные знания, которыми оперирует опытный геолог, решая прогнозные задачи / 6 /. Методы ИИ формировались как методы решения интеллектуальных проблем, основанных на знаниях, и они моделируют процесс решения задач человеком.

Для решения проблемы геопрогноза в КазИМС была разработана система "Генезис" / 7,12,13,83 /. Это экспертная система - "пультышка", предназначенная для целенаправленного геологического

прогнозирования. Она позволяет пользователю создавать базу знаний по различным типам полезных ископаемых (медно-порфировым, свинцово-цинковым, колчеданно-полиметаллическим и т.д.), при этом общая структура системы остается без изменения. Качество и точности работы ЭС "Генезис" зависят в итоге от качества и точности знаний, представленных экспертами. Система ведет работу с пользователем в интерактивном режиме, и вполне доступна неподготовленному пользователю. В настоящее время система "Генезис" реализована с использованием различных технических и программных средств: на персональных компьютерах, совместимых с IBM PC/XT/AT в среде MSDOS, на компьютерах, совместимых с PDP-11 - минисистемах CM-1420, CM-1600 и др., в среде RSX-11 и их микро-аналогах ДВК-3, ДВК-4, в среде RT-11. Описание экспертной системы, данное в работе, в равной степени применимо к любой из реализаций.

В основу книги лег опыт работы с ЭС "Генезис" по прогнозу стратиформного свинцово-цинкового оруденения в терригенно-карбонатных толщах докембрия Сибири. Геологические модели и база знаний ЭС "Ангара" разработаны нами на материале свинцово-цинковых месторождений Ангарского рудного района на Енисейском крае. Они могут быть использованы и для прогноза других рудных объектов в контурах Сибирского периплетформенного полиметаллического пояса / 49 /.

Авторы искренне благодарны научным редакторам д-ру геол.-мин. наук Э.Г. Дистанову и канд. геол.-мин. наук Г.С. Федосееву, добрые советы которых, несомненно, способствовали улучшению содержания работы, а также сотруднику отдела геофизики КазИМС канд. техн. наук А.И. Вострокнутовой, принявшей участие в разработке системы "Генезис", и сотрудникам лаборатории эндогенного рудообразования ИГ СО АН СССР М.Н. Шкляевой и С.Ю. Ярошевской за помощь в оформлении рукописи в печать.

Глава I. ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Для того, чтобы определить место компьютеризации в геологии, представим принципиальную схему процесса прогнозирования. На основе публикаций / 1, 29, 48, 57, 58, 64 / можно сделать вывод, что хотя особенности конкретного вида минерального сырья и влияют на используемые методики прогнозирования, но общи принципы его построения остаются неизменными. В исследуемом районе процесс прогнозирования включает в себя взаимосвязанные стадии, задача каждой из них состоит в последовательном уменьшении размеров прогнозируемых участков. Для этого на любой стадии проводятся все более детальные геологические, геохимические, геофизические, экономические исследования, на которых основывается заключение о перспективности тех или иных прогнозных территорий.

Оценка перспективности определяется теоретическими представлениями экспертов-геологов, проводящих прогноз. На каждой стадии он состоит из двух растянутых во времени и перекрывающих друг друга этапов, кроме того, по мере появления новых данных может быть произведена переоценка результатов прогноза.

Первый этап необходим для выработки поисково-оценочных критериев. Задачей экспертов является установление связи между совокупностью геологических признаков и масштабами оруденения. Наряду с генетическими построениями для этого широко используется метод аналогий (с учетом специфики геологического развития объекта) и классификационные процедуры, необходимые для выделения однородных в том или ином отношении геологических блоков. На втором этапе — собственно прогнозе — поисково-оценочные критерии привлекаются для выработки прогнозных заключений на данный тип полезного ископаемого. Задача экспертов — содержательный геологический анализ территории для выделения прогнозных единиц, для которых сочетание поисково-оценочных критериев благоприятно для локализации оруденения. При этом также используются метод аналогий и классификационные построения.

Эффективность прогнозного процесса определяется его первым этапом, основой которого являются опыт и знания геолога. Однако для разработки содержательных моделей требуется длительное время, кроме того, это сопряжено с принципиальными трудностями,

связанными с отсутствием подробных физико-химических моделей, достаточного объема геологических данных и т.д. Поэтому наряду с построениями, основанными на представлениях о способах формирования рудных залежей, используется подход, базирующийся на выявлении пространственных закономерностей размещения оруденения, что позволяет "напрямую" связать прогнозно-поисковые критерии с оруденением, и в ряде случаев дает приемлемые результаты.

Применения компьютерных систем для геологического прогнозирования до сих пор базировалось на методах выявления пространственных закономерностей размещения оруденения. Для этого привлекались процедуры количественного анализа данных на базе вероятностно-статистических методов или методов распознавания образов. Основываясь на достаточно обширных наборах эталонных объектов, описываемых по единой системе признаков, обычно сначала выделяются информативные признаки (т.е. устанавливаются прогнозно-поисковые критерии), которые затем используются в процедурах распознавания образов.

Применение количественных методов анализа пространственных закономерностей размещения геологических объектов имеет несомненные достоинства: упорядочивает процедуру прогнозирования, ограничивает субъективизм, присущий традиционному процессу прогноза и позволяет учесть большой фактический материал. Однако этому подходу присущи и очевидные недостатки. Прежде всего количественные методы являются формальными методами, которые не учитывают содержательных особенностей исследуемых данных. С другой стороны, часто без внимания остаются имеющиеся принципиальные ограничения математических моделей.

Эти недостатки могут быть исключены при внедрении в геологическое прогнозирование технологии экспертных систем / 6 /, позволяющих представить в виде компьютерных программ и использовать те знания, которыми обладает и пользуется опытный геолог, решающий прогнозные задачи. Методы ЭС формировались как методы решения интеллектуальных проблем – они моделируют процесс решения задач человеком и предоставляют возможность для сбора, хранения и использования знаний экспертов-геологов. ЭС позволяет накапливать как общие знания, так и индивидуальный опыт экспертов и затем применять их для решения практических задач прогноза.

Типы прогнозных моделей

Рассмотрим основные типы используемых при компьютерном прогнозировании моделей. В порядке уменьшения формальной строгости и, соответственно, расширения области использования можно выделить: вероятностно-статистические, распознавания образов и эвристические, дескриптивно-логические и экспертные модели.

Вероятностно-статистические модели. Для решения прогнозных задач применяется широкий класс статистических моделей / 5,68 /: обработка наблюдений и одномерная статистика – вычисление статистических параметров, доверительных интервалов, оценка типа распределения; пространственное изучение параметров – интерполяция, аппроксимация, сглаживание, регрессионный анализ; анализ закономерностей – корреляционный анализ, метод главных компонент, дисперсионный, регрессионный, дискриминантный методы анализа; построение классификаций – методы автоматических классификаций, основанных на обобщенных расстояниях, кластерный анализ, различные методы факторного анализа, методы потенциальных функций.

Вероятностно-статистические модели наиболее обоснованы в математическом отношении. Теоретически они должны давать меньшее количество ошибок, чем эвристические методы, так как решающие правила в них строятся так, чтобы минимизировать число ошибок во всей совокупности выборок, порожденных принятым распределением. Но в реальных прогнозных задачах на основе эмпирического материала можно определить лишь вероятность того или иного теоретического распределения. Неверный выбор типа распределения или неверное определение параметров распределения может привести к тому, что надежность статистических методов будет гораздо ниже надежности эвристических. Другая трудность состоит в том, что обычно имеется только небольшое число продуктивных и заведомо непродуктивных объектов – даже несколько десятков объектов того и другого класса слишком мало для сколько-нибудь достоверного разделения их в реальных задачах. Поэтому полученное решающее правило может давать результаты весьма далекие от истинных.

М о д е л и р а с п о з н а в а н и я о б р а з о в .
Интерес к распознаванию образов в прогнозировании традиционен / 16,62,70 /, поскольку геопрогноз строится путем "комплекс - ной" интерпретации косвенных признаков, взаимно дополняющих друг друга. Для содержательной интерпретации данных необходимо создание модели объекта исследования, учитывающей все имеющиеся признаки. Поскольку признаки, как правило, разнородны, то содержательную модель удастся создать только для простых ситуаций, включающих небольшое число параметров. В этом типе моделей прогнозные объекты естественно представляются с помощью формализмов распознавания образов в многомерном признаковом пространстве. Если удовлетворительное решающее правило найдено, то действительно будет использована информация о совокупности прогнозных признаков, большая, чем информация по отдельным признакам. Однако построению удовлетворительного решающего правила могут помешать особенности исследуемых данных. В частности, должны выполняться предположения о компактности (в многомерном пространстве точки, принадлежащие каждому образу, лежат компактно) и разделимости (точки, принадлежащие различным образам, лежат раздельно, не перемешиваясь). Большое значение также имеет представительность материала обучения, поскольку в методах распознавания образов минимизируется число ошибок только для используемой выборки.

В настоящее время используется большой набор эвристических алгоритмов, предназначенных для решения прогнозных задач / 5,20,27 /: образ, обобщенный портрет, тупиковые тесты и тесты, голотип и ряд других.

Д е с к р и п т и в н о - л о г и ч е с к и е м о д е -
л и м о г у т б ы т ь о т н е с е н ы к м о д е л я м р а с п о з н а в а н и я о б р а з о в , х о т я и м е ю т с у щ е с т в е н н ы е о с о б е н н о с т и . П р и м е р о м т а к о г о д е с к р и п т и в -
н о г о а л г о р и т м а я в л я е т с я "К о р а - 3" / 16 /. О п и с а н и е о б ъ е к т о в в э т о м а л г о р и т м е п р е д с т а в л я е т с я в в и д е д в о и ч н о г о в е к т о р а , к а ж д ы й р а з р я д к о т о р о г о с о о т в е т с т в у е т о п р е д е л е н н о м у л о г и ч е с к о м у в ы с к а -
з ы в а н и ю (з н а ч е н и ю д в о и ч н о г о п р и з н а к а) . С н а ч а л а , о с н о в ы в а я с ь н а н а б о р е о п и с а н и й п р и м е р о в п р о д у к т и в н ы х и н е п р о д у к т и в н ы х о б ъ е к -
т о в , п р о и з в о д и т с я о б у ч е н и е . П р и э т о м п у т е м п е р е б о р а о п р е д е л я -
ю т с я н а и б о л е е и н ф о р м а т и в н ы е в ы с к а з ы в а н и я и и х к о м б и н а ц и и . З а -
т е м н а э т а п е р а с п о з н а в а н и я с т р о и т с я л о г и ч е с к о е р е ш а ю щ е е п р а в и -

ло, используемое для отнесения объекта к тому или иному классу.

Преимуществом логического подхода является то, что здесь делаются попытки моделировать логику рассуждений человека. И хотя эффективность логических алгоритмов не превосходит эффективности других методов распознавания, большое значение имеет простота содержательной трактовки решающих правил.

Э к с п е р т н ы е м о д е л и позволяют использовать для прогноза все те виды специальных знаний, которыми обладает опытный геолог-эксперт. При этом могут быть вовлечены как общие геологические представления, так и эвристические знания, т.е. знания, не зафиксированные в явном виде. Это существенно увеличивает эффективность компьютерных прогнозных систем, приближая обеспечиваемый ими уровень прогноза к уровню прогноза опытных экспертов.

По сравнению с другими типами компьютерных моделей в экспертных резко уменьшаются требования к данным за счет того, что наборы признаков, описывающие прогнозные объекты, могут не совпадать на разных объектах. Одновременно учитываются как качественные, так и количественные признаки. Это дает возможность учесть практически всю геологическую информацию, имеющуюся по району прогноза.

Отрицательной стороной экспертных моделей является отсутствие четкой формально-логической основы, субъективизм, неоднозначность и нечеткость, что приводит к необходимости использования трудоемких процедур проверки знаний эксперта. Но такая работа дает и положительный эффект. Эксперт, работая с компьютерной программой, требующей от него однозначных решений, пытается представить свои знания в логически непротиворечивой форме. После того, как база знаний построена, знания, помещенные в нее, становятся доступными другим экспертам, что позволяет сравнить прогнозные процедуры и выявить существо имеющихся несоответствий.

По степени участия геолога в процессе решения прогнозных задач системы компьютерного прогнозирования могут быть отнесены к одной из следующих технологий / I6,20,27,8I /: формализованной, человеко-машинной или экспертной.

Ф о р м а л и з о в а н н ы е т е х н о л о г и и . Суть их состоит в том, что на основе имеющихся математических методов строятся формальные модели в расчете на получение в оговоренных условиях некоторого "оптимального решения". При этом пытаются связать рудоносность территории с комплексом имеющихся геолого-геохимических и геофизических данных, не рассматривая содержательные аспекты этой связи. Уже после построения схемы решения происходит полное "отчуждение" геолога от дальнейшего процесса прогноза. Примером могут служить решения прогнозных задач на основе статистических пакетов.

Ч е л о в е к о - м а ш и н н ы е т е х н о л о г и и также широко используют формально-логические модели, базирующиеся на методах математической статистики и теории распознавания образов, но эксперту-геологу предоставляется возможность участвовать в процессе решения задач на всех стадиях. Используя содержательную информацию о районе исследования, эксперт формулирует такие статистические гипотезы, проверка которых автоматизированной системой дает ему возможность делать заключения о достоверности содержательных прогнозных построений.

Преимуществом формально-логического подхода является разработанный математический аппарат, который гарантирует решение любой задачи, если она переведена на соответствующий формальный язык. Поэтому основная трудность использования формально-логических моделей состоит в необходимости "перевода" с содержательного (геологического) языка на формальный (математический) и затем содержательной интерпретации - обратном "перевode" на геологический язык. Таким образом, проблемы, возникающие при решении прогнозной задачи, переходят из области собственно решения в область "перевода". Соответственно, критерием качества человеко-машинной системы является то, какие возможности для "перевода" система предоставляет пользователю. Поскольку "перевод" неоднозначен, то для решения практических прогнозных

задач, как правило, рассматриваются альтернативные модели, задача решается много раз с различными данными и выбирается "лучший" результат. При этом большое значение при выборе решения имеет априорная информация, выходящая за рамки используемой математической модели, что позволяет резко сократить количество получаемых решений.

К сожалению, в большинстве существующих прогнозных систем проблемы "перевода" не рассматриваются в явном виде, и лишь в единичных случаях этот процесс включается в технологический цикл работы пользователя. Например, в прогнозирующей системе АЛИСА / 20 / задается формальная схема всего процесса прогноза, включающая в себя обоснованные процедуры для всех стадий перевода с содержательного языка на формальный и обратно.

Э к с п е р т н ы е т е х н о л о г и и основываются на использовании содержательных моделей формирования месторождений полезных ископаемых в том виде, в каком они представляются геологом-экспертом, что исключает необходимость использования формальных процедур. Тем самым решается проблема "перевода" и делается возможным непосредственное общение геолога с компьютерной системой без участия математика или программиста. Этому способствует также возможность ЭС "объяснять" пользователю сделанные системой заключения.

В настоящее время техника разработки ЭС еще далека от совершенства. Существующие теоретические представления не имеют единой основы, а ЭС применяется только в ограниченных предметных областях. Но, вместе с тем, исследования, проводимые в этом направлении, уже показали большие потенциальные возможности ЭС, развитие которых ведет к созданию принципиально нового типа отношений между человеком и компьютером и, возможно, к изменению направления развития вычислительной техники в целом

/ 79 /.

Возможности экспертных систем для представления знаний

История создания ЭС имеет глубокие корни. Специалисты в области программирования и информатики всегда стремились заставить компьютер решать задачи теми способами, какими пользу-

ется человек / 25,71 /. В начале 60-х годов они пытались отыскать общие методы решения интеллектуальных задач. Однако это не привело к успеху — чем шире был класс решаемых задач, тем беднее оказывались возможности метода при решении конкретной проблемы. В 70-е годы основные усилия сосредоточились на раз — работке методов представления задач и методов поиска их решения. Но и эта стратегия не принесла существенных результатов. И, наконец, в 80-е годы стало понятно, что эффективность решения практических задач зависит от знаний, которыми обладает компьютер. Чтобы компьютер стал по настоящему интеллектуальным, он, так же как и эксперт-геолог, должен обладать специальными знаниями, т.е. "лучше быть многознающим, чем умным" (Э.Фейгенбаум). Такие программы решения практических задач и получили название ЭС.

Но если ЭС решают задачу как человек, то зачем их разрабатывать, в чем их преимущество перед экспертами? Ответ заключается в том, что знания, особенно специальные, представляют большую ценность — поэтому они должны тщательно сохраняться и разумно использоваться: 1) если эксперт должен постоянно поддерживать свою компетентность, то знания, помещенные в ЭС, сохраняются навсегда; 2) знания, хранящиеся в ЭС, легко размножать, их легко изучать; 3) результаты, полученные ЭС, более устойчивы и легко воспроизводимы, поскольку компьютер не подвержен действию эмоциональных факторов и, наконец, 4) "рабочее время" ЭС имеет низкую стоимость, по сравнению со стоимостью времени квалифицированного эксперта.

Все это не только оправдывает разработку ЭС, но и в ряде случаев делает их незаменимыми. Типичными областями применения ЭС являются / 72,80 /: военное дело, геология, инженерное дело, информатика, компьютерные системы, космическая техника, математика, медицина, метеорология, промышленность, сельское хозяйство, управление производственными процессами, физика, химия, электроника, юриспруденция. Наибольшее число реализаций ЭС имеется в медицине, далее идут химия, компьютерные системы, электроника, инженерное дело и геология.

Первой геологической ЭС была PROSPECTOR / 72,82 /. До настоящего времени это наиболее грандиозный проект ЭС для геологического прогнозирования. Он разрабатывался в Стенфордском

исследовательском институте (США) с 1974 по 1983 гг., и сегодня PROSPECTOR рассматривается как классический пример ЭС. Среди других геологических приложений ЭС можно отметить следующие / 6 /: интерпретация данных каротажа (ЭС ELAS, DIRMETER, ADUIOR, LITHO), проведение бурения и эксплуатация скважин в нефтяной геологии (ЭС HIDRO, MOD SIMMIUS, SECOPOR), идентификация минералов в шлифах (ЭС KBS), идентификация палеонтологических образцов (ЭС FOSSIL), геологическое прогнозирование (ЭС EXPO, PROSPECTOR).

Среди отечественных разработок преобладают ЭС в области медицинской диагностики / 52 /. Геологические прогнозирующие ЭС в широко доступной литературе не описаны, но существуют несколько прогнозирующих систем, основанных на методах распознавания образов и вероятностно-статистических методах, которые, по оценкам их авторов, обладают рядом интеллектуальных свойств / 27,81 /. Разработанная нами ЭС "Генезис" / 7,13,83 / подробно описывается в следующей главе.

Базовые структуры ЭС

Целью создания ЭС является разработка программных систем, имитирующих на компьютере мышление человека. Для создания такой системы необходимо изучить процесс мышления эксперта, принимающего решения в определенной предметной области, выделить основные шаги этого процесса и затем воспроизвести их на компьютере. Основой человеческого интеллекта являются знания /25, 55,59 /. В общем интеллект можно представить как совокупность: 1) правил, представляющих знания; 2) фактов, отражающих состояние предметной области, в которой ведется рассуждение, и 3) способов их использования для достижения целей, стоящих перед экспертом.

Для достижения целей эксперт не только находит решение поставленных задач, но одновременно приобретает новые знания. Это происходит всякий раз, когда на основе известных фактов и имеющихся знаний делаются заключения, т.е. подтверждаются или опровергаются новые гипотезы. Интеллектуальным процессом, при помощи которого на основе имеющихся знаний и фактов выводятся заключения, является механизм логического вывода.

Для того, чтобы можно было говорить об искусственном интелекте, ЭС должны иметь все элементы, составляющие процесс принятия решений человеком - цели, факты, правила, гипотезы и механизм логического вывода. В ЭС такое ограниченное множество правил, фактов и гипотез, предназначенное для достижения конкретных целей, называется базой знаний / 54 /. Конкретные значения фактов, описывающих определенную ситуацию, сложившуюся в предметной области, составляют базу данных ЭС / 18 /.

Базовая структура ЭС и выполняемые ею функции показаны на рис. 1. В общем случае ЭС состоит из следующих частей: 1) механизма представления знаний в конкретной предметной области и управления знаниями (базы знаний); 2) базы данных ЭС, которая содержит информацию, однажды введенную пользователем, для использования в процедурах логического вывода; 3) механизма получения знаний от эксперта, поддержки базы знаний и ее пополнения (модуль приобретения знаний); 4) механизма, который, используя базу знаний, способен делать логические выводы (модуль логического вывода); 5) механизма, который должен объяснять пользователю мотивировку получения ЭС заключений (модуль объяснения); 6) механизма для передачи ответов пользователю и получения информации от пользователя и эксперта в приемлемой для них форме (пользовательский интерфейс).

Технологию построения ЭС называют инженерией знаний. В процессе построения ЭС инженер по знаниям работает с одним или несколькими экспертами в некоторой предметной области. Инженер по знаниям "извлекает" из экспертов процедуры, стратегии, эмпирические правила, используемые ими при решении задач, и помещает эти знания в ЭС. Можно выделить шесть этапов в разработке базы знаний ЭС / 52, 54 /: идентификации, концептуализации, формализации, реализации, тестирования и оценки. На первом этапе определяются границы области автоматизации и цели, которые должны быть достигнуты в процессе автоматизированного решения задачи. Концептуализация определяет основные понятия, необходимые для представления знаний и описания решения задачи. Выделяются также подзадачи и способы их решения. Этап формализации связан с отражением ключевых понятий и отношений на языке описания знаний инструментальной экспертной системы. Реализация предполагает ввод знаний с помощью языка описания зна-

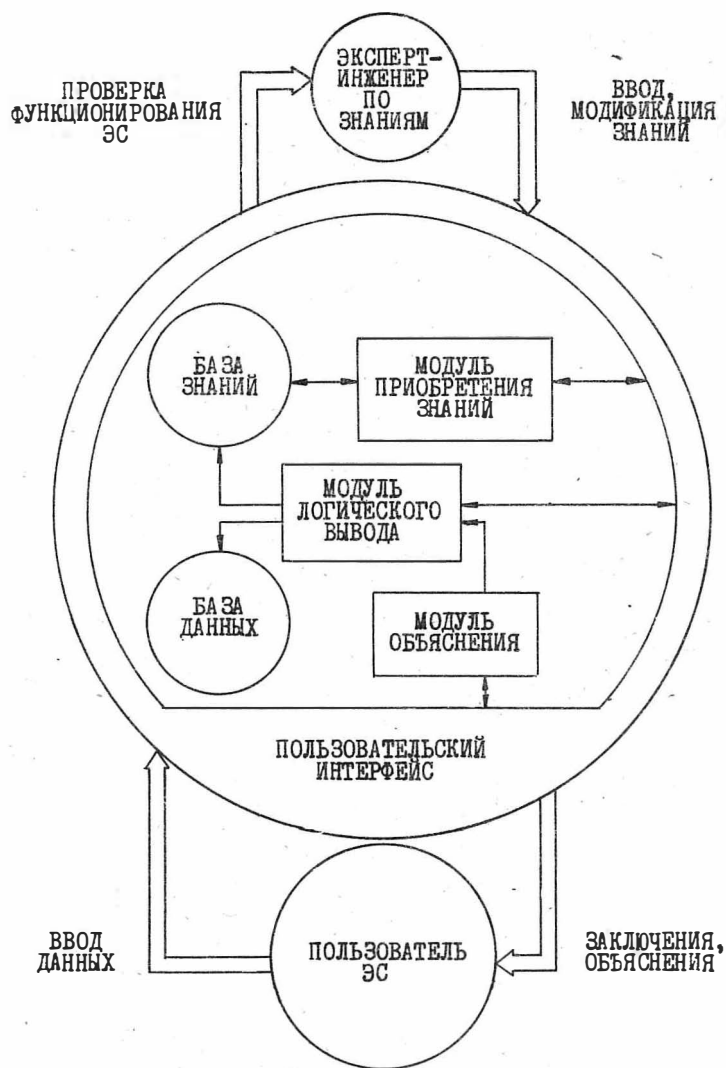


Рис.1. Общая структура экспертной системы (пояснения см. в тексте).

ний, в "пустую" ЭС. Множество понятий, правил, фактов определяет первую версию базы знаний, которая теперь может быть подвергнута контрольным испытаниям на примерах прогнозных объектов. В ходе этапа тестирования производится проверка экспертиз, осуществляемых с помощью ЭС, и корректировка базы знаний с целью доведения ее до уровня, сравнимого с уровнем эксперта-специалиста. Этап оценки обычно производится после окончания работ над моделью знаний. Его результатом является общая оценка разработанной модели, позволяющая установить, действительно ли достигнуты цели, поставленные при проектировании базы знаний. Перечисленные этапы создания базы знаний не являются детально определенными, они только в общих чертах представляют сложный процесс извлечения знаний. К тому же изменения на одних этапах могут потребовать изменений на других.

Когда созданный вариант базы знаний будет удовлетворительно решать задачи экспертизы, проектировщики базы знаний (эксперт и инженер по знаниям) могут поставить новые и уточнить старые задачи, реализовать их в ЭС, дополнив или изменив модель знаний, и подвергнуть ее новой проверке. Такой цикл обычно повторяется несколько раз, так что разрабатываемая в ЭС база знаний эволюционирует и позволяет перейти от решения простых задач к более сложным.

Средства для создания ЭС в самом общем виде могут быть классифицированы следующим образом / 25,54 /: 1) универсальные языки программирования; 2) языки инженерии знаний, ориентированные на создание систем ИИ и ЭС; 3) оболочки ЭС или "пустые" ЭС, т.е. ЭС, не содержащие знаний ни по какой предметной области, но имеющие все необходимые механизмы для их использования. В приведенной классификации инструментальные средства перечислены в порядке возрастания их уровня и в порядке убывания универсальности реализуемых с их помощью ЭС.

Разработка ЭС непосредственно на универсальном языке программирования, таком как Си или Бейсик, является наиболее трудоемкой. Программисту необходимо разработать структуры представления знаний и механизм управления базой знаний, включающий требуемый алгоритм логического вывода. Этот способ используется, если применяют специализированные методы представления знаний и/или хотят добиться высокой эффективности работы ЭС.

Использование языков инженерии зна-
ний позволяет значительно повысить уровень языка и не про-
граммировать все компоненты ЭС, а выбирать их из заранее сос-
тавленного набора. Трудоемкость создания ЭС резко снижается, но
разработчик ограничен заданным представлением знаний. Это мо-
жет привести к тому, что ЭС не будет оптимально решать стоящие
перед ней задачи. Примером такого подхода могут служить систе-
мы программирования на основе языка PROLOG / 26, 74 /

При применении оболочки ЭС разработчик полно-
стью освобождается от работ по созданию программы, так как ЭС
"псчти" готова. ЭС-оболочки создаются для разработки большого
числа в целом однотипных задач, таких как диагностика заболе-
ваний определенного типа или задачи геологического прогноза. В
каждом из этих случаев имеет смысл построить ЭС-оболочки, учи-
тывающие все необходимые особенности решаемых задач, но не
вкладывать в них конкретных знаний, предоставив это инженеру
по знаниям, непосредственно работающему с экспертом. Используя
специально предназначенные для этого средства, инженер по зна-
ниям в некоторых случаях может разработать опытный образец ЭС
в течение нескольких дней.

Существует множество ЭС-оболочек. Так, для медицинской ди-
агностики разработана ЭС ЕМУСIN / 52 /. Примером ЭС-оболочки
для решения геолого-прогнозных задач может служить ЭС "Генезис"
/ 7 /.

Модели представления и использования знаний

Одной из наиболее важных характеристик ЭС, определяющих
их возможности, является способ представления знаний. Невоз-
можно указать оптимальный способ для всех ЭС, его выбор зави-
сит от характера и сложности решаемых задач. Главными крите-
риями являются однородность представления и простота понимания.
Первый критерий приводит к упрощению механизма управления логи-
ческим выводом, а второй — значительно облегчает приобретение
знаний ЭС. К сожалению, эти требования противоречат друг дру-
гу, поэтому в большинстве случаев разработчики ЭС вынуждены

идти на компромиссы, разрабатывая для представления знаний сложные модели или комбинируя несколько простых.

Наиболее часто используемыми являются следующие типы моделей знаний / 6,55,59 /: продукционные, фреймовые, сетевые (семантические) и логические.

Продукционные модели представлены совокупностями правил вывода ЕСЛИ – ТО. Можно привести следующий пример фрагмента продукционной модели (правила принадлежат прогнозной модели, описанной в гл. 4): Правило I20. ЕСЛИ: "В исследуемом районе картируются узлы пересечения разнонаправленных тектонических нарушений". ТО: "Исследуемый район обладает благоприятными тектоническими признаками". Относительно порядка получения заключений механизмом логического вывода продукционные модели обычно делятся на два типа – с прямым и обратным выводом.

Наиболее простыми и давно используемыми являются продукционные модели с прямым выводом. В ЭС, основанных на этих моделях, в базу знаний помещается набор правил, база данных содержит множество фактов, а механизм логического вывода интерпретирует эти значения для вывода заключений. Логический вывод производится циклически, просматриваются все правила, содержащиеся в базе знаний. Когда ЕСЛИ – часть очередного правила, содержащая условия, в которых фигурируют элементы базы знаний, имеет истинное значение, правило выбирается для выполнения. Это значит, что выполняются действия, указанные в ТО-части, при этом переменные базы данных получают новые значения. Затем производится следующий цикл. После окончания каждого цикла проверяется, удовлетворяют ли переменные базы данных заданному целевому условию. Как только такое условие становится истинным, логический вывод завершается. Для прямого вывода характерен простой цикл выбора и выполнения правил, однако из-за необходимости просмотра всех правил, содержащихся в базе знаний, с увеличением объема базы знаний скорость вывода существенно замедляется.

Более гибкой является стратегия обратного вывода. В этом случае в базе знаний строится дерево, в котором правила связывают исходные факты и заключения. Механизм логического вывода на основе поиска по дереву оценивает заключения, исходя из значений фактов. При этом используются только те правила и факты,

которые действительно необходимы для вывода конкретного заключения.

В целом сильными сторонами продукционных систем являются: простота создания и понимания отдельных правил; простота пополнения и модификации; простота механизма логического вывода. К слабым сторонам относятся: неясность взаимосвязки правил; сложность оценки целостной базы знаний; низкая эффективность обработки; отсутствие гибкости в логическом выводе.

Таким образом, при небольших объемах базы знаний проявляются только сильные стороны продукционных систем. В случае увеличения объема базы знаний для решения сложных задач или выполнения гибких выводов требуется структурирование базы знаний, т.е. предварительное группирование правил, чтобы ограничить диапазон их выбора.

Фреймовые модели представления знаний основаны на теории фреймов М.Минского / 35 /. Это психологическая модель памяти человека и его сознания. Теория фреймов носит абстрактный характер и не имеет конкретного представления, которое могло бы использоваться для представления знаний. Основной идеей фреймового представления является понятие фрейма – структуры данных, представляющей какой-либо тип сложных объектов. Информация, относящаяся к конкретному объекту, заносится в слоты (составляющие) фреймов. Все фреймы взаимосвязаны и образуют описание, в которое объединяются все знания об объекте. Техника соединения фреймов между собой и внутреннее представление фрейма варьируются в зависимости от предметной области (рис.2).

Фреймовая модель является иерархической структурой данных с модульным представлением знаний в определенном, фиксированном для каждого типа фрейма, формате. Каждый фрейм описывает определенный объект, а конкретные свойства этого объекта описываются в слотах. В них могут быть представлены различные данные – простые свойства, не имеющие внутренней структуры, или сложные, в этом случае слот включает ссылку на соответствующий фрейм-описание. В качестве слотов во фрейме могут использоваться "присоединенные процедуры". Это небольшие программные модули, которые запускаются по определенным правилам; сначала запускается одна из процедур целевого фрейма, затем, по мере анализа информации, запускаются присоединенные процедуры свя-

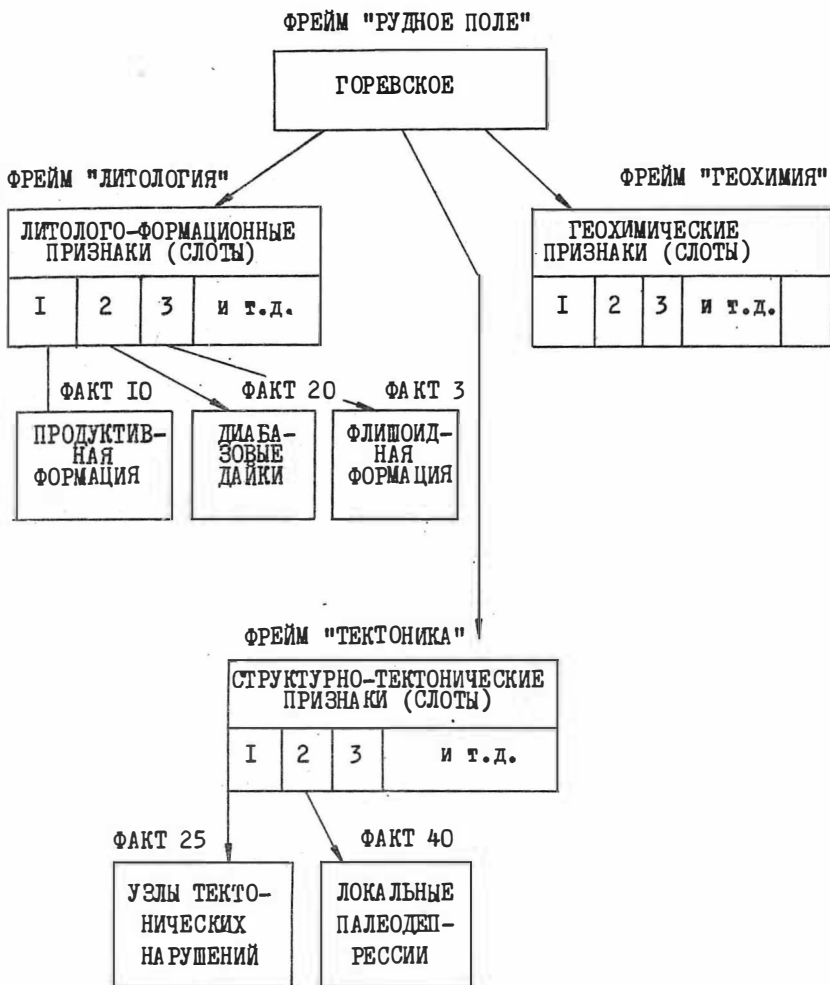


Рис.2. Фрагмент фреймового представления модели знаний (пояснения см. в тексте).

занных с ними фреймов и т.д. Таким образом, осуществляется логический вывод заданного типа.

Языки представления знаний, основанные на фреймовой модели, особенно эффективны для описания сложных понятий, к которым не-

необходимо применять различные механизмы вывода. Фреймовая модель без присоединенных процедур может использоваться как база знаний для системы продукций.

С е т е в ы е м о д е л и - модели представления знаний на основе специальной структуры данных - семантической сети. Смысл заложенных в модели знаний может быть выявлен на основе специальных операций с сетью (таких, как переходы по сети). Стандартного понятия семантической сети не существует, но, обычно, - это система знаний, объекты которой соответствуют узлам сети, а отношения между ними - дугам. Логический вывод по такой сети возможен на основе специальных правил, интерпретирующих значения дуг при переходах от одного узла к другому. Примером ЭС, использующей сетевые представления, является PROSPECTOR / 72, 82 /.

Л о г и ч е с к и е м о д е л и базируются на логике предикатов первого порядка. Отличительными чертами этих моделей является глубокое теоретическое обоснование и существование формальной системы определений и выводов, что способствовало широкому их распространению. Недостатки логических моделей также связаны с их формальным характером. Поскольку большинство задач, решаемых ЭС, достаточно сложны и не имеют формальных постановок, для их представления применялись нелогические модели. Логические модели использовались только для решения сравнительно простых задач, но в последнее время положение меняется. Исследователи логического направления ищут пути сближения "человеческой логики" с формальной, разрабатывая новые виды логических формализмов, такие как модальная логика, многозначная логика и некоторые другие. Логические методы в различных формах стали применяться в нелогических моделях представления знаний, этому особенно способствовало широкое распространение языка логического программирования PROLOG / 26, 76, 79 /

Обработка нечеткой информации

Для того, чтобы поместить в ЭС знания геологов-экспертов, база знаний обязательно должна допускать нечеткие представле-

ния. Универсальных методов для представления нечетких знаний пока не существует, хотя в повседневной работе и применяется некоторый стандарт приемов представления нечеткой информации в ЭС. К ним относятся /22,43,55/: 1) недетерминированность выводов, 2) многозначность интерпретации, 3) ненадежность и 4) неполнота выводов, 5) нечеткость (неточность). Эти приемы комбинируются с моделями логического вывода.

Н е д е т е р м и н и р о в а н н о с т ь в ы в о д о в наиболее характерна для систем ИИ. Поскольку знания накапливаются фрагментарно и не образуют строго увязанной системы, нельзя априори определить цепочку логических выводов, в которой они используются. Цепочка выводов выбирается методом проб и ошибок, при этом в случае неуспеха организуется перебор с возвратами для поиска другой цепочки. Такое поведение ЭС существенно и закладывает основы интеллектуальных способностей, позволяющих найти решение в широком диапазоне заранее не предусмотренных ситуаций. Поскольку эффективность поиска последовательности вывода методом полного перебора очень низка, разработано большое количество эффективных стратегий поиска, использующих различные виды априорных знаний.

М н о г о з н а ч н о с т ь и н т е р п р е т а ц и и — обычное явление естественного языка, поэтому она характерна и для большинства профессиональных знаний в предметных областях, не использующих формальных моделей. Общим методом устранения многозначности является введение более широкого контекста для сопоставления вариантов и такого количества ограничений, которые позволяют выбрать единственный приемлемый вариант. Как правило, такие ограничения вводятся в виде эмпирических правил, основанных на опыте эксперта.

Н е н а д е ж н о с т ь в ы в о д о в . Во многих предметных областях нельзя быть уверенным в том, что выводы, полученные экспертом, являются абсолютно надежными. В этих случаях, как правило, выводу можно приписать некоторое число — коэффициент, отражающий степень уверенности эксперта в полученном им выводе. Источником неопределенности в данном случае является ненадежность фактов, на которых строится вывод.

Рассмотрим типы нечеткости, наиболее часто используемые в продукционных моделях представления знаний. Если фактам, опи-

сывающим конкретную ситуацию, в зависимости от их надежности, приписывать степени уверенности, то строя цепочки логических выводов от фактов к заключениям, можно получить степень уверенности для заключений. При этом логично ввести степени уверенности и для правил, поскольку знания, полученные из разных источников, также характеризуются разной надежностью.

Коэффициенты уверенности (надежности) обычно задаются в виде чисел из определенного диапазона. Например $[-1; 1]$, в этом случае 1 означает полную уверенность в истинности факта (заключения), 0 - отсутствие информации по данному вопросу, -1 означает полную уверенность в его ложности. Все промежуточные значения коэффициентов также используются. Например, 0,7 означает 70-процентную уверенность в истинности факта, а $-0,5$ - 50-процентную уверенность в его ложности. Интервал может быть задан другим, например $[-100; +100]$, в этом случае, аналогично, получим -50 - 50-процентную уверенность в ложности факта (заключения).

Для правил обычно выбирается коэффициент уверенности в интервале $[0; 1]$ или $[0; 100]$, аналогично, 50 - 50-процентную уверенность в надежности правила.

Основная проблема введения нечеткости в продукционных моделях состоит в следующем. Есть несколько фактов (или промежуточных заключений), каждому из них приписан его коэффициент уверенности. Кроме того, в ЭС существуют правила со своими коэффициентами надежности, согласно которым одно и то же заключение независимо подтверждается или опровергается. Необходимо каким-то образом объединить (агрегировать) коэффициенты надежности, полученные по разным правилам, в один общий коэффициент, отражающий степень уверенности заключения. Если такая операция "суммирования" будет разработана, то систематически используя ее на дереве вывода, можно будет рассчитать значение коэффициента уверенности заключения.

В современных ЭС используется большое количество методов агрегирования / 37, 38 /. В некоторых из них разработчик одновременно может использовать несколько десятков различных способов. В качестве примера могут быть рассмотрены методы агрегирования, используемые в ЭС "Генезис" (см. гл.2). Хотя вводимые таким образом коэффициенты уверенности не имеют формального обоснования, они широко применяются во многих универсаль-

ных средствах обработки знаний благодаря простоте их восприятия проектировщиком и пользователем ЭС.

Неполнота выводов. Описание предметной области предполагает решение проблемы неполноты знаний. Можно перечислить верные знания в некоторой предметной области, но перечислить неверные знания просто невозможно. Поэтому обычно в базе знаний определяются только верные знания, а все, что неопределено, считается заведомо неверным. В наиболее явном виде проблема неполноты знаний представлена в ЭС, основанных на логике. Утверждения, которые не упомянуты ни как истинные, ни как ложные, принято относить к ложным. Это — так называемая гипотеза замкнутого мира. С ней связано предположение о полноте представленных знаний (аксиом). Таким образом, правильный вывод не должен меняться, даже если будут добавлены новые знания (аксиомы). Такое свойство системы вывода называется монотонностью.

Понятно, что большинство реальных предметных областей не обладает ни свойством замкнутости, ни свойством монотонности. Так например, нет правил без исключений, однако в монотонном и замкнутом мире, поместив в базу знаний правило, мы будем лишены возможности говорить об исключениях. Чтобы преодолеть подобные ограничения, в настоящее время ведутся активные работы в области немонотонных логик. Вопросы монотонности тесно связаны с вопросами определения непротиворечивости баз знаний и согласования нескольких наборов знаний. Хотя эти проблемы имеют большое практическое значение, в настоящее время они достаточно далеки от решения.

Неточность (нечеткость) — это некоторая неопределенность, свойственная человеческим понятиям. Например, что мы подразумеваем, говоря "молодой человек": то, что ему менее 20 лет?, менее 30 лет? Вопросы, связанные с неточностью такого вида, получили решение в ряде удачных теорий, при этом последние широко используются в ЭС. Это прежде всего теория нечетких множеств Заде / 24 / и основанная на ней теория нечетких выводов. Базовым элементом теории нечетких множеств является нечеткое множество, включающее элементы множества и "вероятности" отнесения элементов к этому множеству. Таким образом, "молодой человек" может быть определен так: 10 лет

- 100 %, 20 лет - 80 %, 30 лет - 20 %. Аналогично могут быть определены нечеткие отношения и нечеткие выводы, при использовании которых будет получен некоторый набор заключений и коэффициентов, характеризующих их надежность.

PROSPECTOR - пример экспертной прогнозирующей системы

Кроме средств логического вывода в ЭС PROSPECTOR входят мощные средства объяснения и приобретения знаний, основанные на естественном языковом интерфейсе, и специальные базы геологических понятий, включающие более 1000 геологических терминов, а также все необходимые отношения между ними.

За период 1978-1983 гг. в ЭС PROSPECTOR введены модели для следующих геолого-промышленных типов месторождений / 6 /:

- 1) дотретичные россыпи золота;
- 2) месторождения массивных сульфидных руд кипрского типа;
- 3) свинцово-цинковые месторождения в стратифицированных карбонатных породах;
- 4) эпitherмальные месторождения серебра;
- 5) месторождения урана в карбонатизированных песчаниках;
- 6) месторождения бурых железняков;
- 7) медно-свинцово-цинковые месторождения и граувакковых толщах;
- 8) молибденовые месторождения штокверкового типа;
- 9) сульфидно-никелевые месторождения в коматитах;
- 10) месторождения урана в карбонатизированных алевритах;
- 11) эвапориты, связанные с озерными сланцами;
- 12) эпигенетические плащесбразные рудные залежи в карбонатных породах;
- 13) современные россыпи;
- 14) медно-колчеданные месторождения типа Куроко;
- 15) медно-порфировые месторождения;
- 16) свинцово-цинковые месторождения миссисипского типа;
- 17) медно-порфировые месторождения Йерингтонского типа в близконтинентальных окраинах;
- 18) медно-порфировые месторождения типа Сьерра-де-Паско в близконтинентальных окраинах;
- 19) медно-порфировые месторождения островных дуг;
- 20) модель размещения буровых скважин для разведки медно-порфировых месторождений;
- 21) медно-свинцово-цинковые месторождения, связанные со сланцами, образованными в морских условиях;
- 22) обобщенная модель урановых месторождений в песчаниках, в целом для региона западных штатов США;
- 23) цинковые месторождения в карбонатных породах Южных Аппалачей;
- 24) вольфрамоносные скарны;

25) месторождения молибденита в гранит-порфирах; 26) месторождения молибденита в монзонит-порфирах; 27) медно-свинцово-цинковые месторождения, связанные с мелководными морскими сланцами; 28) сульфидные месторождения типа Сьюперior; 29) элигенетические месторождения типа Тинтик в карбонатных породах; 30) месторождения молибдена в трубообразных штокверках; 31) месторождения урана в песчаниках западных штатов США.

Обычно геолог-пользователь работает с ЭС PROSPECTOR следующим образом. Начиная консультацию, он сообщает системе основные характеристики прогнозируемой площади: тип залегания, параметры геологических структур, виды пород, минералов и т.п. ЭС сравнивает эти наблюдения с хранящимися в ней моделями рудных месторождений для того, чтобы соотнести с наиболее подходящей. Если пользователь не сообщил какую-то важную для ЭС информацию, она запрашивает его по мере необходимости. Выбрав одну (или несколько прогнозных моделей, если все они подходят), ЭС пытается определить перспективность оцениваемого геологом района. При этом ЭС опять запрашивает дополнительную информацию. Взаимодействие геолога и ЭС происходит в виде диалога на ограниченном английском языке, при этом пользователь в любой момент может взять инициативу в свои руки: ввести дополнительные данные, попросить переформулировать вопрос, потребовать объяснения и т.д. С фрагментом протокола, который иллюстрирует, как ЭС ведет диалог с пользователем, можно познакомиться в работе / 72 /.

Модели ЭС PROSPECTOR используют правила, связывающие наблюдаемые геологические факты с гипотезами (промежуточными или конечными заключениями), выдвигаемыми на основе этих свидетельств. Правило в системе имеет следующий вид - ЕСЛИ:Е, ТО:Н (со степенью доверия LS и LN). Это значит, что свидетельство Е поддерживает гипотезу Н со степенью доверия, выраженной коэффициентами LS и LN. Коэффициент LS указывает насколько наше доверие к гипотезе возрастает в результате обнаружения данного свидетельства, а LN показывает насколько оно убывает из-за его отсутствия. Каждый факт или гипотеза в ЭС имеет свою собственную характеристику Р, отражающую степень уверенности в факте или гипотезе. Факты, на основании которых строятся заключения об истинности гипотез, могут включаться в произвольные

логические комбинации. Гипотезы не могут образовывать логических комбинаций, но могут входить в части ЕСЛИ правил, т.е. являться предпосылкой для вывода других гипотез.

Таким образом, факты, гипотезы и правила в PROSPECTOR образуют сеть выводов, указывающую на связь между свидетельствами и гипотезами и, следовательно, на всевозможные цепочки выводов, которые могут быть из них получены.

Значения коэффициентов уверенности LS и LN, а также значения коэффициентов Р уверенности фактов и гипотез определяются при создании модели. Затем под влиянием поступающей от пользователя информации значения Р уточняются. Распространение коэффициента вероятности по дереву вывода происходит на основе прямого вывода. Для этого используются приемы обработки нечеткой информации на основе метода субъективной вероятности Байеса / 73 /. Распространение вероятности не может начаться до тех пор, пока пользователь не введет в ЭС новую порцию информации. Поэтому механизм логического вывода должен решить, в каком порядке запрашивать информацию у пользователя. Для этого в процессе вывода все факты упорядочиваются по мере их влияния на вероятность Р выдвинутой гипотезы, и осуществляется обратный вывод — от гипотез к фактам.

Фрагмент сети выводов ЭС PROSPECTOR показан на рис. 3. Здесь каждый прямоугольник изображает факт или гипотезу, а каждая стрелка — правило. Цифры над прямоугольниками — вероятности Р, априорно им приписанные. Две цифры, разделенные запятыми, рядом со стрелками — коэффициенты LS или LN, приписываемые правилу. Кружки, заключенные в прямоугольники, изображают логические связки "и", "или". Фрагмент, представленный на рисунке — часть модели, предназначенной для прогнозирования медно-порфирового оруденения. Заключение, которое могут быть выведены на основе данного фрагмента — это, например, благоприятный уровень эрозионного среза, сохраняющий медно-порфировое оруденение, перспективность участка на медно-порфировое оруденение и другие.

Наиболее интересной и сложной частью ЭС PROSPECTOR являются компоненты, поддерживающие ограниченный диалог на естественном языке. Это дает ЭС следующие возможности: 1) перефразировать вопрос, когда пользователь указывает на то, что вопрос ему не понятен; 2) позволяет пользователю вводить информацию о

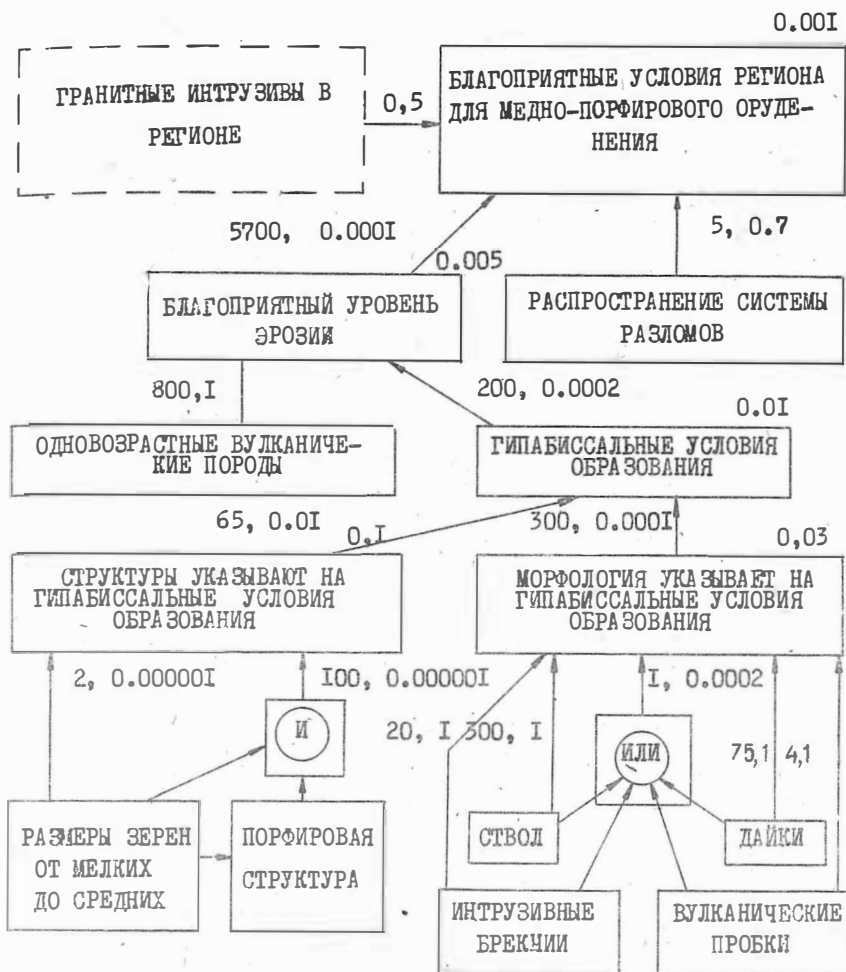


Рис.3. Фрагмент модели экспертной системы PROSPECTOR по /32/ (пояснения см. в тексте).

районе исследования в любой момент в ходе консультации; 3) дает удобную для пользователя форму объяснений.

Резюмируя изложенное, можно полагать, что PROSPECTOR удачно сочетает представление знаний, основанное на правилах, с

представлением на основе семантических сетей. В то же время системе присущи определенные недостатки:

I. PROSPECTOR разрабатывалась как экспериментальная, исследовательская ЭС, использование которой не предполагалось. Это делает разработку прогнозных моделей и их использование довольно дорогими для широкого применения.

Использование байесовских субъективных вероятностей для представления нечеткости предполагает наличие у экспертов специальной подготовки. Но даже в этом случае априорное задание необходимых коэффициентов вызывает трудности у экспертов, тем самым увеличивая трудоемкость создания прогнозных моделей.

3. Неудобством для практического применения является также то, что механизмы естественно-языкового интерфейса, представляющего существенное преимущество ЭС, не могут быть адаптированы к таким языкам, как русский.

Глава II. ЭКСПЕРТНАЯ ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ СИСТЕМА "ГЕНЕЗИС"

ЭС "Генезис" предназначена для представления знаний экспертов в геологическом прогнозировании / 6,7 / и разработана как "пустая" экспертная система, не содержащая априори каких-либо знаний. Знания представляются в виде отдельных моделей, которые используются для решения содержательных задач. Совокупность всех экспертных моделей, включенных в данный момент в ЭС, составляет базу знаний системы. Эксперт в своей предметной области строит отдельную модель или группу моделей знаний. После того как эта модель с помощью имеющихся в ЭС "Генезис" средств помещена в базу знаний, пользователь, работая с ЭС, может получать квалифицированные экспертные заключения в пределах предметной области, описываемой моделью, т.е. решать интересующие его прогнозные задачи.

Модель описывается на специальном языке описания знаний, при непосредственном участии эксперта или группы экспертов. Процесс введения модели в ЭС называется загрузкой базы знаний. После того как база знаний загружена, ЭС готова к работе с геологом-пользователем. В процессе диалога пользователь сообщает системе необходимую информацию, а ЭС при помощи процедур логического вывода дает экспертные заключения. Затем, при помощи системы объяснения пользователь может шаг за шагом просмотреть последовательность логических заключений, получая в процессе диалога необходимые пояснения.

В систему "Генезис" входят следующие основные компоненты / 12 /: базы знаний и данных, подсистемы загрузки базы знаний, тестирования, логического вывода и объяснений. Для формирования базы знаний в ЭС применяется графическая форма языка описания знаний и редактор базы знаний, позволяющий в диалоговом режиме перевести графическое описание моделей знаний во внутреннее представление системы.

Первый вариант модели обычно требует корректировки после опробования на эталонных объектах. В случае, если поведение модели не совпадает с предполагаемым, то эксперт вносит в описание модели соответствующие изменения. Для этой цели служит подсистема тестирования базы знаний.

Подсистемы логического вывода и объяснения работают с вну-

треним представлением модели. Программа логического вывода в режиме диалога запрашивает у пользователя необходимую информацию и затем выдает экспертное заключение. При работе программы факты, вводимые пользователем, могут быть сохранены в базе данных для последующего использования. Программа объяснения позволяет пользователю получить пояснения по конкретным заключениям, сделанным программой логического вывода. В процессе диалога с ЭС пользователь может подробно рассмотреть процесс вывода интересующего его логического заключения.

Язык описания знаний

Элементами языка описания знаний (ЯОЗ) / I2 / являются гипотезы, правила и факты. Формируя свои знания на ЯОЗ и вводя их в ЭС, эксперт дает возможность компьютеру делать определенные логические заключения. Последние представляются в ЯОЗ в виде гипотез. По сути дела, модель - это набор гипотез разных уровней, истинность которых будет установлена ЭС в ходе логического вывода. Следуя этому тезису, общей гипотезой, сформулированной в модели, может быть заключение о перспективности исследуемой территории на определенный тип промышленного оборудования. Промежуточные гипотезы более низкого уровня представляют собой заключения о благоприятных факторах, объединяющих группы геологических признаков (например, формационных или литологических).

Оценка гипотез проводится при помощи правил. Правила, формулируемые экспертом, представляют его знания о закономерностях рассматриваемой предметной области. Каждое правило имеет посылку и заключение. Связь между посылкой и заключением удобно интерпретировать как правила вида "ЕСЛИ..., ТО..., ИНАЧЕ...", каждое из которых является определенной закономерностью, используемой ЭС для получения логических заключений. Так, если истинность гипотезы о благоприятном формационном и литологическом прогнозных факторах уже установлена, то в модели знаний должны быть правила, связывающие эти гипотезы с гипотезой о перспективности исследуемой территории. Это дает ЭС возможность установить истинность гипотезы о перспективности

исследуемой территории из истинности гипотез о благоприятных формационном и литологическом прогнозных факторах.

Заключениями правил всегда являются гипотезы, посылкой правила могут служить как гипотезы, так и факты. Факты — это заключения, их истинность ЭС не стремится доказать. Вместо этого она задает вопросы пользователю, устанавливая ложность или истинность фактов с его помощью. Факты являются теми данными, на основании которых ЭС делает прогнозное заключение, используя в результате промежуточных выводов сформулированные экспертом гипотезы и правила, а также и элементарными, неделимыми для ЭС утверждениями. Для того, чтобы установить истинность очередного факта, ЭС может задать пользователю, например, следующий вопрос: "Характерно ли присутствие интрузивных образований для вашего района?"

Язык описания знаний, используемый в ЭС "Генезис", является графическим изображением гипотез, фактов и связывающих их правил. Гипотезы и факты изображаются в виде прямоугольников (факты отличаются от гипотез), содержащих их названия. Правила изображаются стрелками, соединяющими посылку и его заключение. Если заключение располагается выше посылки, то стрелки могут быть заменены линиями, при этом несколько правил могут быть объединены. В качестве примера модели знаний на рис. 4 приведен фрагмент базы знаний для прогнозирования медно-порфировых месторождений / 13 /.

Модель знаний и логический вывод в ЭС "Генезис" связаны с нечетким представлением как знаний, так и данных. Для установления истинности заключений, каждому факту и каждой гипотезе присваивается целое число в интервале от -100 до $+100$. Вариации этих чисел могут рассматриваться как степень принадлежности конкретной реализации факта или гипотезы к нечеткому множеству, их характеризующему, или как степень уверенности пользователя в их истинности.

Правила вывода определяют ациклический граф, вершинами в котором являются гипотезы и факты. Гипотезы нижнего уровня связаны только с фактами. Геолог, отвечая на вопросы ЭС, задает степень истинности или ложности фактов, вводя характеризующие их степени уверенности. Затем механизм логического вывода, применяя соответствующие правила, последовательно опре-

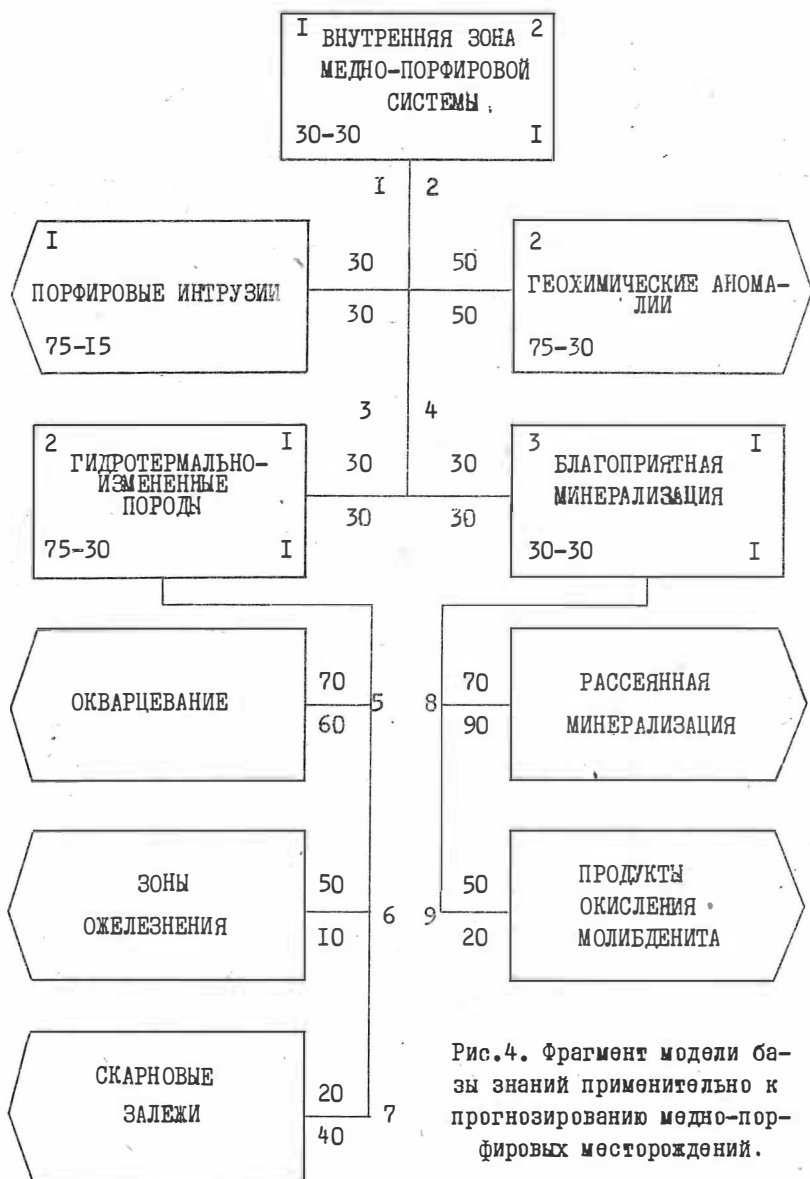


Рис.4. Фрагмент модели базы знаний применительно к прогнозированию медно-порфировых месторождений.

действует степень уверенности для каждой гипотезы. Это происходит следующим образом. Пользователь указывает целевую гипотезу. Пытаясь доказать или опровергнуть ее, механизм логического вывода использует правила, для которых целевая гипотеза является заключением. Если посылками этих правил служат другие гипотезы, они устанавливаются в ЭС как подцели. Таким образом намечается иерархия целей, которые должны быть достигнуты в процессе логического вывода. Если в качестве посылок правил встречаются факты или уже доказанные утверждения, то соответствующие правила срабатывают, вычисляя значение истинности соответствующего заключения. Последовательно раскрывая все постоянные подцели, механизм логического вывода достигает намеченной целевой гипотезы.

Каждой гипотезе и факту в модели знаний приписаны два числа P^+ и P^- , называемые их пороговыми значениями. Числа P^+ и P^- разбивают интервал степени уверенности на три области: утвердительную a^+ , неопределенную a^0 и отрицательную a^- . Поэтому на логический вывод влияет то, в какой из интервалов попадает значение степени уверенности гипотезы.

Соответственно, каждому правилу приписаны два целых числа C^+ и C^- , также в интервале от -100 до $+100$, характеризующие степень надежности правила в процедуре логического вывода. Для каждого правила в процессе логического заключения определяется частичная степень уверенности заключения, на основании степени уверенности посылки. Когда для гипотезы сработали все правила, тогда на основании частных степеней уверенности, полученных по каждому из них, определяется общая степень уверенности гипотезы. Способ ее определения различается в зависимости от типа, указанного в ЯОЗ.

Имея общие представления об элементах языка описания знаний, охарактеризуем более подробно каждый из них. Гипотезы, факты и правила, для того, чтобы их можно было отличить друг от друга, снабжаются номерами. Нумерация каждого из элементов ЯОЗ проводится независимо. Гипотезы и факты получают номера (начиная с единицы), которые не обязательно должны следовать подряд. Модель включает и комментарий – описание модели, который тоже может рассматриваться как один из элементов языка. В комментариях могут быть отражены такие сведения, как область

применения модели, общее описание, источники, на основании которых разрабатывалась модель и т.д.

Г и п о т е з а является заключением, которое выводится на основе знаний, имеющихся в ЭС. Связанная правилами со своими посылками, гипотеза в процессе логического вывода получает значение степени уверенности, рассчитанное на основании степени уверенности ее посылок. Для того, чтобы пользователь мог получить заключение, каждая гипотеза включает три альтернативных текста, выражающих ее смысл. Какой из текстов заключения пользователь получит в процессе логического вывода, зависит от того, в какой из интервалов a^+ , a^0 или a^- попадает степень уверенности гипотезы. Интервалы, в свою очередь, определяются порогом P^+ и P^- , задаваемыми пользователем при определении гипотезы. Они должны соответствовать соотношению $-100 \leq P^+ \leq +100$. При этом предполагается, что точки P^+ и P^- входят соответственно в интервалы a^- и a^+ , и если $P^+ = P^- = P$, то точка P входит в интервал a^+ . Значения порогов P^+ и P^- используются также в процессе вывода степени уверенности для правила, в зависимости от того, в какой из интервалов попадает степень уверенности посылки; степень уверенности правила будет получать разные значения.

Степень уверенности гипотезы в зависимости от степени уверенности правил, вычисляется на основании определенного для нее типа. Тип гипотезы соотносится с одной из основных логических операций "и/или" и соответствует определенной операции алгебры нечетких множеств (см. гл. I). Определены 1, 2, 3, 4 и 5-й типы гипотезы.

Типы 1 и 2 установлены для операции со степенями уверенности правил, которые независимы друг от друга. Тип 1 соответствует нечеткому "или", а тип 2 — нечеткому "и" для независимых посылок. Типы 3 и 4 определены для степеней уверенности, считающихся зависимыми. Тип 3 соответствует нечеткому "или", а тип 4 — нечеткому "и" для зависимых посылок. Тип 5 гипотезы введен для упрощения заданий часто встречающегося случая — выбора из нескольких альтернативных вариантов. Набор нечетких операций, реализованных в системе, включает в себя также операцию отрицания "не". Поскольку она применяется к единственному аргументу, то реализуется для каждого правила. Графически гипотеза

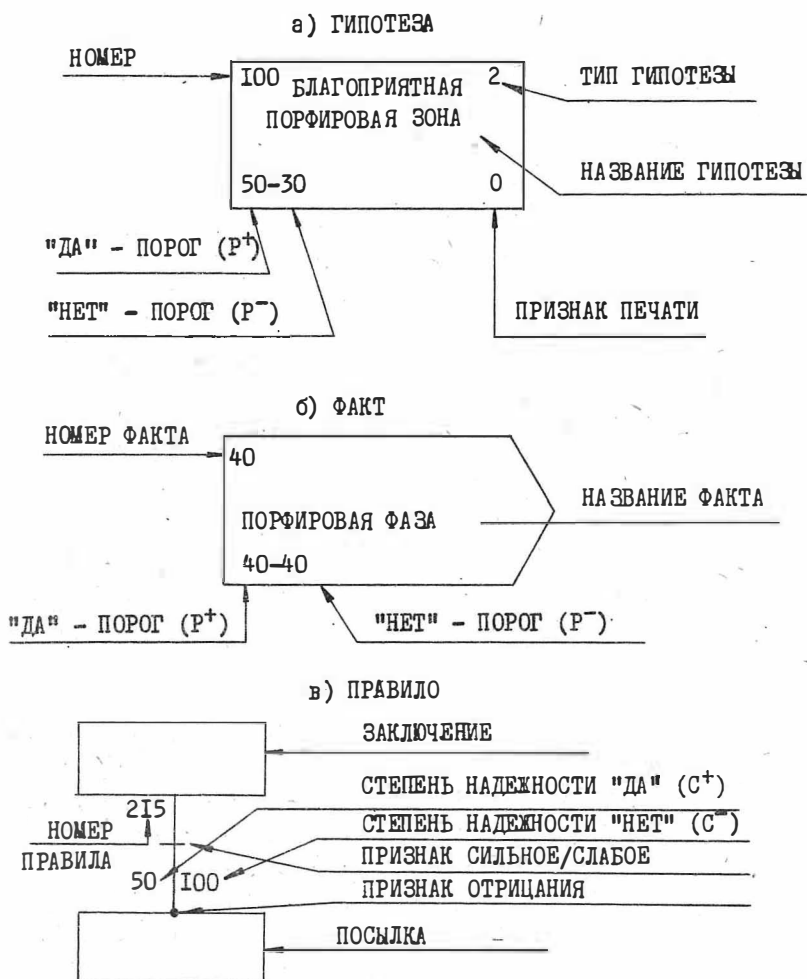


Рис.5. Основные элементы языка описания знаний применительно к прогнозированию медно-порфировых месторождений.

представляется прямоугольником с кратким названием и числовыми характеристиками (рис. 5а).

Типом гипотезы определяется способ агрегирования степеней уверенности правил. Гипотеза "Медно-порфировая система" (МПС) зависит от двух других гипотез: "Центральная зона МПС" и "Внешняя зона МПС", степени уверенности которых вычисляются по совокупности фактов, но мы не будем здесь принимать во внимание уровни, лежащие ниже гипотез о внешней и центральной зонах. Предположим, что степени надежности для правил, соединяющих гипотезы-посылки с гипотезой-следствием заданы. Тогда можно выбрать тип для гипотезы-заключения "Медно-порфировая система" (рис. 6). Обозначим через X и Y - степени уверенности посылок, тогда $T(X, Y)$ - степень уверенности гипотезы-следствия. Посылки считаются независимыми, если появление (или отсутствие) одной из них никак не влияет на появление (или отсутствие) другой. Если же появление или отсутствие одной из посылок влияет на появление другой, то такие посылки являются зависимыми. В нашем случае будем считать, что внешняя и центральная зона могут появиться независимо друг от друга. Если есть внешняя зона, то совсем не обязательно должна быть и центральная. Такая ситуация может иметь место, например, при неопределенном уровне эрозионного среза. Рассмотрим несколько примеров.

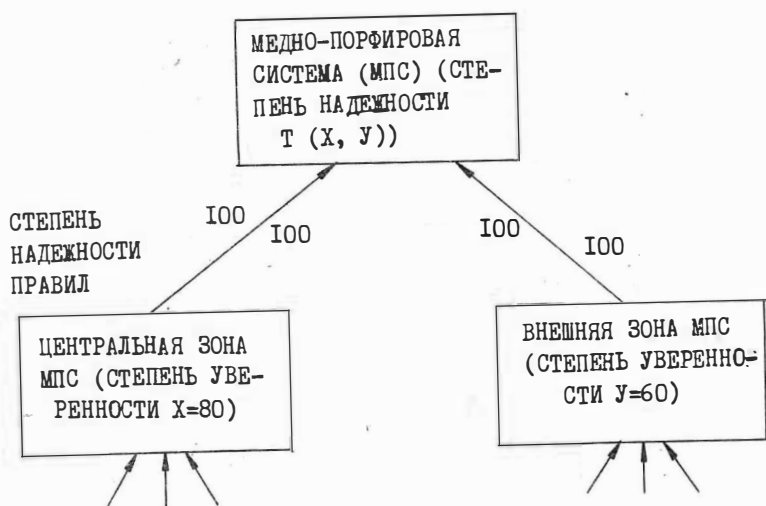
1. Эксперт, строящий модель знаний, считает, что для подтверждения гипотезы "Медно-порфировая система" достаточно иметь положительной хотя бы одну из посылок, при этом посылки независимы. В этом примере рекомендуется для гипотезы "Медно-порфировая система" выбрать тип I:

$$T(X, Y) = \begin{cases} X + Y - X \cdot Y / 100, & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ X + Y + X \cdot Y / 100, & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ X + Y, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

2. Во втором случае эксперт предполагает, что для подтверждения гипотезы-следствия при независимых посылках необходимо, чтобы положительными были обе посылки, тогда нужно выбрать тип 2:

$$T(X, Y) = \begin{cases} X \cdot Y / 100, & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ -X \cdot Y / 100, & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

3. Эксперт предполагает зависимость посылок. Это может быть положительная зависимость, т.е., если имеет место цент-



ТИП ГИПОТЕЗЫ	СТЕПЕНЬ УВЕРЕННОСТИ		
	X	Y	T (X,Y)
1	80	60	92
2	80	60	48
3	80	60	80
4	80	60	60
5	80	60	80

Рис.6. Пример использования в языке описания знаний гипотез различных типов. Модель медно-порфировых месторождений.

ральная зона, то должна быть и внешняя. Такой случай можно наблюдать, например, при достаточно низком эрозионном срезе. Если

эксперт считает, что при зависимых посылках для подтверждения гипотезы "Медно-порфировая система" достаточно, чтобы положительной была хотя бы одна посылка, то для гипотезы-следствия нужно выбрать тип 3:

$$T(X, Y) = \begin{cases} \max(X, Y), & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ \min(X, Y), & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

4. Если при зависимых посылках эксперт полагает, что для подтверждения гипотезы-следствия необходимо, чтобы положительными были обе посылки, то для гипотезы-следствия нужно выбрать тип 4:

$$T(X, Y) = \begin{cases} \min(X, Y), & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ \max(X, Y), & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Кроме упомянутых типов гипотез введен еще тип 5. С его помощью моделируется часто встречающаяся ситуация выбора из нескольких альтернативных возможностей. Например, пусть гипотеза-следствие есть "Благоприятные магматические признаки". Факты-посылки: "Магматические признаки краевых вулканоплутонических поясов" и "Магматические признаки барьерных зон". Гипотеза-следствие имеет тип 5. Это означает, что если уже обнаружены магматические признаки краевых вулканоплутонических поясов, то не имеет смысла поиск магматических признаков барьерных зон. Если гипотеза имеет тип 5, ЭС, обнаружив первое правило, имеющее утвердительную степень уверенности, присваивает его значение степени уверенности гипотезы и не рассматривает следующие правила.

Факт в ЭС — это элементарный квант знания, неделимый для любой из системных процедур. В процессе логического вывода ЭС пытается получить значение степеней уверенности необходимых ей фактов. Если при выводе используется база данных, то она просматривается в поисках значения факта для указанного объекта. Если значение факта отсутствует, то ЭС организует запрос на терминал пользователя, после чего значение факта фиксируется в базе данных и сохраняется для дальнейшего использования. При загрузке базы знаний описание факта должно включать формулировку вопроса к пользователю. Кроме того, в описании факта опре-

деляются значения порогов P^+ и P^- , которые участвуют в процессе логического вывода аналогично порогам гипотез: они используются для расчета степеней уверенности правил, для которых описываемый факт является посылкой.

Графически факт в ЯОЗ изображается в виде прямоугольника, который включает его название и числовые значения P^+ и P^- (см. рис. 5б).

П р а в и л о - это выражение определенной причинно-следственной связи, включающее в себя условия. В ЭС правило является указателем, направляющим логический вывод. Каждое правило имеет посылку, в качестве которой может выступать гипотеза, факт и заключение. Последнее может быть только гипотезой. В ЭС правила "передают" значение от степени уверенности посылки к заключению. Если посылка правила получила значение степени уверенности X , то Y - степень уверенности правила определяется на основании следующего условного выражения:

$$Y = \begin{cases} X \cdot C^+, & \text{если } X \geq P^+ \\ 0, & \text{если } P^- < X < P^+ \\ X \cdot C^-, & \text{если } X \leq P^- \end{cases}$$

Таким образом, значение степени уверенности правила Y вычисляется на основании того, в какой из интервалов a^+ , a^0 или a^- попадает степень уверенности посылки. Каждое правило ЭС определяет две закономерности: при условии истинности посылки и при условии ее ложности. При неопределенности значения посылки (X принадлежит a^0), значение степени уверенности правила также неопределено.

Поскольку правила в ЭС - это, по существу, нечеткие отношения, связывающие функции принадлежности посылок и соответствующих заключений, то их определение производится на основе значения степени надежности правила C^+ и C^- (т.е. насколько сильна связь между посылкой и следствием, определяемая правилом). Значения степени надежности правила находятся в интервале $[-100; +100]: 1$ - если степень надежности положительна - истинность причины влечет истинность следствия; 2) степень надежности отрицательна - истинность причины влечет ложность следствия; 3) степень надежности равна нулю - причинной связи не существует.

Для того, чтобы ЭС могла продемонстрировать пользователю порядок получения заключения, каждое правило может иметь его краткую содержательную формулировку. Для этого при определении правила в него необходимо ввести тексты, поясняющие его смысл как для истинного, так и для ложного значения посылки.

Кроме того, для каждого правила могут быть заданы дополнительные возможности: признак отрицания и признак "сильное/слабое". Если задан признак отрицания, вместо значения посылки X используется ее отрицание $\bar{X}$, вычисляемое как $\bar{X} = -X$. Признак "сильное/слабое" является выражением характера причинно-следственной связи, описываемой правилом. Этот признак учитывается в процессе вычисления общей степени уверенности гипотезы по степени уверенности правил, для которых она является заключением. Так например, если в базе знаний для гипотезы определены сильные правила, то это предполагает, что в случае, если посылка любого из сильных правил становится ложной, то и гипотеза также принимает ложное значение, несмотря на значения остальных посылок. При этом в качестве общей степени уверенности гипотезы принимается степень уверенности сильного правила, для которого посылка ложна.

Графически правило изображается стрелкой, направленной от посылки к заключению. Правило может рисоваться и линией, тогда предполагается, что изображение заключения на схеме находится выше изображения посылки. Рядом со стрелкой проставляются числовые характеристики правила. Если правило имеет отрицание, стрелка помечается точкой у основания. Если правило определено как сильное, стрелка перечеркивается. На рис. 5в приведено сильное правило с признаком отрицания.

Рассмотрим теперь, каким образом устанавливать пороги значимости степеней уверенности гипотез и фактов. Предположим, что степень уверенности в истинности некоторого факта равна +20. Например, в наличии площадной пропитализации пользователь уверен на 20 %. Возникает естественный вопрос: это мало или много? Разумно предположить, что для некоторых фактов и гипотез эта степень уверенности недостаточна, чтобы считать ее подтвержденной, а для других гипотез и фактов достаточна, чтобы принять по ним определенное заключение. Таким образом, задавая пороги P^+ и P^- , которые делят интервал $-100, +100$ на

три области: отрицательную a^- , неопределенную a^0 и положительную a^+ , мы устанавливаем значимость степеней уверенности. При этом нужно помнить о том, что, чем больше величина P^+ , или меньше величина P^- , тем более жесткие требования к определенности факта или гипотезы предъявляются.

Основы разработки баз знаний

Разработка базы знаний – это процесс передачи и преобразования опыта решения прогнозных задач от эксперта к ЭС / 54 /. Эксперт является источником геологических знаний, но он обычно мало сведущ в технических вопросах проектирования баз знаний и работы с ЭС. Поэтому для разработки базы знаний кроме эксперта необходим еще и инженер по знаниям (аналитик). Последний выступает как посредник, помогающий эксперту структурировать его знания и формализовать их. В ЭС "Генезис" база знаний отделена от собственно ЭС. Кроме того, специальное программное средство – редактор базы знаний, позволяет загружать и изменять базу знаний в диалоговом режиме. Это дает возможность эксперту даже с небольшим опытом работы на ЭВМ, непосредственно взаимодействовать с ЭС, выполняя тем самым функции инженера по знаниям.

Первый шаг инженера по знаниям заключается в изучении проблемы по общей литературе и специальным публикациям. Он должен определить обобщенные задачи, которые будет решать разрабатываемая ЭС. Затем инженер проводит с экспертом серию встреч для постановки проблемы и неформального ее описания. Эксперт и инженер начинают с того, что определяют объем решаемых в ЭС задач, стремясь, чтобы сложность разрабатываемых моделей знаний не была слишком большой. Более правильно в случае большого количества решаемых задач установить очередность их разработки, начав с ограниченных по объему, но имеющих ключевое значение задач.

На следующем этапе инженер пытается подобрать наиболее подходящие конструкции языка описания знаний и выясняет, взаимодействуя с экспертом, отражают ли эти конструкции знания последнего. При этом инженер должен получить от эксперта информацию о том, какие факты несут основную смысловую нагрузку, в

каком порядке ЭС должна запрашивать информацию у пользователя, какие выводы о надежности заключений могут быть получены в зависимости от предоставляемой пользователем информации, в каком порядке должны решаться рассматриваемые задачи, виды необходимых объяснений и т.д.

Далее, после решения основных вопросов, следует стадия детальной разработки экспертной модели. Определяется полный список гипотез, проверяемых в процессе работы ЭС, фактов, информация о которых необходима для их оценки, и наборы правил, связывающих факты и гипотезы. Вся эта информация фиксируется в виде схем на языке описания знаний.

Результатом этой стадии являются: 1) зафиксированные понятия, логика и рассуждения эксперта; 2) знания эксперта, представленные в виде некоторой структуры, что делает их обозримыми, а следовательно, доступными для дальнейшего изучения и уточнения; 3) общая стратегия решения прогнозной задачи экспертом; 4) правила, отражающие связи, используемые экспертом для решения прогнозных задач.

Инженер после тщательной проверки прогнозной модели мысленно "проигрывает" правила, чтобы получить результаты для ряда стандартных случаев и некоторых экстремальных условий. Оценка полученных результатов экспертом является основой для изменения и "доводки" разрабатываемой модели. Нередко в ходе такой работы эксперт уточняет и классифицирует свои знания о проблеме, так как информация, получаемая от инженера, позволяет ему увидеть проблему с новой, часто неожиданной для него, стороны. Изменения в базе знаний осуществляются инженером по мере уточнения правил в первоначальной версии, введения указанных экспертом дополнительных правил. И лишь после этих операций база знаний загружается в ЭС. Взаимодействуя с экспертом, используя контрольные прогоны модели на ЭВМ, инженер формирует базу знаний, имеющую обычно несколько сотен правил и фактов. Часто первая версия базы знаний оказывается слишком громоздкой. В этом случае инженер должен отказаться от нее, построив новую, логически более стройную и более понятную для пользователя.

Большое значение имеет тестирование разработанной модели на реальных прогнозных объектах. Часто теоретически полная модель не выделяет или неправильно идентифицирует определенные

классы прогнозных объектов. В этом случае продолжается корректировка модели, иногда с пересмотром круга решаемых задач.

Основные этапы разработки базы знаний

Разбиение процесса разработки базы знаний на этапы – это только грубое схематичное описание сложного и плохо структурированного процесса объективизации экспертных знаний. Как отмечалось в гл. I, этот процесс включает: идентификацию, концептуализацию, формализацию, реализацию, тестирование и оценку / 52, 54 /.

И д е н т и ф и к а ц и я начинается с определения участников процесса передачи знаний от эксперта к ЭС. Эксперт – источник знаний, а инженер по знаниям – их получатель. Если эти две ключевые фигуры объединены в лице эксперта, процесс передачи знаний может проходить значительно быстрее. После определения участников, начинается идентификация прогнозной проблемы. Она протекает как неформальный обмен мнениями по различным аспектам проблемы, ее постановке, характеристикам, подзадачам. Цель этапа – охарактеризовать проблему и обеспечивающие ее структуры знаний, чтобы приступить к формированию базы знаний.

К о н ц е п т у а л и з а ц и я – обсуждение решаемой проблемы экспертом и инженером по знаниям. Может показаться, что создание модели знаний ускорит проектирование ее сразу же в полном объеме, однако практика разработки большого количества ЭС в различных предметных областях показала, что это не так. После того, как на стадии концептуализации будут определены основные задачи и связи между ними, необходимо попытаться создать первый экспериментальный вариант модели знаний, а затем вернуться к стадии концептуализации для разработки полного варианта. Опыт, приобретенный при разработке прототипного варианта, часто оказывается незаменимым.

Для этого важно получить ответы на следующие группы вопросов:

I. Какие основные и дополнительные прогнозные задачи должны быть решены? Является ли прогнозное заключение основной целью экспертизы? Необходимо ли решать дополнительные задачи,

например, классификационные? Какие типы прогнозных объектов должны рассматриваться в задачах? Должен ли прогноз представляться как ряд последовательных стадий? и т.д.

2. Какие основные подзадачи можно выделить, и как они взаимоотносятся между собой? Как происходит разбиение процесса прогнозирования на стадии? Каковы содержание и структура каждой стадии? Какие дополнительные задачи должны быть решены на каждой стадии?

3. Какие данные (факты) должны использоваться для прогноза? Как запросы к пользователю должны быть распределены по стадиям? Существует ли естественная классификация, в соответствии с которой вопросы могут быть предъявлены пользователю?

4. Каковы целевые заключения (гипотезы) в проводимой экспертизе? Какими должны быть промежуточные заключения? Каковы взаимосвязи гипотез между собой и с фактами?

5. Что может влиять на правильность заключения экспертизы? Всегда ли предполагаемый пользователь ЭС обладает нужными данными? Каковы возможные варианты интерпретации фактов пользователем? В каких пределах могут варьироваться полученные заключения? Убедительно ли для пользователя будет даваемое ЭС объяснение?

Эксперт и инженер, отвечая на поставленный круг вопросов, постепенно приходят к окончательному варианту модели знаний. В нем должны быть выделены знания, которые необходимы для решения прогнозной проблемы. Необходимым условием окончания этапа являются определение целей экспертизы и потенциального круга пользователей ЭС. Кроме основных, должны быть сформулированы дополнительные цели разработки ЭС, например, формальное описание прогнозного процесса, распространение накопленного уникального опыта, содействие другим экспертам-геологам в решении их проблем и т.д.

Ф о р м а л и з а ц и я - это перевод основных структур экспертных знаний, описывающих решаемую проблему, в более формальное представление с помощью языка описания знаний ЭС "Генезис". При этом происходит уточнение и детализация знаний. На данном этапе инженер начинает играть более активную роль, предлагая эксперту различные варианты формальной реализации имеющихся структур знаний, основываясь на своем опыте описания и реализации баз знаний предыдущих разработок.

Проектирование модели обычно происходит "сверху вниз". Прогнозный процесс делится на стадии, для каждой из которых имеется перечень прогнозных объектов и дополнительные задачи, решаемые на каждой стадии. Затем детально разрабатываются базы знаний для каждой стадии. Рассматриваются основной вариант прогноза, альтернативные варианты и, наконец, вспомогательные задачи. Для каждого прогнозного объекта определяются группы прогнозных факторов, затем каждая группа детализируется до конкретных фактов. Рассматриваются заключения (гипотезы), выводимые на каждой стадии, и их связь с имеющимися фактами.

Когда модель базы знаний после ряда итераций примет законченный вид, необходимо подготовить текстовое описание связей, выражаемых правилами. Эти тексты будут использоваться в подсистеме объяснений.

Р е а л и з а ц и я предполагает загрузку базы знаний, представленной на ЯОЗ (первый вариант базы знаний). Знания о прогнозной проблеме, выделенные на этапе формализации, определяют содержание структуры знаний и порядок логического вывода, но не гарантируют работоспособность первого варианта модели. На этапе формализации может быть достигнута только локальная непротиворечивость используемых для логического вывода элементов базы знаний. Многие общие вопросы могут быть решены только экспериментально с использованием первого варианта базы знаний. Поэтому создание его является исключительно важным этапом в разработке базы знаний. Отдельные фрагменты прототипа могут быть сохранены в более поздних версиях ЭС, однако главной целью этапа реализации является проверка соответствия формальной схемы базы знаний основным принципам, заложенным при ее проектировании. Для создания прототипного варианта используются стандартные средства ЭС "Генезис": редактор базы знаний, процедуры логического вывода и объяснения.

Т е с т и р о в а н и е - проверка прототипного варианта модели на примерах прогнозных объектов. Вероятно, для каждой стадии, включенной в модель, потребуется свой набор объектов. Если предыдущие этапы были выполнены достаточно тщательно, то при первых прогонах будут получены удовлетворительные результаты. Как только прототипный вариант отработает от начала до конца на таком "стартовом" примере, он должен пройти разно-

стороннюю проверку на возможно большем количестве реальных или модельных объектов, для того, чтобы выявить имеющиеся (а они всегда есть!) дефекты в базе знаний. Обсуждение результатов с экспертом дает инженеру основу для совершенствования прототипной ЭС и постепенного доведения ее до полномасштабной экспертной системы.

Дефекты в базе знаний можно разделить на содержательные и ошибки "формы". Содержательные ошибки в базе знаний приводят к неверным или неточным заключениям экспертизы. Они, как правило, немедленно устанавливаются экспертом по результатам прогонки примеров и связаны с неполнотой помещенных в ЭС экспертных знаний. Такие ошибки устраняются путем изменения и расширения модели. Вторая группа дефектов включает ошибки, не замеченные на начальных этапах тестирования. Их выявление требует отладки модели знаний на большом фактическом материале и согласованных действий эксперта и инженера по знаниям. Ниже рассматриваются наиболее часто встречающиеся ошибки этого типа.

Главными функциями ЭС является ввод данных и вывод результатов экспертизы. Конкретный способ ввода данных, реализованный в ЭС, может оказаться неподходящим для пользователя из-за того, что вопросы, отвечающие фактам, сформулированные неточно, могут быть трудными для понимания или двусмысленны. Диалог в целом может быть неудобен для работы пользователя, его может не устраивать, например, порядок вопросов, часто не учитывается потребность пользователя влиять на направление экспертизы. Вывод результатов работы ЭС может быть также неадекватным. Заключений может быть слишком много или наоборот — слишком мало. Гипотезы могут быть неправильно организованы или упорядочены, а выводимый текст иметь несоответствующий уровень детализации.

Наиболее часто ошибка в заключениях ЭС появляется из-за неверно используемых правил, которые редко бывают независимыми друг от друга; хотя при проектировании базы знаний удобно полагать, что это так. Правила могут быть неполными или противоречивыми, а для описания редко встречающихся случаев могут просто отсутствовать. Взаимодействуя между собой, правила могут выдавать неверные заключения.

Трудности часто возникают при согласовании правил, с уче-

том используемой агрегирующей функции (т.е. типа гипотезы). Распространенными ошибками является использование для вывода гипотезы слишком большого количества правил. Разнородные правила трудно согласовать между собой, кроме того, при большом их числе влияние каждого отдельного правила на гипотезу становится очень малым. Рекомендуется использовать не более 5-7 правил в гипотезе. Кроме уменьшения сложности отладки, это делает более понятной структуру модели знаний.

Прототип базы знаний может содержать ошибки, потому что они не были выявлены на проверочных примерах прогнозных объектов. Иногда модель дает неправильное заключение из-за того, что объект, по которому проводится экспертиза, выходит за рамки решаемых ЭС задач, но в большинстве случаев набор проверочных примеров является слишком однородным, из-за чего не удается выявить все имеющиеся ошибки. Набор контрольных объектов прогноза должен организовываться так, чтобы он охватывал все подзадачи, проверял границы предполагаемых типичных случаев, обладал неоднозначностью и т.д.

По ходу построения модели почти постоянно имеют место изменения, которые включают в себя не только усовершенствование создаваемой модели, но в случае необходимости и переформулирование основных концепций. После создания прототипного варианта все этапы, как правило, многократно повторяются, начиная с этапа реализации до этапа тестирования. Результатом этого процесса, когда диапазон решаемых ЭС задач определен и неизменен, должно быть улучшение работоспособности. Если же этого не происходит, то инженер по знаниям должен принять решительные меры по перестройке используемых структур знаний, включая повторение цикла разработки, начиная с этапа формализации. Более серьезные трудности могут возникать из-за ошибок на этапах концептуализации и идентификации. Это будет диктовать необходимость переопределения некоторых, используемых при построении базы знаний, концепций.

О ц е н к а модели знаний - это оценка степени доверия пользователя заключениям ЭС. Такая оценка проводится для уже разработанной базы знаний, однако планировать и проводить оценку необходимо на возможно более ранних этапах разработки, поскольку это помогает точнее определить конкретные цели ЭС и

объективные критерии, с помощью которых можно установить, действительно ли эти цели были достигнуты.

Результаты оценки зависят от многих причин. Существенно, что качество модели знаний нельзя оценить одним критерием. Необходимо использовать связанный набор критериев, зависящий от специфики разработанной прогнозной модели.

В общем случае оценка сконструированной модели знаний заключается в сравнении результатов проводимой ею экспертизы с результатами экспертизы, проводимой экспертами-людьми. Существенной трудностью является то, что эксперты гораздо более информированы по сравнению с ЭС. Они получают большую информацию о прогнозных объектах и всегда используют более широкий набор знаний. ЭС, напротив, ограничена только узкой областью доступных ей знаний и данных. Поэтому необходимо стремиться поставить ЭС и экспертов-людей в приблизительно равные условия. Рассмотрим некоторые общие вопросы проведения объективной оценки моделей знаний.

Оценка работы ЭС требует некоторого эталона, так как общепризнанного правильного ответа, с которым могут сравниваться полученные ЭС результаты, нет. Здесь возможны два варианта, когда выбирают:

- 1) либо достаточно представительный набор реальных объектов, результаты экспертизы которых заведомо известны;
- 2) либо экспертизы, выполненные ЭС, сравниваются с результатами экспертизы, проведенной группой авторитетных экспертов.

Сопоставляя результаты работы ЭС с эталонными объектами или с результатами экспертизы, проведенной людьми, важно выяснить, какой процент совпадений результатов экспертиз можно считать приемлемым. Интуитивно взятый процент (скажем 95 %) может оказаться не реальным, так как обычно в подобной ситуации неизвестен процент совпадения мнений экспертов-людей. Поэтому необходима оценка работы ЭС в ряду нескольких экспертов-людей разной квалификации по данной прогнозной проблеме, что даст возможность сделать сравнение результатов экспертизы более реальным. К сожалению, исследования по определению компетентности экспертов в области прогнозирования проводить не принято, что вносит значительные субъективные трудности в оценку работы ЭС.

Глава III. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА СТРАТИФОРМНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА ЕНИСЕЙСКОМ КРЯЖЕ

Свинцово-цинковые проявления этого региона представляют собой пример месторождений стратиформного класса, широко распространенных в мире во всех стратиграфических подразделениях терригенно-карбонатных толщ докембрия. Все возрастающий поток информации по стратиформным полиметаллическим месторождениям докембрия показывает, что их приуроченность к складчатому обрамлению древней Сибирской платформы не является необычной. Аналогичные, или близкие к ним, месторождения свинца и цинка описаны в структурах складчатого обрамления Африканского континента, Канадского щита, Австралийской, Китайской и Русской платформ. По масштабам проявления свинцово-цинковые руды стратиформного класса относятся к числу наиболее крупных в мире. Достаточно указать, что к настоящему времени более половины всех установленных запасов свинца и цинка и более 30 % их добычи за рубежом связано с месторождениями этого класса / 51 /. В связи с этим в последние годы наметилась тенденция к резкому усилению работ по поискам и разведке месторождений стратиформного класса как за рубежом, так и в нашей стране, а следовательно, и работ, направленных на совершенствование методики их прогноза.

Общие сведения

Енисейский кряж расположен в области сопряжения западной окраины Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской складчатой области. Помимо известного Горевского месторождения на Енисейском кряже установлено свыше 300 рудопоявлений и точек свинцово-цинковой минерализации. Они сконцентрированы на западном склоне кряжа от Ангара на юге до Подкаменной Тунгуски на севере и рассматриваются в качестве Енисейского полиметаллического пояса / 4,45 /. При анализе схемы размещения стратиформных полиметаллических проявлений в докембрии Сибири (рис. 7) видно, что в металлогеническом плане Енисейский полиметаллический пояс является звеном трансрегиональ-

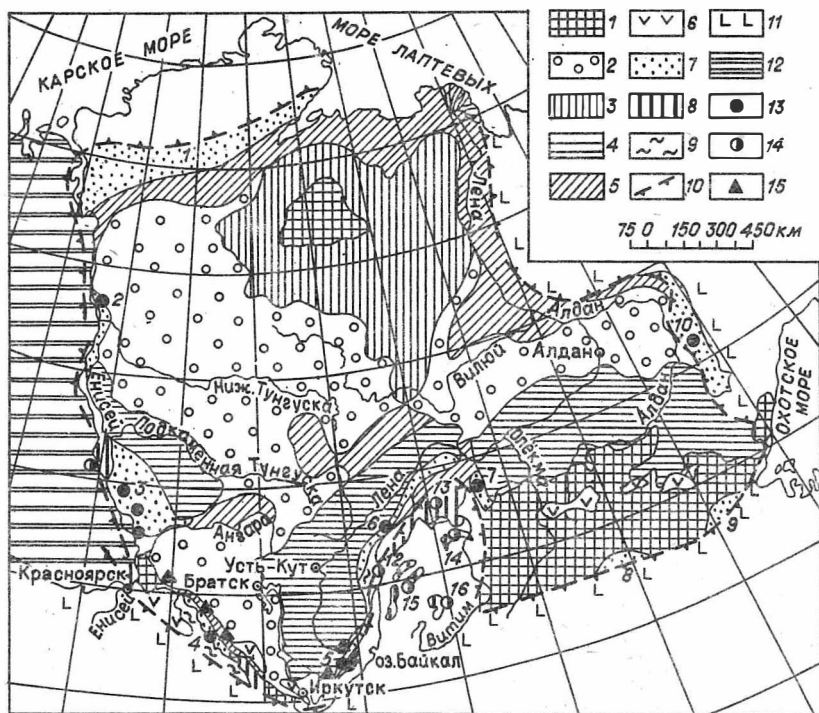


Рис.7. Схема размещения верхнепротерозойского полиметаллического оруденения в системе сочленения структур Сибирской платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса:

1-6 - внутренние структуры платформы на современном эрозионном срезе: 1 - щиты, 2 - синеклизы, 3 - антеклизы, 4 - моноклизы, 5 - прогибы перикратонные, внутриплатформенные и предгорные, 6 - структуры активизации, прогибы и впадины; 7-10 - краевые структуры сочленения Сибирской платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса (система перикратонных структур): 7 - перикратонные опускания на коре сиалического типа со стратиформным свинцово-цинковым оруденением (1 - Таймырское, 2 - Турханское, 3 - Енисейское, 4 - Присяянское, 5 - Прибайкальское, 6 - Патомское, 7 - Березовское, 8 - Янканское, 9 - Шевлинское, 10 - Юдомо-Майское); 11 - пришовные трюги и прогибы с корой океанического и переходного типов с колчеданно-полиметалличе-

ским и медно-цинковым оруденением (I1 - Исаковский, I2 - Оло-
китский, I3 - Додыхтинско-Бодайбинский, I4 - Талон-Делюн-Уран-
ский, I5 - Няндонинский, I6 - Уакитский); 9 - рифейские - зоны
смятия в зоне краевых швов; I0 - краевые швы корово-мантийного
заложения; II - палеозойские и мезозойские геосинклинальные
структуры Центрально-Азиатского подвижного пояса; I2 - чехол
Западно-Сибирской эпигерцинской платформы; I3-I5 - рудные фор-
мации: I3 - стратиформная свинцово-цинковая, I4 - колчеданно-
полиметаллическая, I5 - медистых песчаников (замбийский тип).

ного Сибирского периплатформенного полиметаллического пояса,
приуроченного к системе перикратонных структур. Последние воз-
никли на рубеже нижнего протерозоя - рифея (I650 млн лет) в
области перехода от континентальной коры шельфового типа Северо-
Азиатского крана (Сибирская платформа) к коре океаническо-
го или переходного типа Центрально-Азиатского подвижного поя-
са. В систему перикратонных структур входят краевые швы, при-
шовные троговые структуры эвгеосинклинального типа, перикратон-
ные опускания и краевые глыбы, которые строго индивидуализиро-
ваны по геодинамическим режимам развития и типу субстрата в их
основании / 2I /.

По мнению П.М.Хренова с соавторами / 75 /, краевой шов в
его современном интегральном виде следует понимать как доста-
точно подвижную и проницаемую зону, местами унаследованную си-
стемой современных краевых разломов (см. рис.9), сочленяющихся
под разными углами по периферии платформы (Енисейский, Восточ-
но-Саянский, Прибайкальский, Байкало-Патомский или Байкало-Муй-
ский и Становой глубинные разломы). Для них характерно прояв-
ление разновозрастных ультраосновных и основных интрузий и
разновозрастных эндогенных процессов - метаморфизма (метасома-
тоза) и оруденения (медная, молибден-сульфидно-кварцевая, оло-
ворудная и другая минерализация кварц-сульфидного и скарнового
типов).

Пришовные трого и прогибы эвгеосинклинального типа с оке-
анической или переходной корой (Исаковский синклиниорий на Ени-
сейском крыже, Олоkitский синклиниорий в Северном Прибайкалье и
другие) формировались преимущественно на фемическом основании.

Они насыщены в значительной степени вулканогенными комплексами основного и реже кислого состава, местами с интрузивами ультраосновного состава и ассоциируют с углеродистыми карбонатно-сланцевыми и карбонатно-сланцевыми формациями. В парагенетической связи с вулканогенно-карбонатно-сланцевыми формациями находится оруденение колчеданно-полиметаллической и медно-цинковой формаций вулканогенного и вулканогенно-осадочного генезиса.

Перикратонные опускания (см. рис.7), прослеживаясь по всей периферии Сибирской платформы с запада на восток (Таймырское, Туруханское, Енисейское, Присаянское, Прибайкальское, Патомское, Березовское, Янканское, Шевлинское и Юдомо-Майское), могут быть соотнесены со структурами деструктивно-рифтогенного типа, но без раскрытия в них земной коры океанического типа. Часто в геологической литературе такие структуры фигурируют под названием терригенных эвгеосинклиналей, авлакогенов, краевых миегеосинклинальных прогибов / 28,65 /. Их объединяет: наличие архейско-нижнепротерозойского складчатого сиалического субстрата в основании; практическая амагматичность, хотя в отдельных перикратонах и возможны некоторые проявления сиалического магматизма; глыбовый характер их тектоники, которая превалировала в создании складчатых структур; четко выраженная стадийность осадочных образований, соответствующая ранней (вулканогенно-терригенные и терригенные формации), средней (терригенно-карбонатные и карбонатные формации) и предорогенной (флишоподобные формации) стадиям; повышенная мощность осадочных комплексов (до 10-12 км) и тесная их связь с осадочными комплексами прилегающих участков плиты и в общем одновременное развитие / 49 /. В металлогении перикратонных опусканий ведущую роль играет стратиформное полиметаллическое оруденение (свинцово-цинковое, флюорит-свинцово-цинковое, серно-колчеданное) в ассоциации с железомарганцевой, фосфоритовой и другой, главным образом стратиформной, минерализацией. Сравнительный анализ формационных, фациальных и палеоструктурных закономерностей размещения стратиформной минерализации в различных регионах обрамления Сибирской платформы позволяет сделать вывод о близком механизме формирования руд.

Сходную позицию занимает также и стратиформное свинцово-цинковое оруденение в Яньшанском и некоторых других прогибах

по периферии Китайской платформы, в Аппалачевской краевой докембрийской системе Северо-Американской платформы, в прогибе Аделаида Австралийской платформы, в Восточно-Гренландской, в верхнепротерозойских складчатых системах пояса Дамара-Кейс вокруг Южно-Африканской платформы, в краевой системе структур восточной части Русской платформы. Во всех перечисленных примерах размещение стратиформной минерализации подчиняется как региональному, так и локальному стратиграфическому контролю. Рудовмещающий разрез характеризуется прибрежно-морскими фациями терригенно-карбонатных и карбонатных формаций. Как правило, вулканические отложения развиты незначительно. В составе верхнепротерозойских комплексов присутствуют доломитизированные разновидности известняков и органических (биогермных и биостромных) построек. По строению разреза рудовмещающий комплекс соответствует трансгрессивному ритмокомплексу. В нижней части его подстилают терригенные осадки, в средней (рудоносной) — терригенно-карбонатные и карбонатные, а в верхней (перекрывающей) — существенно терригенные или карбонатно-терригенные. Таким образом, формирование рудоносных горизонтов приходится на периоды максимального развития трансгрессии палеоморей.

Одна из главнейших закономерностей размещения минерализации рассматриваемого типа заключается в приуроченности ее к конседиментационным относительно глубоководным палеодепрессиям, выполненным углеродистыми терригенно-карбонатными и карбонатными толщами, и к склоновым частям палеоподнятий, контролировавших положение биогермных фаций в мелководных морских палеобассейнах. Близкие модели геологических обстановок нахождения докембрийских стратиформных месторождений цветных металлов приведены в работе / 28 /. В конкретных геотектонических обстановках положение рудных залежей определяется сочетанием литологических и палеофациальных факторов.

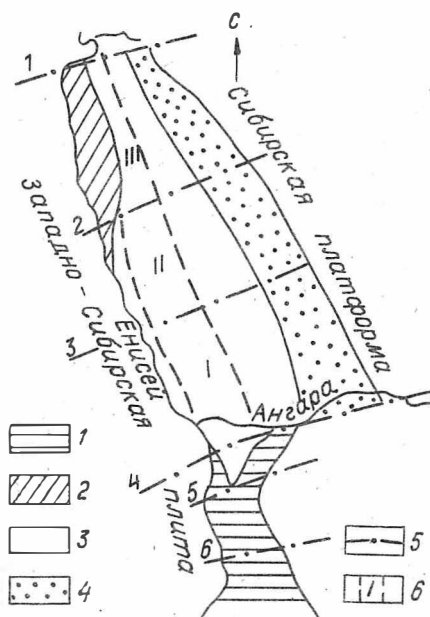
Таким образом, наиболее общими благоприятными обстановками нахождения стратиформных месторождений свинца и цинка в докембрийских комплексах перикратонов следует считать сочетание палеотектонических, стратиграфических, формационных и палеофациальных факторов, которые и определяют, в первую очередь, круг прогнозных и поисковых критериев и проходят красной нитью через мелко-, средне- и крупномасштабное прогнозирование.

Положение Ангарского рудного района в структурах Енисейского края

Енисейский край в современной плане отвечает сложно построенному мегантиклинорию / 4,45 /, южная часть которого представляет собой выступ раннедокембрийского кристаллического основания (Канская глыба или Ангаро-Канский синклиналий), а северная (Заангарская) – байкальскую горно-складчатую систему, состоящую из Исаковского, Большепитского и Ангаро-Питского синклиналиев и Приенисейского и Центрального антиклиналиев, разграниченных зонами тектонических нарушений северо-западного простирания. По данным ГСЗ и МТЗ, мощность коры под Енисейским краем колеблется от 40 до 51 км, мощность литосферы – от 100 км в пределах края Ангарской плиты до 300 км у края Западно-Сибирской, мощность гранитно-метаморфического слоя составляет 21–25 км, а наибольшая мощность базальтового слоя 23–27 км. По особенностям гравитационного и магнитного полей, по составу раннедокембрийского основания, по особенностям фациального состава, степени метаморфизма и мощностям рифейских отложений, проявлениям вулканизма и гранитоидного магматизма в строении Енисейского края выделяется три продольных мегаблока (рис.8): Западный, Центральный и Восточный (Приплатформенный) / 4, 17, 32,36,40,41 /.

З а п а д н ы й – фемический – мегаблок пространственно совпадает с Исаковским синклиналием (пришовный трог) и имеет меланократовое докембрийское основание амфиболит-перидотитового или серпентинитового состава, представляющего собой реликты раннедокембрийских зеленокаменных поясов / 42 /. Выше лежащие позднепротерозойские структурно-вещественные комплексы включают в себя сухопитскую (нижнюю) и тунгусикскую (верхнюю) серии. Первая сложена породами эффузивной и силлово-дайкивой фаций metabазальтовой ассоциации (в различной степени метаморфизованные базальтовые, диабазовые порфириты, диабазы, реже туфы основного состава), развитые преимущественно среди глубоководных аспидных сланцев и пространственно ассоциирующие с телами альпинотипных гипербазитов. Среди выше лежащих терригенно-карбонатных отложений тунгусикской серии известны образования металипарит-андезитобазальтовой ассоциации (андезитобазальтовые

Рис.8. Схема главных структурных элементов Енисейского края: I - выходы дорифейского сиалического фундамента; 2-4 - позднепротерозойские метаблоки: 2 - Западный, 3 - Центральный, 4 - Восточный; 5 - осевые линии зон поперечных дислокаций: Подкаменная (I), Касско-Чапская (2), Большепитско-Кажмбинская (3), Ангаро-Вилуйская (4), Казачинская (5), Нижнеканская (6); 6 - рудные районы в контурах Большепитского синклинория: Ангарский (I), Каменский (II), Вороговский (III).



и андезитовые порфириты, дациты, липаритодациты и риолитовые порфириты, диабазы и габбро-диабазы). Кислые породы ассоциации проявлены слабо (10-15 % от общего объема) и главным образом в пирокластической и экструзивно-субвулканической фациях.

Продукты метабазальтовой ассоциации по петрохимическому составу, тесной пространственной связи с ультрабазитами и по весьма низким концентрациям радиоактивных элементов сопоставляются с океаническими толеитовыми базальтами, характерными для звгеосинклинальных областей, расположенных на огромной территории к западу и юго-западу от Сибирской платформы. Металипарит-андезитобазальтовая ассоциация Исаковского синклинория была сформирована на более позднем этапе развития звгеосинклинали и, по мнению А.Д.Ножкина / 41 /, аналогична андезитовым или андезитобазальтовым формациям молодых складчатых областей или современных островных дуг.

С породами метабазальтовой ассоциации установлена тесная

пространственная связь стратиформной медно-свинцово-цинковой и серно-колчеданной минерализации / 44 /, а в эффузивно-пирокластических образованиях и в субвулканических телах металипарит-андезитобазальтовой ассоциации в зонах интенсивно гидротермальной проработки фиксируется слабо проявленная сульфидная минерализация секущего типа с низким содержанием меди, свинца и цинка.

Ц е н т р а л ь н ы й метаблок — сиалический (Приенисейский и Центральный антиклинории и Большепитский синклинорий), характеризуется увеличением мощности коры с 42 до 49 км. Его фундамент образован сложноскладчатыми метаморфическими и магматическими комплексами архея и раннего протерозоя Северо-Азиатского кратона, подразделяемых на три серии: канскую (гранитизированные гнейсы и гранулиты), енисейскую (амфиболиты, плагиоклаз-амфиболовые сланцы, амфиболовые габбро, биотитовые и биотит-амфиболовые гнейсы, мраморы, кварциты) и тейскую (высокоглиноземистые кристаллические сланцы и мраморизованные карбонатные породы с горизонтами кристаллических сланцев, кварцитов и амфиболитов). Строение, петрографический состав и геохимические свойства архейских комплексов свидетельствуют о высокой зрелости сиалической коры / 41 /. Севернее Ангары сиалические массы архейского фундамента оконтуриваются выходами протерозойских гранитоидов.

Образования позднепротерозойского этапа (сухопитская и тунгусикская серии) носят черты как платформенных, так и геосинклинальных образований. Сухопитская серия состоит (снизу вверх) из кординской, горбилоской, удерейской, погорькой, свиты Карточка и аладьинской свит, из которых четыре нижние образованы преимущественно терригенными, а две последние карбонатными породами. В тунгусикскую серию карбонатно-терригенного состава входят (снизу вверх) красногорская и джурская свиты, иногда объединяемые в одну потоскуйскую, а также шунтарская, токминская и свита Сухого хребта.

В отличие от Западного, в Центральном метаблоке рифейские вулканогенные образования развиты значительно меньше, составляя в разрезе серий от 2 до 5 %. Они картируются в основном в северной наиболее приподнятой части Большепитского синклинория в виде отдельных очагов на границе с антиклинориями. В южной час-

ти (Ангарский рудный район) среди отложений верхнего протерозоя продукты вулканической деятельности практически отсутствуют. Известные вулканические породы объединяются в три бимодальные ассоциации / 36 /: в сухопитской серии – метабазальтовую (диабазы, габбро-диабазы, базальтовые и андезитовые порфириды и их туфы, редко риолитовые и дацитовые порфиры) и метадипаритовую (риолит-дацитовые и дацитовые порфиры и редко андезитовые и базальтовые порфириды и их туфы), а в тунгусикской серии – метандезит-базальтовую: диабазы, базальтовые порфириды, андезитовые, андезит-базальтовые и андезитовые порфириды (80–90 %), риолитовые и дацитовые порфиры (10–15 %) и их туфы. Вулканогенные породы нижнего стратиграфического уровня отвечают контрастной дифференцированной базальт-дипаритовой формации, а верхнего – андезитобазальтовой. Известные в Центральном мегаблоке кислые породы по составу и особенностям эволюции (характерен положительный тренд накопления железа, титана и щелочей от древних к молодым) соответствуют типичным континентальным толдам устойчивых областей. В сухопитской серии размещаются массивы тейского мигматит-гранитового комплекса (950 ± 50 млн лет), состоящие из лейкократовых турмалиновых гранитов, гнейсовидных гранитов и пегматитов, а отложения тунгусикской серии секутся гранитами, адеманеллитами и диоритами татарско-аяхтинского гранитового комплекса (860 ± 60 млн лет) / 9, 10 /.

На площади Большепитского синклинория находится около 80 % общего числа точек полиметаллического оруденения, известных к настоящему времени на Енисейском кряже. На состав и размещение оруденения в Большепитском синклинории заметное влияние оказывают зоны северо-восточных поперечных дислокаций (см. рис. 8), которые разделяют синклинорий на три рудных района (с юга на север): Ангарский, Каменский и Вороговский. Основная масса полиметаллических рудопоявлений отчетливо тяготеет к южной (наиболее опущенной) части синклинория (Ангарский рудный район), где преимущественно развиты галенит-сфалеритовые рудные тела, залегающие согласно с вмещающими их породами джурской, шунтарской и токминской свит тунгусикской серии. Серный колчедан (пирит, пирротин) составляет 10–15 % от массы руды, иногда его количество увеличивается в рудах, залегающих в существенно углеродистых сланцевых пачках, до 50–60 %, и тогда они приобретают состав

колчеданно-полиметаллических. На площади Каменского рудного района (между Большепитско-Камбинской и Касско-Чапской зонами поперечных дислокаций) заметную роль начинают играть пирит-пирротиновый с галенитом и сфалеритом и галенит-халькопирит-пирит (пирротин)-сфалеритовый типы руд / 45,48 /. Они залегают в пачках чередующихся между собой горизонтов эффузивов и туфов основного и кислого состава с горизонтами темно-серых сланцев, реже известняков и доломитов. Рудовмещающие породы прорваны телами гранитоидов. Характерно, что медью в основном обогащены те руды, в составе вмещающих пород которых известны вулканогенные породы, часто калиево-натриевого уклона. В существенно сланцевых найдены сплошные серно-колчеданные руды (пиритовые и пирит-пирротиновые), практически лишенные свинца, цинка и меди.

В северной части Большепитского синклинория на площади Вороговского рудного района известны лишь отдельные точки полиметаллической минерализации также в карбонатно-вулканогенно-терригенных отложениях тунгусикской серии. В рудном районе интенсивно проявлен кислый вулканизм калиевого уклона, а также базальтоидный и щелочно-базальтоидный / 36 /.

Таким образом, по простиранию региональных структур края с юга на север наблюдается изменение вещественного состава свит тунгусикской серии от преимущественно карбонатных и терригенно-карбонатных (Ангарский рудный район) до карбонатно-вулканогенно-терригенных (Вороговский рудный район) и воздымание раннедокембрийского кристаллического основания. В этом же направлении происходит изменение полиметаллической минерализации с увеличением объема цинково-свинцовых и медно-цинково-свинцовых руд.

Кроме колчеданно-полиметаллического и свинцово-цинкового оруденения, для Центрального метаблока характерны золотые, сурьмяные и редкометалльные проявления, т.е. весь спектр металлов, которые присутствуют в областях сиалического профиля. Установлена отчетливо выраженная пространственная и временная обособленность золотого и полиметаллического оруденения / 4 /. В отличие от полиметаллического золотое оруденение локализовано в существенно сланцевой (нижней) части сухопитской серии, включающей горбилосскую и удерейскую свиты, вскрытые в восточной при-сводовой части и в восточном крыле Центрального антиклинория вблизи зоны Татарского разлома.

Вышеизложенное позволяет предполагать единую в контурах Большепитского синклиория рудогенерирующую систему, функционирующую в условиях перикратонного тектонического режима и стимулирующую мобилизацию, перераспределение и образование рудных концентраций.

Таким образом, геоструктуры типа Большепитского синклиория по характеру осадочного заполнения, парагенезисам формаций (господство терригенно-карбонатных и карбонатных формаций, при крайне незначительной роли вулканитов, имеющих натриево-калиевую субщелочную специализацию), слабой степени метаморфизма и другим признакам (длительностью развития, общность разрезов с другими участками плиты и т.д.) характеризуют прогибы, которые развиваются в условиях мелководных окраинно-континентальных шельфовых палеобассейнов по краям кратона. С внешней стороны перикратонные опускания ограничиваются поясами развития основных интрузий и трогов с эвгеосинклинальными эффузивно-карбонатно-сланцевыми формациями / 2I /.

В о с т о ч н ы й мегаблок (Ангаро-Питский синклиорий), также сиалический, располагается в краевой (приплатформенной) части Енисейского кряжа. Он аматматичен и сложен: в осевой части отложениям осянкой и тунгусикской серий, а на бортах — породами сухопитской. Для синклиория отмечается простота строения, спокойные пликативные структуры и умеренное развитие дизъюнктивных нарушений. На площади Восточного мегаблока полиметаллическая минерализация проявлена весьма слабо.

Типовые многофакторные модели обстановок нахождения
стратиформного свинцово-цинкового оруденения
в Ангарском рудном районе

Практическое использование этих моделей в экспертных системах предусматривает создание базы знаний, которая должна быть реализована в виде иерархической системы фреймов и которая позволит ЭС производить поиск решений на основе процедур логического вывода. Следовательно, геологическая модель должна включать комплекс факторов и признаков формирования рудных объектов разного ранга, необходимых и достаточных для выявле-

ния перспективных площадей соответствующих рангов. В общем случае эти факторы имеют геологическое, геохимическое и геофизическое содержание^ж.

Первая типовая ситуация свойственна свинцово-цинковым рудам, которые контролируются биогермными и рифогенными постройками и горизонтами сингенетических карбонатных брекчий вулканогенно-карбонатно-терригенной формации / 50 /. Модель построена на примере полиметаллических рудопоявлений Морянихо-Меркурихинского рудного поля (рис. 9) / 2 /.

Подстилающими в пределах рудного поля являются отложения алевритоглинистой сланцевой субформации (красногорская свита), которая состоит из пачки переслаивающихся между собой глинистых и алевритоглинистых сланцев, кварцитовидных алевролитов реже мелкозернистых песчаников. Перечисленные породы рассматриваются в качестве единого обобщенного литотипа, отвечающего обстановкам накопления сублитеральной (неритовой) зоны (рис. 10). Формирование осадков происходило выше базиса волнения.

Рудовмещающая толща - джурская свита (вулканогенно-сланцево-доломитовая субформация) характеризуется большим разнообразием слагающих пород и фациальной их изменчивостью. В нижней ее части выделяются следующие пачки (снизу вверх): 1) гравелистов; 2) хомогенных железистых доломитов и известняков; 3) доломитовых и известняковых интракластов; 4) биогермно-биостромовая водорослевых железистых доломитов. Выше залегает пачка алевритоглинистых, глинистых и алевритовых сланцев, относящихся к турбидитам, которые являются инъективным элементом разреза рудовмещающей толщи. Они лишь на незначительное время меняли общий характер осадконакопления. Завершает разрез пачка карбонатных седиментационных брекчий, состоящих из обломков доломитов и известняков и глинистого и карбонатно-алевритоглинистого матрикса. В его составе предполагается наличие измененного пеплового материала. Анализ распространенности фациальных разновидностей оползневых отложений указывает на то, что оползанию подвергались отложения со склонов локальных подводных поднятий.

^ж Кроме личных наблюдений в них учтены материалы общих поисков и поисково-оценочных работ, выполненных Ангарской ГРЭ ПГО "Красноярскгеология" / 23,48 /, а также опубликованные по этому вопросу данные из работ Красноярского отделения СНИИГГМС /45/.

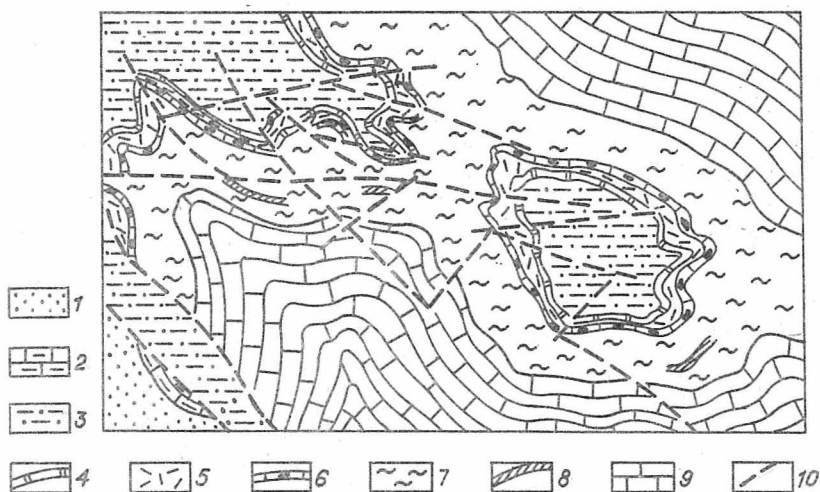


Рис.9. Схема геологического строения Моряних-Меркурихинского рудного поля по / 2,50 /:

1-2 - сухопитская серия: 1 - алевритоглинистые сланцы тисской свиты, 2 - пестроцветные глинистые известняки, известковистые сланцы сосновской свиты; 3-9 - тунгусикская серия: 3 - подстилающая толща (красногорская или меркурихинская свита) - глинистые сланцы и алевролиты, 4-6 - рудовмещающая толща (джурская или морянихинская свита): 4 - нижняя рудоносная пачка доломитов и водорослевых доломитов, 5 - междурудная пачка глинистых сланцев и алевролитов, 6 - верхняя пачка карбонатных седиментационных брекчий; 7-8 перекрывающая толща (шунтарская или рассохинская свита): 7 - пачка глинистых, часто хлоритовидных, сланцев и углеродистых глинистых известняков, 8 - горизонт углеродистых глинистых и известково-глинистых сланцев с сульфидной минерализацией; 9 - слоистые известняки токминской или горевской свиты; 10 - тектонические нарушения.

Перекрывающая толща состоит из чередования глинистых сланцев различного состава (известняково-сланцевая субформация - шунтарская свита).

Основная масса свинцово-цинковых руд сосредоточена в пач-

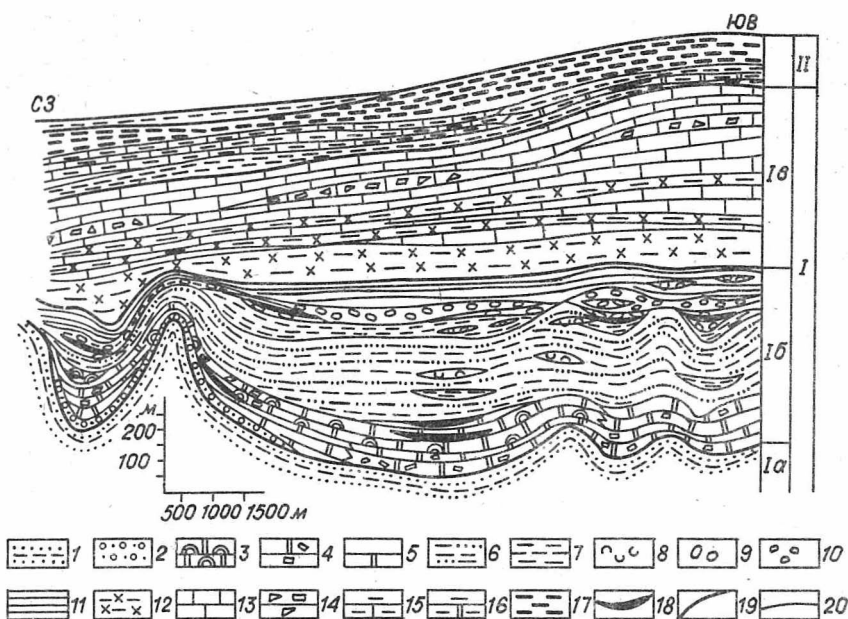


Рис.10. Палеофациальный профиль на период формирования рудных залежей Морянихо-Меркурихинского рудного поля (составил С.В. Сараев):

I-I7 - генетические типы отложений и отдельные разновидности пород (снизу вверх по разрезу): I - тонкое линзовидное переслаивание глинистых сланцев и алевролитов (песчаников), относящихся к сублиторальной зоне, 2 - гравелиты, 3 - хомогенный тиховодный тип железистых доломитов, 4 - механогенный (волновой) тип доломитовых интракластов, 5 - биогермно-биостромовый; тип водорослевых доломитов, 6 - турбидиты алевроитоглинистые, 7 - глинистые сланцы, 8 - линзовидные прослои туффитов, 9-10 - оползневые брекчии и олигостромы (9 - крупнообломочные, 10 - мелкообломочные), II - глинистые отложения тиховодной западинно-шельфовой обстановки, прослои паратуффитов (?), I2 - западинно-шельфовые (возможно пелагические) тиховодные высокорезные глинистые отложения, I3 - хомогенные тиховодные пелагические известняки, оползневые известняки, I4 - обломочные относительно глубоководные известняки, фациально связанные

с оползневыми известняками, I5 - известково-глинистые сланцы, глинистые известняки, I6 - доломитоглинистые сланцы, глинистые доломиты, I7 - углеродистые глинистые глубоководные отложения эвксинского типа; I8 - рудные тела (вне масштаба); I9 - границы формаций, субформаций, крупных пачек; 20 - границы разновидностей пород.

I - вулканогенно-карбонатно-терригенная формация (субформации: Ia - алевроитоглинистая сланцевая, Ib - вулканогенно-сланцево-доломитовая, Iv - известняково-сланцевая); II - вулканогенно-известняково-сланцевая углеродистая формация.

ке карбонатных седиментационных брекчий и в водорослевых железистых доломитах (см. рис. 10). На площади развития этих пачек установлено несколько рудных тел пластовидной формы, залегающих согласно с вмещающими породами, которые заражены рудными минералами. Контакты рудных тел с вмещающей толщей нерезкие, постепенные, горизонт со стратиформным свинцово-цинковым оруденением распространен на значительной площади (первые десятки километров).

Руды представлены галенитовыми, галенит-сфалеритовыми, галенит-сфалерит-пиритовыми разновидностями единой галенит-сфалерит-пирит-кварц-анкеритовой парагенетической минеральной ассоциацией. Главные рудные минералы - галенит, сфалерит, пирит; нерудные - кварц и железистые карбонаты. В качестве второстепенных отмечаются халькопирит, пирротин, блеклые руды, мусковит, хлорит. Руды большей частью приурочены к сингенетичным брекчированным доломитам и конгломератовидным известнякам, поэтому преобладают вкрапленные и пятнистые текстуры. Иногда наблюдаются обломки руд, сцементированные подобной же рудной массой.

Поздняя кварц-карбонат-сульфидная жильная ассоциация чаще наблюдается в тектонически нарушенных зонах. В жильной ассоциации, кроме сфалерита, галенита и пирита, в значительных количествах могут присутствовать халькопирит и блеклые руды.

Парагенетическая связь свинцово-цинкового оруденения с карбонатными органогенными постройками известна и в других районах: Прибайкальском / 56 /, Юдомо-Майском / 69 / и Жуинско-Патомском прогибах докембрийского складчатого обрамления Сибир-

ской платформы, в протерозое Австралии, в ордовике Центральных Пиринеев, в позднем кембрии юго-восточной части штата Миссури (США), в девоне Канады (Пайн-Пойнт) и южного Китая.

Для выявления индикаторных особенностей руд авторами изучен изотопный состав серы. Оценивая его в целом для сульфидов Моряних-Меркурихинского рудного поля, можно отметить довольно узкий диапазон вариаций $\delta^{34}\text{S}$, общую тенденцию обогащения тяжелым изотопом (существенное "утяжеление" серы по отношению к метеоритному стандарту) и однородность состава (рис. II). Так, $\delta^{34}\text{S}$ пиритов из сланцевых и карбонатных пачек рудовмещающей толщи варьирует от +6,5 до 20,7 ‰.

Сульфиды пирит-галенит-сфалеритовых руд из пачки седиментационных карбонатных брекчий имеют также тяжелый изотопный состав серы с минимальными его вариациями (в ‰): для сфалерита - от +18,1 до +21,1, галенита - от +14,4 до +17,0, пирита - от +16,7 до +19,7, в то время как состав серы сульфидов из поздних, секущих, кварц-карбонат-сульфидных прожилков и жил облегчается (в ‰): в сфалерите - от +14,0 до +14,7, галените - от +5,2 до +13,8, пирите - от +10,4 до +14,7, халькопирите - от +11,3 до +14.

Сера пиритов сфалерит-галенит-пиритовых руд из пачки органогенных доломитов также гомогенна и богата изотопом $\delta^{34}\text{S}$: от +18,9 до +20,7 ‰.

Все разновидности карбонатных пород обогащены легкими изотопами углерода. На фоне общего облегчения изотопного состава карбонатов в ассоциации с рудными минералами этот процесс еще более заметен. Так, в безрудных седиментационных карбонатных брекчиях, где карбонат нередко представлен анкеритом, средний изотопный состав углерода и кислорода равен соответственно $-0,75 \pm 0,5$ и $+17,4 \pm 0,2$ ‰, а в ассоциации с пирит-галенит-сфалеритовыми рудами облегчается соответственно до $-2,4 \pm 1,2$ и $+14,5 \pm 1,8$ ‰. Одновременно с облегчением изотопного состава карбонатов рудной ассоциации происходит увеличение содержания в них сидеритовой молекулы на 2-6 % по сравнению с "бессульфидными" анкеритами.

В пачке водорослевых железистых доломитов прослеживается та же закономерность облегчения изотопного состава карбонатов, что и в конгломератсвидных известняках.

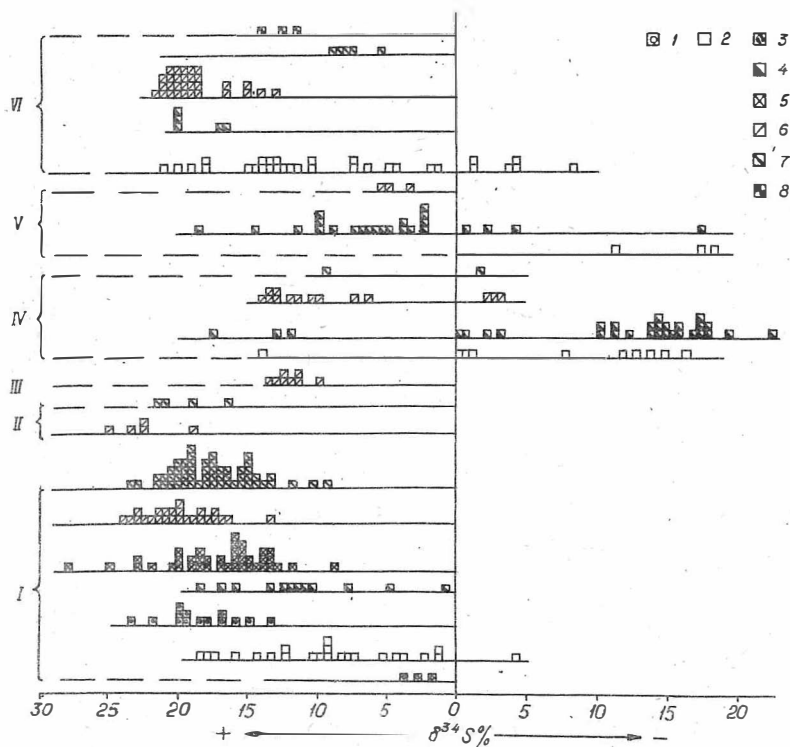


Рис.II. Гистограмма изотопного состава серы пород и сульфидов руд из стратиформных проявлений Ангарского рудного района.

Месторождения и рудопроявления: I-III - Горевское (I - Горевское, II - Рудаковское, III - точки минерализации на Кулаковском профиле); IV-V - Рассохинское (IV - Линейное, V - Лимонитовое) и Моряниха-Меркурихинское (VI - Морянихинское и Меркурихинское) рудные поля.

I - сера даек оливиновых долеритов; 2 - сера пирита и общая сера пород, вмещающих рудные залежи; 3-7 - сера сульфидов руд: 3 - арсенопирита, 4 - пирита, 5 - пирротина, 6 - сфалерита, 7 - галенита.

Вторая типовая ситуация свойственна колчеданно-полиметаллическому оруденению в углеродистых сланцевых толщах на удалении от рудоподводящих каналов. Продуктивная часть углеродистых сланцевых толщ выполняет локальные впадины в наиболее прогнутых частях палеодепрессий. Примером могут служить колчеданно-полиметаллические залежи Линейного и Лимонитового рудопроявлений Рассохинского рудного поля (рис. 12), приуроченные к отложениям шунтарской свиты / 3, 46, 47 /. Рудопроявления этого типа занимают достаточно определенное положение в разрезах рудоносных структурно-вещественных комплексов (в настоящем случае - тунгусикская серия), располагаясь в средних частях вертикальных формационных рядов, выполняющих региональные геоструктуры / 65 ./.

Рудовмещающий разрез (вулканогенно-известняково-углеродисто-сланцевая формация) на Линейном и Лимонитовом рудопроявлениях расчленяется на две пачки: нижнюю - углеродистую карбонатно-сланцевую и верхнюю - углеродистую сланцевую бескарбонатную. Нижняя пачка сложена филлитовидными алевролитами, слюдисто-известковистыми, графитисто-слюдисто-известковистыми сланцами, углеродистыми глинистыми известняками с горизонтами конседиментационных, седиментационных карбонатных брекчий. Глинистые и алевритоглинистые породы нижней пачки характеризуются резко выраженной неоднородностью химического состава, что, видимо, связано с неравномерной примесью вулканомиктового материала. По значениям глиноземистого модуля они относятся к кварцитовидным алевролитам, алевролитам и алевритовым аргиллитам. Также резко изменчиво в них содержание и соотношение щелочей.

Верхняя, рудовмещающая, часть разреза состоит из филлитовидных графитистых алевролитов, углеродистых кварц-слюдистых и кварц-карбонат-слюдистых сланцев с прослоями алевритовых сланцев и серицитовых кварцитов (седиментационно-диагенетических силицитов), характерно постоянное присутствие в породах вкрапленности, иногда обильной, пирита (рис. 13). В целом образования верхней пачки можно рассматривать как единый генетический тип - углеродистые пиритовые сланцы застойных пелагических обстановок осадконакопления (тип глубоководного эвксинского палеобассейна с ограниченной циркуляцией). Единичные маломощные

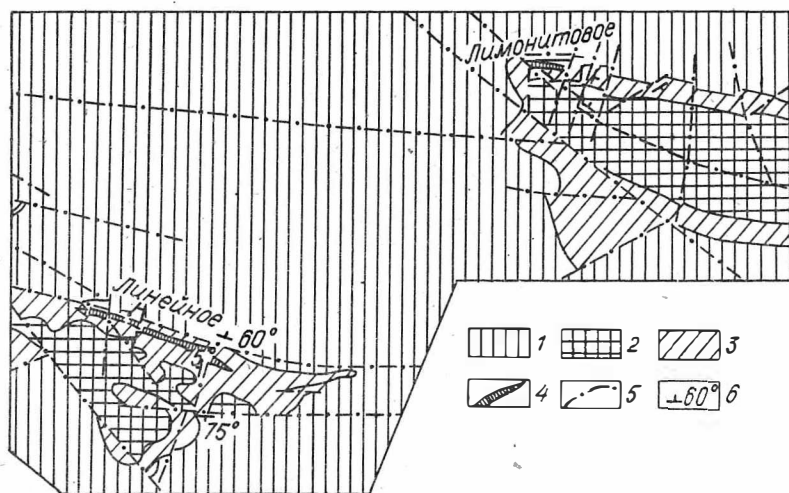


Рис.12. Схематическая геологическая карта Рассохинского рудного поля:

1 - нерасчлененные отложения сосновской и потоскуйской свит;
 2-3 - рудовмещающая толща (шунтарская или рассохинская свита): 2 - углеродистая карбонатно-сланцевая пачка, 3 - рудоносная пачка - углеродистая сланцевая бескарбонатная; 4 - галенит-сфалерит-пиритовые руды; 5 - линии тектонических нарушений; 6 - элементы залегания разрывных нарушений.

слои карбонатно-глинисто-алевроитовых турбидитов соответствуют элементам инъективного режима осадконакопления и схожи с современными турбидитами глубоководных частей континентального склона и его подножия. По химическому составу выделяется два типа пород верхней пачки. Первый (алевролиты) отвечает мало-щелочным породам высококалиевого (по соотношению щелочей) семейства. Второй тип характеризуется низкими значениями глиноземистого модуля и параметрами общей меланократовости. Для него отмечается натриево-калиевый и калиевый уклон в соотношении щелочей.

Рудные залежи в контурах Рассохинского рудного поля прослеживаются на значительные расстояния по простиранию. Резуль-

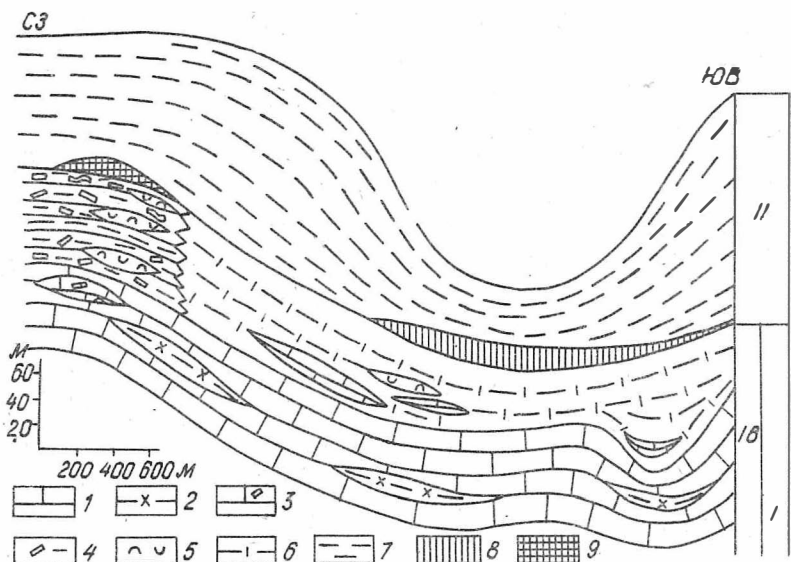


Рис.13. Палеофациальный профиль на период формирования рудных залежей Линейного месторождения Рассохинского рудного поля по С.В.Сараеву:

1-7 - генетические типы отложений и отдельные разновидности пород: I - хемогенные тиховодные пелагические известняки, 2 - высокоглиноземистые глинистые пелагические отложения, 3 - оползневые известняковые брекчии, 4 - оползневые брекчии алевритоглинистых отложений, 5 - туффиты, 6 - углеродистые известковистые глинистые отложения, 7 - углеродистые глинистые глубоководные отложения эвксинского типа; 8 - слоистые галенит-сфалерит-пиритовые руды; 9 - вкрапленные свинцово-цинковые руды. I - вулканогенно-карбонатно-терригенная формация (Iв - известняково-сланцевая субформация), II - вулканогенно-известняково-сланцевая углеродистая формация.

таты детального картирования скважин показывают, что они распадаются на ряд индивидуализированных согласных с напластованием вмещающих пород, иногда кулисообразно залегающих рудных

тел пластово-линзовидной формы. Элементы строения рудных тел - частое чередование рудных и нерудных прослоев и в целом постепенный переход от слабо оруденелых пород к массивным пиритовым и сфалерит-пиритовым рудам. Среди текстурных особенностей руд следует особо подчеркнуть широкое развитие реликтовых ритмично-слоистых, волнисто-слоистых, плйчато-слоистых и других осадочных текстур / 47 / с трещинами синерезиса в отдельных прослоях массивного пирита и следами размыва еще слабо литифицированных сульфидных илов. Рудные слойки по своей морфологии ничем не отличаются от "породных" слоев, являющихся неотъемлемой составной частью рудных горизонтов. При увеличении количества тонких рудных слоев их "плотность" становится значительной и мы уже говорим о рудном теле. В ритмопостроенных пластах руды отвечают элементу ритма.

Минеральный состав руд прост. Главными первичными рудными минералами являются пирит, пирит-мельниквит, сфалерит и галенит. На долю пирита приходится до 60-70 %, а в отдельных случаях и до 90 % от общего объема минералов, слагающих прослой. Арсенопирит, пирротин, халькопирит, бурнонит - второстепенные. Из нерудных минералов обычны кварц, серицит, флогопит, хлорит, мусковит, карбонаты (иногда железистые), рутил, сфен. Выделяется три парагенетические минеральные ассоциации. Наиболее ранняя, отвечающая по времени формирования син-диагенетическому этапу, - галенит-сфалерит-мельниквит(?) - пиритовая ассоциация, для которой типоморфны глобулярные агрегаты дисульфида железа, сфалерита и галенита. Вторая ассоциация - зернистая галенит-сфалерит-пирротин-пиритовая - отвечает этапу метаморфической перекристаллизации минеральных форм первой ассоциации. И, наконец, третья - пирит-галенит-сфалеритовая минеральная ассоциация с кварцем и карбонатом является наиболее поздней и представляет лишь минералогический интерес. Это жилки альпийского типа в участках тектонических нарушений.

Перечисленные геологические особенности строения Рассохинского рудного поля свидетельствуют об иной, чем на Морянихо-Меркурихинском рудном поле, батиметрической, структурной и геохимической обстановке накопления металлоносных осадков. Во-первых, это были этносительно глубоководные на фоне мелководья впадины-ловушки. Во-вторых, формирование руд проходило в за-

стойной восстановительной обстановке. В противном случае в подвижной окислительной мелководной среде сульфиды бы не сохранились.

Изотопно-геохимическая модель серы в рудных залежах Рассохинского рудного поля рассматривалась ранее / I4,50 /.

В отличие от изотопно-геохимической модели свинцово-цинковых руд Морянихо-Меркурихинского рудного поля в рудных залежах Рассохинского рудного поля выявляются широкие вариации изотопного состава серы пиритов рудных тел и углеродистых сланцев от +18,2 до -22,2 ‰, при явном обогащении легким изотопом (см. рис. I3). Нет существенных различий и в изотопном составе вкраплений пирита углеродистых сланцев и пирита слоистой серно-колчеданной руды. Во-первых, значения $\delta^{34}\text{S}$ незакономерно варьируют как по глубине, так и по простиранию рудной залежи. Во-вторых, при общей тенденции разброса величин $\delta^{34}\text{S}$ от +18,2 до -22,2 ‰ все пробы пирита Лимонитового рудопоявления оказались существенно обогащены изотопом $\delta^{34}\text{S}$ при вариациях от +4 до +18,5 ‰. Поскольку по вещественному составу вмещающая рама и рудные залежи Линейного и Лимонитового рудопоявлений идентичны, причину в различиях соотношений изотопного состава серы, возможно, следует искать в особенностях физико-химических условий рудоотложения. Так, в случае Лимонитового рудопоявления сульфатредукция, по мнению Л.Н.Гриненко / I4 /, осуществлялась в более окислительных условиях, в осадке под окисленным слоем. В связи с дефицитом сульфата в осадке восстановленные формы серы (редуцированный сероводород и образованные из него впоследствии сульфиды) оказались существенно обогащены ее тяжелым изотопом. В случае же Линейного рудопоявления все пробы показали существенное обогащение легким изотопом $\delta^{32}\text{S}$, что соответствует условиям, когда сульфатредукция протекала в осадке при восстановительных условиях и неограниченном количестве сульфата. Таким образом, естественная латеральная изменчивость физико-химических условий привела к значительным вариациям изотопного состава серы пиритов из руд различных участков единого рудного горизонта.

Важной особенностью данной изотопно-геохимической модели является также более гомогенный состав и обогащение тяжелым изотопом серы сфалерита и галенита по сравнению с находящимся

с ним в ассоциации пиритом. Значения $\delta^{34}\text{S}$ колеблются от $-0,2$ до $+18,6$ ‰ и в среднем по Линейному рудопроявлению составляют для сфалерита $+6,9$ ‰, а для галенита $+6,3$ ‰ / 3,50 /.

Изучение изотопного состава углерода и кислорода карбонатов из вмещающих серно-колчеданно-полиметаллические залежи пород показало присутствие в них кислорода с изотопным составом, варьирующим в пределах от $+15,7$ до $+18,6$ ‰, и относительно однородным изотопным составом углерода ($-4,6 \pm 2,1$ ‰). Полученные изотопные данные отражают первично-осадочный морской генезис вмещающих пород, изотопный состав кислорода которых несколько облегчался в результате процессов диагенеза и регионального метаморфизма. Рассмотрев результаты изотопного анализа углерода, отмечаем некоторое обогащение углерода карбонатов легким изотопом $\delta^{12}\text{C}$ при вариациях. $\delta^{13}\text{C}$ от $-2,13$ до $-7,17$ ‰. Это обстоятельство позволяет предполагать смешанный источник углерода карбонатов рудовмещающей толщи, одним из которых, видимо, мог быть окисленный до CO_2 углерод органического происхождения.

Третья типовая ситуация представляет собой вариант свинцово-цинковых месторождений, залегающих в небольших по размерам, но глубоких депрессионных впадинах, выполненных тиховодными пелагическими сланцево-карбонатными отложениями. Выделенная нами на примере Горевского рудного поля эта типовая ситуация отличается от описанных выше прежде всего тем, что руды являются в основном цинково-свинцовыми со значительной долей пирротина, значительно преобладающего над пиритом / 19,33,45 /. Второй особенностью можно считать существенно карбонатный состав рудовмещающих пород, преобладание известняков над доломитами и подчиненное значение слюдяных сланцев. Рудовмещающими (рис. 14) являются отложения нижней сланцево-карбонатной пачки токминской свиты. Выше залегают образования известняковой (флишовой) толщи (средняя и верхняя пачки токминской свиты) / 33 /.

Детальное изучение Горевского месторождения позволяет подразделить рудовмещающую толщу (нижняя пачка) на две части: надрудную и подрудную. Первая представлена микрезернистыми слоистыми известняками, ритмическое строение которых обусловлено периодическим повторением слоев известняка и тонких прослоев уг-

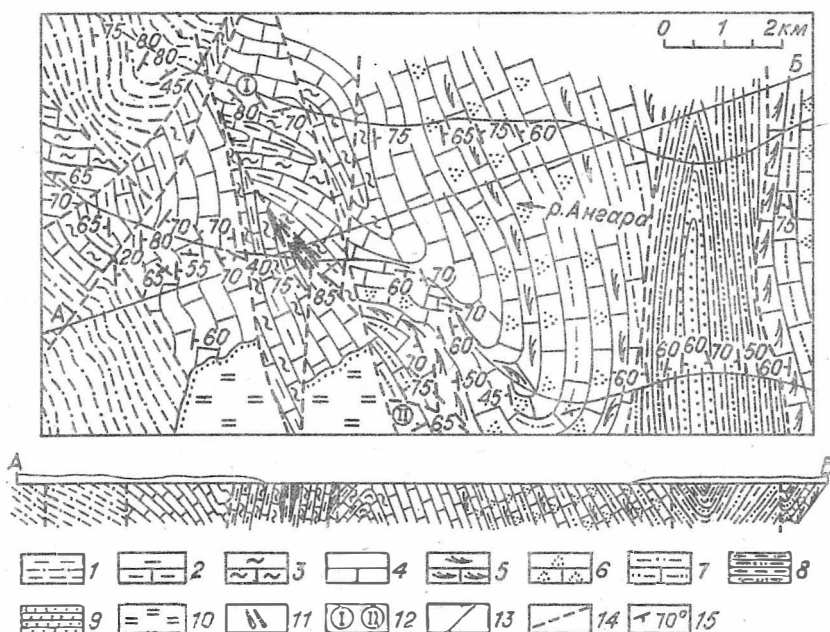


Рис. 14. Схематическая геолого-литологическая карта и геологический разрез Горевского рудного поля по / 33 /:

I–10 – породные ассоциации в стратиграфической последовательности (снизу вверх): I – углеродисто-глинистые и глинистые сланцы (шунтарская или рассохинская свита), 2–7 – токминская (горевская) свита: 2–3 – углеродистые (2) и ритмично-слоистые (3) глинистые, доломитистые и кремнистые известняки и углеродистые алевритоглинистые сланцы нижней (рудовмещающей) пачки, 4 – массивные известняки средней пачки, 5–7 – косослоистые (5), градиционно-слоистые (6) и алевритоглинистые (7) известняки верхней пачки; 8–9 – глинистые, алевритовые углеродистые сланцы (8) и кварцитовидные песчаники алевродиты (9) свиты Сухого хребта; 10 – терригенно-известковистые отложения чаргинской свиты палеозоя; 11 – рудные залежи пирротин-сфалерит-галенитовых руд Горевского месторождения; 12 – рудопроявления: Рудаковское (I) и Картичное (II); 14 – тектонические нарушения; 15 – элементы залегания.

леродистых глинистых, кварц-глинистых и кварц-известково-глинистых сланцев. Более крупные ритмы отличаются степенью доломитистости слагающих известняков. Подрудная пачка выделяется увеличением в ее составе прослоев сланцев. В целом среди разновидностей пород рудовмещающей толщи в порядке распространенности намечается ряд: известняки, углеродистые глинистые известняки, глинистые, известково-глинистые и алевритоглинистые углеродсодержащие сланцы, доломитовые и доломитистые известняки. Отмеченные закономерности в строении рудовмещающей толщи подтверждают представления о присутствии в ее составе следующих генетических типов отложений: хомогенных тиховодных пелагических карбонатных и углеродсодержащих глинистых, формирующихся в условиях изменения режима углекислоты. Наложение на первичные осадки последующих процессов диагенеза, эпигенеза и метаморфизма не сопровождалось привнесом вещества извне. Первичные мергелистые и глинистые прослои превращались в их метаморфические сланцевые аналоги, а известковистые прослои — в мелкозернистые мраморы.

Рудовмещающая толща перекрывается известняковой (флишовой) толщей, сложенной алевритоглинистыми, слабоалевритистыми, углеродсодержащими глинистыми, в меньшей степени доломитистыми и доломитовыми и собственно известняками; редкими маломощными прослоями кремнистых доломитов, анкеритов и сидеритов, глинистых сланцев, карбонатных гравелитов и гравелитобрекчий. Среди генетических типов отложений известняковой (флишовой) толщи С.В.Сараевым / 50 / выделены: 1) механогенные карбонатного и силикатного состава (карбонатные турбидиты, тиховодные пелагические силикатного состава; оползневые карбонатные; брекчиевые (осыпные)); 2) хомогенные тиховодные пелагические карбонатные; 3) хомогенные со значительной долей эксталяционного материала. Появление турбидитов в известняковой толще указывает на общий глубоководный характер их образования. Единственными магматическими образованиями рудного поля являются дайки и небольшие интрузивные тела основного состава, секущие как породы рудовмещающей толщи, так и руды. Рудовмещающая сланцево-карбонатная толща ритмично-слоистого строения Горевского месторождения напоминает осадочные, рудовмещающие толщи, заключающие стратиформные цинково-свинцовые месторождения типа Каратау и Шалкин в Казахстане.

Как уже было сказано, все цинково-свинцовые руды Горевско-го рудного поля, как и самого Горевского месторождения, относятся к единому пирротин-сфалерит-галенитовому минеральному типу. Рудные тела в среднем состоят на 80 % из сидероплезита, анкерита и кварца и лишь на 20 % из сульфидных минералов, представленных в основном галенитом, сфалеритом и пирротинном. Второстепенные и редкие минералы: магнетит, кирит, арсенопирит, бурнонит, буланжерит, тетраэдрит, теннантит, гудмундит, халькопирит, пираргирит, брейтгауптит, ульманит, самородное серебро и некоторые др. Показательно крайне незначительное распространение минералов меди, содержание которой обычно составляет 0,001-0,01 %. Наряду с железистыми карбонатами, из несulfидных минералов в рудах обычны кварц, серицит, биотит, хлорит, амфибол, гранат и апатит. На Горевском месторождении выделяется сфалерит-галенит-пирротин-кварц-сидероплезитовая с пиритом и магнетитом парагенетическая ассоциация (реликтовая), которая была сформирована в результате гидротермально-осадочной деятельности. Вторая ассоциация сульфидов образовалась в процессе метаморфизма без привноса дополнительных рудообразующих растворов. Реликты первичных руд сохранились в существенно кремнистой массе, которая в силу своих физико-химических свойств наименее подвержена воздействию метаморфизующих растворов. Следующая парагенетическая ассоциация сформирована в ходе внедрения даек оливиновых долеритов и локального динамометаморфизма - амфибол-биотит-хлорит-сфалерит-галенит-магнетит-гранатовая. На регрессивной стадии метаморфизма образовалась парагенетическая ассоциация минералов за счет переотложения первичных руд в зонах тектонических нарушений - кварц-карбонат-сульфидная (сфалерит, галенит, пирротин, пирит).

На Горевском месторождении выявлены три основных кулисо-расположенных рудных тела: Главное, Западное и Северо-Западное, а также несколько мелких линз / 45,60 /, имеющих форму пластовидных и пластово-линзовидных залежей. Длина их по простиранию в 5-6 раз превышает мощность. Условные контакты рудных тел сравнительно ровные и чаще всего параллельны слоистости вмещающих пород, простираясь в северо-западном направлении и круто падая на юго-запад. Все три главных рудных тела состоят, в свою очередь, из нескольких сближенных линз, разделенных телами сла-

бо минерализованных железистых карбонатов мощностью в первые метры, и характеризуются крутым юго-восточным склонением.

По составу сульфидов выделяются четыре типа руд: пирротиновые, галенит-пирротин-сфалеритовые, пирротин-галенитовые и галенитовые. Выделение таких типов руд в какой-то мере условно, так как между ними имеются все переходные разновидности. Различные минеральные типы руд занимают вполне определенное положение в объеме рудных тел. Галенитовые и пирротин-галенитовые преимущественно сконцентрированы в центральных частях Главного и Западного рудных тел. Количество пирротиновых руд возрастает с глубиной ближе к краевым частям рудных тел. Галенит-пирротин-сфалеритовые преобладают в Западном и Северо-Западном рудных телах и присутствуют висячем боку Главного рудного тела. Постоянная вкрапленность пирита и магнетита отмечается на фланге рудных тел, а в значительном количестве эти минералы присутствуют в рудах Северо-Западной залежи вплоть до образования отдельных горизонтов кремнисто-магнетитовых руд.

Для всех минеральных типов наиболее характерны вторичные (метаморфические) текстуры Руд - полосчатая, брекчиевидная, полосчато-прожилковая и полосчато-вкрапленная; менее распространены первичные - массивная и реликтовые слоистые. В целом в рудах, богатых галенитом, развиты прожилковидные, сетчатые и пятнисто-брекчиевидные текстуры, а из реликтовых слоистых - неравномерно- и ритмично-слоистая, а также послойно-вкрапленная.

Исследованиями изотопного состава серы установлено / 15 /, что все сульфиды руд существенно обогащены тяжелым изотопом, в среднем до $17,6 \pm 3,2$ ‰, при диапазоне вариаций значений $\delta^{34}\text{S}$ в пределах от +10,5 до +23,8 ‰ (см. рис. 13).

Замечено, что изотопный состав серы сульфидов Главного и Западного рудных тел изменяется от ранних к поздним парагенетическим минеральным ассоциациям. Так, если для галенита, сфалерита и пирротина первой ассоциации максимальная частота $\delta^{34}\text{S}$ приходится на диапазон 18-22 ‰, то для этих же минералов, возникших в результате метаморфической перекристаллизации, диапазон вариаций 14-17 ‰. Сульфиды самой поздней минеральной ассоциации из маломощных прожилков, секущих ранее отложенные руды, имеют наиболее легкий изотопный состав серы от 10 до 17,8 ‰.

при среднем для сульфидов ассоциации $13,4 \pm 2,5$ ‰. Среднее значение $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов из прожилков составляет (в ‰): пирротин $13,3 \pm 1,8$, сфалерит $16,6 \pm 1,2$, галенит $11,9 \pm 2,0$ и пирит $12,2 \pm 2,5$ / 15 /.

Для установления взаимосвязи руд с вмещающими породами и магматическими проявлениями были определены содержания и изотопный состав серы ряда проб осадочных пород и даек. Для осадочных пород определялись количество и изотопный состав пиритной и сульфатной серы совместно (в пробах осадочных пород не было обнаружено сульфидов, разлагаемых в соляной кислоте), для дайковых пород — общей серы, включающей сульфидную и сульфатную ее формы. Сера осадочных пород обнаружила довольно широкий диапазон вариаций $\delta^{34}\text{S}$ от отрицательных ($-4,1$ ‰) до высоких положительных величин ($+18$ ‰), причем большинство проб в разной степени обогащено ^{34}S . Породы из различных пачек рудовмещающей толщи не показали значимых отличий изотопного состава серы. Среднее значение $\delta^{34}\text{S}$ (в ‰) и содержания общей серы (%) в осадочных породах рудовмещающей толщи, в нижней и верхней пачках карбонатной (флишовой) толщи составляют соответственно: $\delta^{34}\text{S}$ — $+9,0 \pm 4,9$; $11,5 \pm 3,9$; $13,0 \pm 4,2$; S — $0,035 \pm 0,04$; $0,048 \pm 0,04$; $0,039 \pm 0,048$. Как видно из приведенных цифр, отложения, непосредственно вмещающие оруденение, существенно не отличаются от пород других пачек по содержанию серы; в верхних пачках лишь несколько возрастает содержание тяжелого изотопа / 15 /.

Изотопный состав общей серы трех проб оливиновых долеритов оказался близким к метеоритной сере, $\delta^{34}\text{S}$ в этих породах составляют $+1,6$; $2,8$ и $3,8$ ‰.

Анализ изотопного состава углерода и кислорода известняков токминской свиты показывает, что они характеризуются значениями, близкими или незначительно отличающимися от чикагского стандарта. Отдельные определения $\delta^{13}\text{C}$ колеблются от $+1,5$ до $-4,8$ ‰, а $\delta^{18}\text{O}$ — от $+12,9$ до $19,6$ ‰. В известняках, которые непосредственно вмещают рудные тела Горевского месторождения, вариации изотопов составляют еще более узкие пределы, а отдельные значения располагаются в положительной области.

В сидероплезитах рудных тел происходит заметное облегчение изотопного состава углерода и кислорода в среднем соответ-

ственно до $-7,1 \pm 1,4$ и $15,9 \pm 3,1$ ‰. Увеличение изотопа ^{12}C в сидероплезитах по сравнению с вмещающими известняками закономерно для всего объема рудных тел. Распределение $\delta^{18}\text{O}$ варьирует в более широких пределах. Но прослеживается четкая корреляция: более легкому изотопному составу углерода в сидероплезите соответствует наиболее легкий состав кислорода. В анкеритах и доломитах, которые фациально замещают сидероплезиты по периферии рудных залежей, изотопный состав углерода соответствует промежуточным значениям между карбонатами руд и вмещающими известняками. В составе кислорода происходит увеличение доли $\delta^{18}\text{O}$ (от 16,0 до 21,6 ‰). В карбонатах из поздних кварц-карбонат-сульфидных прожилков в рудных телах сохраняется изотопный состав углерода и кислорода сидероплезита соответственно равный: $-5,4$ и $+15,3$ ‰.

Подобное распределение изотопного состава карбонатных минералов сохраняется и за пределами Горевского месторождения. В линзах анкерита и сидероплезита с магнетит-сфалеритовой минерализацией и без таковой происходит облегчение изотопов углерода, а кислород становится несколько тяжелее, чем во вмещающих известняках, подобно анкеритам фланговых частей Горевского месторождения.

В контурах Ангарского района отмечается значительная униформность среднего изотопного состава свинца изученных полиметаллических проявлений / 8,9,10,50 /, несмотря на вариации в их минеральном составе и различную удаленность друг от друга. Значения отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ изменяются от 17,06 до 17,40; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — от 15,31 до 15,59; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — от 37,01 до 37,29. Достоверные различия в содержании ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb в большинстве случаев отсутствуют. Результаты исследований (отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в среднем равно 17,20) указывают лишь на незначительное содержание радиогенных изотопов свинца в этих залежах. Если в качестве некоторого стандарта взять средние значения изотопного состава свинцов Горевского месторождения — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,228$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,52$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37,018$, то по этим параметрам ближе всего к ним стоит изотопный состав свинца Морянихо-Меркурихинского рудного поля, затем Линейного месторождения, участков Крутого, Пихтового и т.д., и несколько особняком — Борового участка. Для свинца га-

ленинтов всех участков района характерно непропорционально низкое содержание в пробах ^{207}Pb относительно современных значений ^{206}Pb и ^{208}Pb . Такое совпадение значений изотопного состава свинцов различных месторождений Ангарского района позволяет предполагать либо их генетическое единство, либо сходство геохимических черт их источников. Во всяком случае они близки свинцам гомогенного ряда, а с учетом отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16$ приближаются к обыкновенным коровым свинцам стратиформных полиметаллических месторождений Северного Прибайкалья, месторождений Пайн-Поинт в Канаде и Сардана в Якутии / 63,69 /. В то же время изотопный состав свинца галенинтов Ангарского района несколько отличается от классических стратиформных месторождений ФРТ (Мөггэн, Купфершифер, Раммельсберг), содержащих обыкновенный свинец, развивающийся в соответствии с моделью одностадийной изотопной эволюции.

Расчеты модельных возрастов рудных свинцов из различных свинцово-цинковых проявлений Ангарского рудного района по двухстадийной модели Стейси и Крамерса / 78 /, согласно которой предполагается, что примерно 3,7 млрд лет назад произошло изменение отношений $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ и $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$, а также по модели Камминга-Ричардса, которая предполагает интегральный вынос урана, тория и свинца из мантии в земную кору, дали сходимые результаты (в млн лет, соответственно): Горевское - 852,834 (ср. 850); Рудаковское - 827,879; Крутое - 752,855; Боровое - 679,884; Морянихинское - 749,849; Меркурихинское - 740,843; Верхнепихтовое - 749,86I; Пихтовое - 792,8II. В пределах ошибки эти даты совпадают, что подтверждает гомогенность "резервуара", из которого извлекался свинец. На коровый ("экзогенный") источник свинца в свинцово-цинковых рудах Ангарского района указывают последние построения Л.И.Шилова (рис. 15) / 77,78 /.

Приведенные выше основные черты свинцово-цинковых рудопроявлений Ангарского района и геологические ситуации их нахождения сведены в таблицу. При этом учитывались как региональные, так и локальные особенности, установленные при изучении вещественного состава руд и вмещающих их пород.

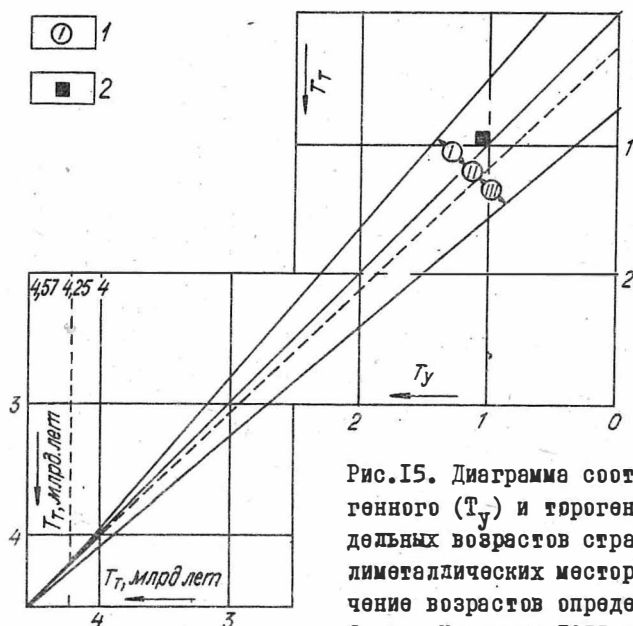


Рис.15. Диаграмма соотношений ураногенного (T_U) и торогенного (T_T) модельных возрастов стратиформных полиметаллических месторождений (значение возрастов определены по модели Стейси-Краммера, 1975 г.) по /77,78/:

I – природа свинца (по секторам): I – экзогенная (свинцово-цинковое оруденение в слоистых осадочных толщах), II – полигенная (колчеданно-полиметаллические месторождения в вулканогенно-осадочных толщах), III – мантийная (колчеданные руды в вулканитах); 2 – значение модельных возрастов рудных свинцов Ангарского района.

Рабочая генетическая схема

Проблема генезиса свинцово-цинкового оруденения Енисейского края остается дискуссионной уже на протяжении многих лет. Исследователи, выдвигающие генетические концепции формирования руд, придерживаются трех основных гипотез: гидротермально-метасоматической (М.Л.Шерман, М.П.Пресняков и Р.Н.Володин, Г.Н.Бровков и др.), диплогенетической (Г.Н.Бровков и др.), осадочной (В.М.Попов), вулканогенно-осадочной (Т.Я.Корнев) и гидротермально-осадочной (В.Г.Пономарев, Э.Г.Дистанов, Ю.А.Забиров, В.В. Кузнецов и др.). Не останавливаясь на критическом разборе этих

84

Главные факторы	Рудное поле		
	Морянихо-Меркурихинское	Рассохинское	Горевское
I	2	3	4
Тектонические	Наиболее прогнутые части областей перикратонных опусканий		
Формационный комплекс	Терригенно-карбонатный		
Конкретные геологические формации (субформации)	Шельфовая (мелководная) вулканогенно-карбонатно-терригенная (биогенная доломитовая)	Вулканогенно-известково-углеродисто-сланцевая (углеродистая карбонатно-глинистая)	Флишoidная глинисто-карбонатная
Стратиграфические	Тунгусикская серия (верхний рифей)		
	Джурская (моранихинская) свита	Шунтарская (рассохинская) свита	Токминская (горевская) свита
Литологические	Органогенные и железистые доломиты, седиментационные карбонатные брекчии	Углеродистые карбонатно-алевритоглинистые сланцы	Глинистые доломитовые известняки и алевритоглинистые сланцы
Фациальные	Мелководные шельфовые фации, рифогенные и биоморфные постройки (непокой-	Замкнутые относительно глубоководные части бассейна с некомпенсированным	Некомпенсированное, "слабокомпенсированное", углеродисто-

I	2	3	4
	ная тектоническая обстановка)	осадконакоплением карбонатно-глинисто-сапропелевого типа	глинисто-карбонатное осадконакопление с элементами карбонатного флишевого
Рудовмещающая палеоструктура	Локальные изолированные участки мелководного шельфа с тиховодными обстановками осадконакопления	Относительно глубоководные палеодепрессии	Локальные впадины флишеидного бассейна
Магматические	Генетическая связь с известными магматическими образованиями проблематична. Постоянно присутствующие в рудных полях дайки основных пород пострудные		
Общие геохимические	Повышенная железистость карбонатов, марганценосность, общая кремнистость, фосфатеносность, выщелочные концентрации и вариабельность свинца, цинка, меди и других элементов на стратиграфических уровнях оруденения во вмещающих породах		
Форма рудных тел	Пластово-линзовидные залежи субсогласные с вмещающими породами		
Количество рудо-контролирующих уровней	Как правило, многоярусное (более двух) расположение рудных уровней		
Минеральный состав руд	<u>Пирит (5-20 %), сфалерит, галенит, кварц, анкерит,</u>	<u>Пирит (50-90 %), галенит, сфалерит, кварц,</u>	<u>Пирротин (40 %), сфалерит, галенит,</u>

I	2	3	4
	<u>железистый доломит</u> . Пирротин, буланжерит, бурнонит, джемсонит, арсенипирит	<u>слюды, углеродистое вещество</u> . Пирротин, бурнонит, джемсонит, арсенипирит, магнетит	<u>кварц, сидероплезит, анкерит</u> . Пирит, магнетит, бурнонит, джемсонит, буланжерит, арсенипирит
Ассоциация природных типов руд	Пирит-сфалерит-галенитовая	Галенит-сфалерит-пиритовая	Сфалерит-пирротин-галенитовая
Зональность рудных тел	Обратная зональность - повышенное содержание свинца со стороны лежащего бока		
Текстуры			
1) первичные	Ритмично-слоистые (ритмиты), подводно-оползневые, размыва, брекчиевые		
2) вторичные	Полосчато-брекчиевые, сланцеватые, кливажирования, прожилковые, складки изгиба и т.д.		
Структуры			
1) первичные	Колломорфные, субколломорфные, глобулярные, фрамбоидальные, кристалло-морфные, биоморфные		
2) вторичные	Кристаллические-зернистые: изометрично-зернистые, удлиненно-зернистые, гипидиоморфно- и адлотриоморфно-зернистые		
Элементы-примеси в главных сульфидах	Пирит - Zn, Pb, Cu, As, Sb, Ti, Mn, Cr, In, Co, Ni, Nd Сфалерит - Fe, Cd, Mn, Ge, In, Cu, Pb, Co, Ag, Hg, Nd Галенит - As, Sb, Ag, Cu, Co, Mn, In, Tl, Nd		

I	2	3	4
Изотопы свинца: 206/204, 207/204, 208/204	I7,33; I5,78; 37,05	I7,33; I5,38; 37,I2	I7,I9; I5,40; 37,20
Модельный возраст (млн лет)	740-849	780-850	834-852
Изотопы серы сульфидов ($\delta^{34}\text{S}$, ‰)	Пирит + I9,7 + +I6,4 Сфалерит +2I,I + +I4,7 Галенит +I7,0 + +I2,4	Пирит +I7,I + -22,2 Сфалерит +I4,0 + -2,3 Галенит +9,I + -I,9	Пирротин +27,6 + +I8,8 Сфалерит +23,8 + +I3,2 Галенит +23,2 + +I0,5
Изотопы углерода ($\delta^{13}\text{C}$, ‰) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) карбонатов руд	C = +0,4 + -5,0 O = +I5,9 + +I9,3	C = -2,I + -7,I O = +I7,7 + +I8,6	C = -I,3 + -I3,5 O = +I2,3 + +2I,4
Химические особен- ности руд	Повышенная желези- стость карбонатов, марганце- носность; пониженное содержание глинозема		
Pb:Zn	0,5-2	0,5	4:I
Геохимические осо- бенности руд	Пониженное содержание Характерные примеси	Cu, Ba, Sr, U, Th, K Ag, Cd, Ge, In	
Рудная фация	Кремнисто-карбонатно- сульфидная	Глинисто-кремнисто- сульфидная	Кремнисто (железисто- карбонатно)-сульфидная (сульфидная железистая)

I	2	3	4
Рудная формация	Стратифицированная свинцово-цинковая в терригенно-карбонатных толщах		
Рабочая генетическая схема	Гидротермально-осадочная: накопление рудного вещества синхронно с осадконакоплением в локальных впадинах с последующим преобразованием в процесс дивергенза и метаморфизма		
Примечание. Подчеркнуты минералы - индикаторы рудных фаций.			

гипотез применительно к рудам Ангарского района, отметим только, что изложенный выше фактический материал заставил нас остановиться на генетической схеме, базирующейся на представлениях о гидротермально-осадочном механизме рудонакопления, синхронного с осадочным литогенезом. Впоследствии, в ходе геологической истории руды испытали деформационно-метаморфические преобразования.

Основанием для суждений о накоплении в водном бассейне руд синхронно с вмещающими породами служат следующие данные:

- руды являются естественными членами морских отложений и участвуют во всех постседиментационных преобразованиях, которым подверглись и вмещающие породы;
- устанавливается четкая приуроченность оруденения к определенным горизонтам и определенным типам осадочных пород;
- для рудоносных уровней характерны зоны рассеяния вышекларковых концентраций сульфидов, занимающих большие площади по сравнению с участками концентрированного оруденения; по мере приближения к рудным залежам увеличивается общая кремнистость, железистость карбонатов и отмечается высокая вариабельность концентраций свинца, цинка и других рудогенных элементов;
- линзопластовидная форма рудных тел, их многоярусное расположение в

разрезах рудоносного горизонта, при отсутствии признаков околорудных изменений и гидротермально-метасоматических колонок;

- наличие реликтовых тонкослоистых текстур руд с коллоидными, глобулярными, фрамбоидальными, кристалломорфными структурами сульфидов, с присущими им типоморфными особенностями;

- изотопно-геохронологическое изучение руд свидетельствует о синхронности накопления рудовмещающих пород и руд и указывает на коровый источник рудообразующих металлов;

- изотопный состав серы сульфидов позволяет предположить сульфатный источник серы в морских условиях в закрытых системах и серу, которая генерировалась сульфат-редуцирующими бактериями, а изотопный состав углерода и кислорода сосуществующих с сульфидами железистых карбонатов свидетельствует об их формировании в морских условиях.

Описанные выше особенности строения и состава руд и вмещающих их пород становятся понятными с позиций, предполагающих сочетание гидротермального источника рудного вещества и накопления его в морском бассейне по законам седиментации. С.Н.Иванов такие месторождения, сформированные из растворов, излившихся на дне водоема, но не имеющих непосредственного отношения к вулканам и вулканическим явлениям, предложил именовать гидротермогенно-осадочными, гидротермальногенно-осадочными или гидротермально-осадочными. Гидротермально-осадочная схема рудоотложения предполагает, что основные рудные залежи накапливались в локальных депрессиях морского дна, контролировавшихся конседиментационными разломами глубокого заложения. По этим разломам дискретно происходил подток рудоносных и серосодержащих растворов. В качестве геохимических барьеров, приводивших к коагуляции коллоидов и осаждению карбонатно-кремнисто-сульфидного геля, выступала морская вода. Соотношение процессов поступления рудных растворов и отлагавшихся из них рудных осадков и интенсивности осадконакопления в дискретных впадинах привело к формированию различных по морфологии, минеральному составу и текстурно-структурным особенностям рудных концентраций. Во впадинах, где господствовала восстановительная обстановка, отлагались богатые органическим веществом карбонатные и глинисто-карбонатные илы. Прорывающиеся мутьевые потоки сносили обло-

мочный материал с образованием турбидитов (флишOIDных горизонтов). На участках выхода гидротерм обычный процесс седиментации нарушался за счет привноса железа, цинка, свинца, ряда рудогенных элементов, а также кремнезема, уголекислоты, сероводорода и др. Кремнезем частично выпадал в виде геля, а частично взаимодействовал с глиноземом, в результате чего формировались глинистые минералы сложного состава типа смектитов. Карбонаты осаждались как хемогенным, так и биогенным путем (кремнисто-карбонатные фации иловых впадин). Во впадинах с сероводородным заражением на удалении от выходов флюидных растворов отлагались глинисто-кремнистые фации с галенит-сфалерит-пиритовыми рудами. Часть сульфидных гелей разносилась, образуя так называемые "ореолы рассеяния" гидротермально-осадочных руд. Таким образом, дискретное поступление рудоносных растворов на фоне постоянного осадконакопления приводило к формированию слоистых и ритмично-слоистых руд.

Представление о том, что руды Ангарского рудного района первоначально представляли собой гели осадочного происхождения, подтверждается широким распространением в них метакolloидных структур. В этом отношении свинцово-цинковые руды Морянихи-Меркурихинского, Рассохинского и Горевского рудных полей не являются исключением. Аналогичные представления об осаждении тяжелых металлов в виде сульфидных гелей развиваются для гидротермально-осадочных руд Атасуйского района (Н.М.Митряева), Северного Кавказа (Н.С.Скрипченко), Мотген, Раммельсберг (Л.Н. Формозова, П.Рамдор) и других регионов.

Обезвоживание и кристаллизация сложных сульфидных гелей приводила к обособлению отдельных минералов. Экспериментальные данные показывают, что при раскристаллизации таких сложных сульфидных гелей в первую очередь образуются фрамбоидальные агрегации пирита, затем сфалерит и галенит. Начавшееся уже на ранних стадиях диагенеза перераспределение рудного вещества приводило к отжиманию поровых растворов и ускорению процессов замещения и десорбции. С чем, видимо, связано некоторое запаздывание выделения галенита в пирит-сфалеритовых рудах и локализация его в поздних диагенетических трещинках в виде прожилочков и гнездовидных выделений. В этом отношении очень интересны наблюдения Г.Ю.Бутузовой по сильно обводненным металло-

носным осадкам Красного моря. В них галенит концентрируется в виде прожилково-гнездовидных скоплений, имея "метасоматический" облик.

В процессе складчатости руды и вмещающие их породы оказались смяты в складки, в них возникли многочисленные послонные срывы, широко проявились будинаж, брекчирование в ядрах складок, дизъюнктивные нарушения. Складчатость сопровождалась повышением давления и температуры и, как следствие, повышением растворяющей способности внутрипоровых вод. Однако во всех наблюдаемых нами случаях перемещение вещества происходило в контурах первичных рудных залежей, не выходя за их пределы. Рудное вещество равномерно перекристаллизовывалось с формированием гранобластовых и ориентированно-зернистых структур, в которых еще сохранены реликтовые коллоидные формы сульфидов. Все эти явления четко фиксируются в текстурах руд и структурах рудных минералов.

В процессе дислокационного метаморфизма происходила дальнейшая перекристаллизация руд и его внутрислойное перераспределение. Формируются плейчатые текстуры, гранобластовые гипидио- и аллотриоморфно-зернистые структуры и комплекс новых минеральных видов: флогопит, биотит, альмандин, амфибол и другие минералы прогрессивного метаморфизма. По различным геотермометрам, данным декрепитации и гомогенизации условия прогрессивного метаморфизма соответствуют температурам около 400 °C, при давлении 5-6 кбар. Контактный метаморфизм в связи с внедрением пострудных даек основного состава не привел к сколько-нибудь заметной перестройке внутриагрегатного состояния основной массы сульфидных руд и выразился лишь в образовании незначительных по мощности зон окисления.

В целом интенсивность преобразования гидротермально-осадочных руд Ангарского района, несмотря на различные процессы регионального, дислокационного и контактового метаморфизма, не влияет на масштаб первичных рудных концентраций и морфологию рудных залежей. В последних и сопряженных с ними блоках вмещающих пород отмечается лишь незначительное по масштабам развитие регенерированной сульфидной минерализации в виде секущих жил, аналогичных по составу стратифицированным рудам.

Таким образом, совокупность приведенных выше геологичес-

ких, минералогических и геохимических данных свидетельствует о длительной и достаточно сложной истории формирования свинцово-цинковых руд Ангарского района. Оно началось в период осадконакопления и закончилось после основных складчатых движений.

В районе выделяется несколько рудных полей с повышенной концентрацией оруденения. Во всех случаях граница между промышленными рудами и вмещающими породами резкая. Последние практически не содержат видимых сульфидов, если не считать всевозможных сульфидов железа, хотя и характеризуются вышекларковыми концентрациями свинца и цинка и высокой их изменчивостью. Свинцово-цинковая минерализация, проявленная на территории района, укладывается по существу в узкий временной интервал тунгусикского времени. Минерализация, как и во многих других рудных районах СССР с подобным типом оруденения, занимает определенное место в стратиграфическом разрезе и приурочена к определенным литологическим горизонтам. Состав растворов, видимо, можно считать относительно простым. Они содержали свинец, цинк, железо, кадмий, серебро, кремний, магний, уголекислоту и т.д.

По результатам изотопного состава свинца можно предположить, что высококонцентрированные рассолы с металлами привнеслись в бассейн седиментации из его глубинных частей. Миграция рассолов, вероятно, связана с активизацией тектонических процессов, в начале тунгусикского времени, в результате чего было нарушено гидростатическое давление. У нас нет достаточных оснований, чтобы говорить о смещении этих рассолов с вулканическими водами, о каких-то особых факторах переноса и отложения сульфидных руд. Вместе с тем, пока нет и полной уверенности, что синхронный вулканизм не принимал никакого участия в составе рудоносных флюидов. Следовательно, говорить о происхождении рудоносных растворов в категорической форме преждевременно. Поэтому установление источника рудоносных растворов, отлагавших руды в Ангарском районе, является одним из наиболее важных моментов в создании генетической модели, поскольку все прочие факторы, будь они самыми благоприятными, не могли сами по себе создать рудное тело.

Глава IV. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРАТИФОРМНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается вариант базы знаний, предназначенной для решения задач прогноза стратиформных свинцово-цинковых месторождений в терригенно-карбонатных толщах докембрия Сибири. В экспертную систему "Генезис" автоматизированный комплекс для прогноза стратиформных свинцово-цинковых месторождений входит как модель "АНГАРА", представление которой на языке знаний приведено на рис. 16. Основу базы знаний составили элементы геологических моделей стратиформного свинцово-цинкового оруденения Ангарского рудного района на Енисейском кряже, изложенные в предыдущей главе и в монографии В.Г. Пономарева и Ю.А. Забирова / 48 /. При этом, конечно, не преследовалась цель дать окончательный вариант прогноза месторождений свинца и цинка рассмотренных типов.

При составлении технологической схемы прогнозного процесса нами соблюдались принципы соответствия и последовательного приближения.

Принцип соответствия предполагает, что, следуя принятой Мингео СССР стадийности геолого-разведочного процесса, каждой стадии прогноза (региональной, крупномасштабной и локальной) должны соответствовать объекты, подлежащие выявлению и эквивалентные им прогнозные ресурсы и запасы различных категорий / 30, 31, 64 /. В связи с этим намечена следующая последовательность металлогенических единиц прогноза: рудный район (стадия I) → рудное поле (стадия II) → месторождение → (стадия III). При прогнозе рудного района (стадия I) использовались геодинамические, палеотектонические, формационные и другие группы характеристик региональных геологических обстановок, поскольку геолого-промышленные типы стратиформных месторождений свинца и цинка являются естественными составляющими строго определенных осадочных геологических формаций либо сочетаний таких формаций, присущих специфической геотектонической обстановке или режиму. Прогноз рудного поля (стадия II) и месторождения (стадия III) требует более детальных разработок уже на уровне пород и породных парагенезисов, минералов и минеральных парагенезисов, стадийности и этапности рудогенеза и метаморфической транс-

сформации в геологической истории. Исходя из этого, применительно к крупномасштабному и локальному прогнозам, обеспечивающим выделение потенциальных рудных полей и перспективных участков, эквивалентных потенциальным месторождениям, выделяются группы фациальных, литологических, структурных, минералогических и других рудоконтролирующих факторов. Собственно рудная часть модели дополняется такими характеристиками, как морфология рудных тел, специфика рудной зональности, вещественный состав руд, текстурно-структурные особенности руд и их геохимические особенности.

Роль каждого из перечисленных факторов и их сочетаний зависит от специфики обстановок рудогенеза. Эти группы признаков и оценочных критериев должны быть непротиворечивыми, доступными для установления на данной стадии прогноза и не переусложненными. Наряду с признаками, вытекающими из генетических предпосылок и из закономерностей размещения месторождений, в модель ЭС включены группы характеристик, определяемые поисковой практикой и отражающие позицию рудных объектов в геофизических и геохимических полях и аномалиях, в шлиховых ореолах, в прямых признаках оруденения и т.д. Необходимо помнить, что решение задач локального прогноза возможно не только путем выделения перспективных, но и отбраковки заведомо бесперспективных участков. Примером соблюдения принципа последовательного приближения могут служить прогнозно-поисковые модели месторождений цветных металлов, представленные в методических разработках сотрудников ЦНИГРИ, выполненных совместно со специалистами стран-членов СЭВ / 64 /.

Принцип последовательного приближения означает, что процесс прогноза представляется как ряд последовательных стадий, которым должны соответствовать определенные категории металлогенических единиц. За счет комплекса разноранговых соподчиненных характеристик, описывающих разномасштабные объекты прогноза, происходит последовательное вычленение из геологического пространства рудных районов, рудных полей и месторождений. Неполнота выявления тех или иных прогнозных признаков вызывает необходимость либо их добора, либо выведения таких площадей в категорию с "неопределенной перспективой". Поэтому одной из первоочередных задач компьютеризации прогнозного процесса яв-

ляется унификация признакового пространства различных металлогенических единиц выделенных геолого-промышленных типов месторождений. Она необходима и в случае решения классификационных задач с целью формализации геологических описательных многофакторных моделей для исключения переосложнения комплекса прогнозных признаков / 28 /. Примером такого подхода к унификации признакового пространства объектов прогноза могут служить классификационно-признаковые модели, разработанные Геологической службой США / 84 /.

Опыт применения ЭС "Генезис" / 7,13 / для решения конкретных задач прогноза позволил выделить ряд важнейших вопросов, которые должны быть решены в первую очередь при построении базы знаний:

1. Определение иерархии металлогенических единиц прогноза (что мы хотим прогнозировать и в каком порядке) и унификация комплекса признаков.

2. Соотнесение металлогенических единиц прогноза со стадийностью геолого-разведочного процесса для того, чтобы перспективность объектов более поздних стадий вытекала из перспективности объектов ранних стадий.

3. Составление минимально-необходимого комплекса признаков объектов каждой стадии и оценка их информативности.

4. Решение классификационных задач для определения степени подобия прогнозируемого объекта с эталонными геологическими объектами.

Механизм логического вывода ЭС построен таким образом, что рассматривает три варианта заключения по экзаменуемому объекту: положительный, отрицательный и неопределенный. Последний вариант является следствием неполноты наших знаний об объекте прогноза.

Ниже приведено описание базы знаний экспертной системы "АНГАРА" в разбивке по стадиям, каждая из которых имеет следующую структуру: объект прогноза, прогнозные признаки, классифицирующие признаки, прогнозные заключения. Подробная схема базы знаний приведена на рис. 16.

Каждый из указанных разделов соответствует определенному блоку компьютерной модели: описание прогнозных признаков - фактам, прогнозных (поисковых) заключений - гипотезам, процедуры

выделения прогнозных объектов — правилам модели, описывающим соответствие между признаками и заключениями.

С Т А Д И Я I

Объект прогноза — Ангарский рудный район

Признаки объекта прогноза

Формационные

1. Выделены ли в исследуемом районе терригенно-карбонатные формации с повышенной фациально-литологической неоднородностью и практически амагматичные?
2. Составляет ли в осадочных формациях количественное соотношение вулканогенных, терригенных и карбонатных пород примерно 0,01:1:1,4?
3. Представляет ли терригенно-карбонатный комплекс парагенезис сульфидоносных углеродистых сланцев и карбонатных пород?
4. Характерна ли преимущественно мелководная (шельфовая) обстановка накопления терригенно-карбонатных отложений в условиях значительной расчлененности рельефа?
5. Можно ли отложения вмещающего комплекса отнести к миогеосинклинальным?
6. Принадлежат ли известные в районе полиметаллические проявления к стратиформной полиметаллической формации?
Укажите возраст исследуемого структурно-вещественного комплекса:
7. — рифейский?
8. — вендский?
9. Характерна ли для формаций углеродистых сланцев значительная дисперсия содержаний пирита?
10. Характерна ли для существенно карбонатных формаций повышенная марганценосность или фосфоритоносность?
11. Отмечаются ли в отложениях терригенно-карбонатного комплекса повышенные содержания Pb, Zn, V, Ti, B и низкие — Sn?
12. Отвечает ли метаморфизм осадочных пород комплекса начальным субфациям зеленосланцевой фации?
13. Известны ли признаки локального динамометаморфизма более высоких субфаций?

Геохимические

- I4. Выявлены ли при литогеохимической съемке первичные и вторичные (открытые и скрытые) литогеохимические ореолы Pb и Zn?
- I5. Выявлены ли геохимические аномалии Pb и Zn в потоках рассеяния?
- I6. Известны ли в исследуемом районе минералого-геохимические аномалии?
- I7. Известны ли в районе гидрохимические аномалии?
- I8. Преобладают ли в рудах известных рудопоявлений Pb и Zn?
- I9. Известны ли в рудах промышленные концентрации Cu?
20. Известны ли в районе валуны, обломки бурых железняков и их коренные выходы с вышекларковыми содержаниями Pb и Zn?

Структурно-палеотектонические

21. Картируются ли в исследуемом районе зоны сопряженных разнонаправленных глубинных разломов?
22. Можно ли рассматривать тектонические структуры вашего района как элемент перикратонных прогибов?

Геофизические

23. Отмечаются ли в исследуемом районе гравитационные максимумы региональной составляющей "дельта G" на фоне нормального магнитного поля?
24. Выявляются ли в районе линейно-вытянутые аномалии ЕП, ВП?
25. Выявлены ли в исследуемом районе зоны контрастных неоднородностей в параметрах электрических полей?

Заключения об объекте прогноза

1. Исследуемый район может быть идентифицирован как рудный район ангарского типа.
2. Исследуемый район не может быть идентифицирован как рудный район ангарского типа.

С Т А Д И Я П

Объект прогноза - рудное поле

Признаки объекта прогноза

Литолого-формационные

26. Имеется ли в структурно-вещественном комплексе вулканогенно-известково-углеродисто-сланцевая формация?
27. Присутствуют ли в районе маломощные дайки диабазов?
28. Представлен ли разрез осадочных пород флишеидной формацией карбонатных пород с подчиненным количеством углеродистых алевритоглинистых сланцев?
29. Присутствует ли формация карбонатных литологически разнородных пород в сочетании с биогермными массивами?
30. Преобладают ли в разрезе сульфидсодержащие углеродистые сланцы с карбонатными породами в основании разреза?
Являются ли преобладающими в наборе вмещающих пород:
31. - алавролиты, мергели, глинистые сланцы, известняки, доломиты, силициты?
32. - строматолитовые доломиты, доломиты, известняки, алавролиты, глинистые сланцы?
33. - углеродистые алевритоглинистые сланцы?
34. Присутствуют ли в разрезе стратифицированные вулканиты?
35. Картируются ли в разрезе линзовидные тела и потоки небольшой мощности туффигов алевритопсаммитовой размерности?
Каково приблизительное количественное соотношение терригенных, карбонатных и вулканогенных пород в намеченных рудоносных формациях:
36. - I:(20-35):0?
37. - I:(5-80):0,I?
38. - I:0,I:0,I?
39. Присутствуют ли в разрезе пачки конгломератовидных известняков, сопряженных с биогермными постройками?
40. Отмечаются ли в разрезе углеродистые хлоритоидные сланцы?
41. Встречаются ли в карбонатных породах рассеянные кремнистые конкреции?

Геохимические

42. Выделяются ли литохимические аномалии Pb, Zn, Cu, Ba?

43. Имеются ли гидрохимические аномалии Pb, Zn, Cu, Hg?
44. Имеется ли на территории исследуемого района прожилковая минерализация Pb, Zn, Cu в осадочных породах?
45. Отмечаются ли горизонты осадочных пород, для которых модуль Страхова равен $(Fe + Mn/Ti > 25)$?
46. Наблюдается ли увеличение силицитовой (нетерригенной) составляющей пород?
47. Известны ли на исследуемой территории обломки, валуны, развалы бурых железняков?
48. Наблюдается ли содержание $C_{орг}$ до 1 % в карбонатных породах?
49. Отмечается ли содержание пирротина до 5 %?
50. Встречаются ли горизонты углеродистых сланцев с высоким содержанием пирита?
51. Отмечаются ли маломощные горизонты марганцевого оруденения в карбонатных породах?

Структурно-палеотектонические

52. Присутствуют ли узлы пересечения разнонаправленных тектонических нарушений?
53. Приурочены ли выявленные геохимические и геофизические аномалии к зонам глубинных разломов и приподнятым блокам фундамента?
54. Характерно ли мелководное карбонатонакопление и строматолитовые банки на склонах палеоподнятий?

Геофизические

55. Существуют ли спокойное гравитационное и магнитное поля с рядом мелких магнитных аномалий порядка от 50-300 до 500 гамм?
56. Существует ли нормальное гравитационное поле (от -20 до -50) и магнитное (от 15 до -60 гамм)?

Заключения об объекте прогноза

1. Исследуемый район может быть в целом идентифицирован как рудное поле.
2. Исследуемый район не может быть идентифицирован как рудное поле.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ РУДНОГО ПОЛЯ

Горевское рудное поле

Признаки 28,31,36,49,53,55.

Заключения об объекте прогноза

1. Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к рудному полю типа Горевского.
2. Для отнесения Вашего объекта к рудному полю типа Горевского недостаточно данных.
3. Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к рудному полю типа Горевского.

Морянихинское рудное поле

Признаки 29,32,35,37,39,40,54,56.

Заключения об объекте прогноза

1. Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к рудному полю типа Морянихинского.
2. Для отнесения Вашего объекта к рудному полю типа Морянихинского недостаточно данных.
3. Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к рудному полю типа Морянихинского.

Линейное рудное поле

Признаки 26,30,33,34,35,38,40,47,50,53.

Заключения об объекте прогноза

1. Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к рудному полю типа Линейного.
2. Для отнесения Вашего объекта к рудному полю типа Линейного недостаточно данных.
3. Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к рудному полю типа Линейного.

С Т А Д И Я Ш

Объект прогноза – потенциальное месторождение

Признаки объекта прогноза

Литолого-фациальные

Представлена ли рудовмещающая толща:

IO3. - известняками, доломитами и алевритоглинистыми сланцами?

IO4. - доломитами, кремнистыми доломитами, рифогенными постройками доломитов, седиментационными карбонатными брекчиями?

IO5. - углеродисто-глинистыми сланцами и углеродистыми карбонатно-алевритоглинистыми сланцами?

Представлена ли подрудная толща:

IO6. - известняками и доломитами с прослоями глинистых сланцев?

IO7. - алевритами и алевритоглинистыми сланцами?

IO8. - пепельно-серыми глинистыми и известково-глинистыми сланцами и углеродистыми известняками?

Представлена ли надрудная толща следующими породами:

IO9. - известняками, глинистыми известняками?

II0. - кварц-слюдистыми параллельно-слоистыми сланцами?

III. - углеродистыми глинистыми сланцами?

Морфология рудных тел

71. Образуют ли рудные тела линзопластообразные залежи, субогласные с вмещающими породами?

72. Можно ли ожидать многоярусные (кулисообразные) залегания рудных тел?

73. Наблюдаются ли в слоистых рудах складки изгиба, кливажирования?

74. Присутствуют ли в рудах подводно-оползневые текстуры?

75. Образуют ли руды массивные, брекчиевидные текстуры?

76. Присутствуют ли в рудах колломорфные глобулярные структуры?

77. Являются ли отдельные линзы, слои микрокварцитов и силицисты составной частью рудных тел?

78. Образуют ли сидериты, кремнистые сидериты отдельные горизонты, линзы, пласты в рудных телах?

79. Известны ли руды "шариковой" текстуры?

80. Выделяются ли в рудных телах горизонты слоистых колчеданных руд?

81. Широко ли развиты в рудных телах прожилково-вкрапленные текстуры?

82. Присутствует ли в рудах фромбоидальный пирит?

Вещественный состав

83. Наблюдается ли увеличение концентраций Pb в лежачем боку рудных тел?

Выделяются ли на месторождении следующие парагенетические ассоциации:

84. - галенит-сфалерит-пирротин-кварц-сидероплезитовая?

85. - алмадин-биотитовая?

86. - пирит-сфалерит-галенит-анкеритовая?

87. - галенит-сфалерит-пирит-слюдисто-кварцевая?

Выделяются ли на месторождении следующие типы руд:

88. - пирротин-сфалерит-галенитовый?

89. - галенит-пирротин-сфалеритовый?

90. - галенитовый?

91. - пирротиновый?

92. - пирит-сфалеритовый?

93. - серно-колчеданный?

94. - сфалерит-пиритовый?

Составляет ли содержание Fe в сфалеритах (мас.%):

95. - от 0 до 6?

96. - от 6 до 9?

Составляет ли отношение Pb/Zn в рудах:

97. - 4?

98. - 1-2?

99. - 0,25?

100. Характерен ли для руд простой (малокомпонентный) минеральный состав: пирит (пирротин), сфалерит, галенит?

101. Известны ли в рудном поле или на месторождении магнетит-полиметаллические руды?

102. Являются ли составной частью рудных тел линзы, пласты железистых доломитов и анкеритов?

Геохимические признаки

63. Является ли Ge характерным элементом-примесью в рудах?

64. Характерно ли присутствие в рудах более 1 % Cu?

Изотопный состав S сульфидов руд составляет (в %):

65. от +16 до +22?

66. от -20 до +20?

67. Обогащены ли карбонаты в рудных телах Fe и Mn?

68. Характерен ли для главных рудных минералов (руд) узкий спектр элементов-примесей?
69. Отношение Ni/Co в пирротинах больше 1?
70. Отношение Ni/Co в пиритах меньше 1?
57. Близки ли значения изотопных отношений свинца галенитов к значениям: $^{206}Pb/^{204}Pb = 17,19$; $^{207}Pb/^{204}Pb = 15,40$; $^{208}Pb/^{204}Pb = 37,20$?
58. Наблюдается ли облегчение изотопного состава C и O железистых карбонатов рудных горизонтов по сравнению с вмещающими породами?
59. Является ли In характерным примесным элементом рудных тел?
60. Наблюдается ли резкое снижение концентраций U, Th, K в рудах по сравнению с вмещающими породами?
61. Присутствуют ли в рудах Sn, Bi, Mo в концентрациях более 5 г/т?
62. Обогащены ли руды Ba и Sr?

Заключения об объекте прогноза

1. Исследуемый объект может быть в целом идентифицирован как потенциальное месторождение.
2. Исследуемый объект не может быть идентифицирован как месторождение.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Горевское месторождение

Признаки 65,67,69,78,79,81,84,85,88,89,90,91,96,97, 99, 101,103,106,109.

Заключения об объекте прогноза

1. Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к месторождениям типа Горевского.
2. Для отнесения Вашего объекта к месторождениям типа Горевского недостаточно данных.
3. Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к месторождениям типа Горевского.

Морянихинское месторождение

Признаки 65,67,81,86,90,92,95,102,104,107,110.

Заключения об объекте прогноза

1. Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к месторождениям типа Морянихинского.
2. Для идентификации Вашего объекта как месторождения Морянихинского типа недостаточно данных.
3. Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к месторождениям типа Морянихинского.

Линейное месторождение

Признаки 66,70,80,82,87,93,94,95,99,105,108,111.

Заключения об объекте прогноза

1. Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к месторождениям типа Линейного.
2. Для идентификации Вашего объекта как месторождения типа Линейного недостаточно данных.
3. Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к месторождениям типа Линейного.

Для иллюстрации общей схемы выделения и оценки объекта прогноза при работе пользователя с экспертной системой были использованы наиболее обоснованные группы факторов известного стратиформного свинцово-цинкового месторождения Сардана в Юго-Восточной Якутии / 69 /. Протокол диалога с ЭС, в ходе которого получены прогнозные и классификационные заключения, приведены в приложении. Как видим, проанализировав введенные данные, ЭС подтвердила, что прогнозируемый объект в целом отвечает потенциальному месторождению (коэффициент уверенности 95 %), а по большинству классификационных признаков ближе всего соответствует геологической модели Морянихинского типа на Енисейском кряже (коэффициент уверенности 87 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной на суд читателя книге авторы преследовали цель разработать некоторые методологические приемы применения экспертных систем для прогноза стратиформного свинцово-цинкового оруденения в слоистых осадочных толщах. Широкое внедрение в практику геологических исследований мощных компьютерных систем, предназначенных для представления и применения знаний экспертов-людей для предсказания месторождений полезных ископаемых на профессиональном уровне, равном или превосходящем возможности индивидуального человека, выводит экспертные системы на рубеж приоритетных направлений прикладных металлогенических исследований.

Анализируя личный опыт и обширный материал, накопленный в этой области в СССР и за рубежом, авторы попытались ответить на ряд вопросов: что такое экспертные системы, что отличает их от статистических методов и программ распознавания образов, пригодны ли методы экспертных систем для решения прогнозных задач, как создать базу знаний и составить функциональную технологическую цепочку прогноза в автоматическом режиме. В процессе решения перечисленных задач мы пришли к выводу (и хотим подвести читателя к мысли), что создание экспертной системы для серьезной практической области, какой является прогноз, дело чрезвычайно трудное. Для этого требуются не только детальные знания конкретных рудных объектов на конкретной территории, но и создание в первую очередь полноценных баз данных и баз знаний по большому числу эталонных объектов в других регионах. Другими словами, чтобы прогнозная экспертная система была действенной, ее нужно снабдить полноценными высококачественными знаниями и не жалеть на это ни сил, ни времени.

Согласно высказанным аргументам, экспертную систему "Генезис" в настоящем виде следует рассматривать как первый опыт внедрения интеллектуальных систем в методику и приемы прогноза стратиформного свинцово-цинкового оруденения. Создавая вариант модели "АНГАРА" мы хотели: 1) показать, что технология ЭС может быть эффективно использована для рассматриваемых задач, и 2) проверить концепции относительно определения задачи, ее постановки и представления знаний в данной области. ЭС, получив данные о геологии интересующего нас района, действует как кон-

сультант, помогающий оценить вероятность обнаружения в нем месторождения определенного класса. Поэтому как и эксперт, экспертная система "Генезис" может ошибаться, но в отличие от человека, она обладает способностью безболезненно признавать и исправлять свои ошибки.

Таким образом, подытоживая вышесказанное, можно резюмировать, что основа успеха функционирования прогностической экспертной системы базируется на следующем: 1) привлечение высококвалифицированных экспертов; 2) наличие обширного фактического материала по различным регионам для создания моделей прогноза; 3) умение экспертами четко формулировать и объяснять методы, которые они используют в своей предметной области; 4) создание простых экспертных систем, доступных широкому кругу пользователей; 5) развитие экспертной системы путем перехода от простых задач к сложным посредством постепенного наращивания знаний и организации приемов рациональной обработки базы данных.

Дальнейшее развитие возможностей ЭС "Генезис" связывается с созданием баз данных и баз знаний по следующим главным направлениям.

1. В первую очередь это классификационные аспекты на генетической основе. Здесь роль ЭС в решении не поддающихся математической формализации и сложных для логического анализа задач особенно велика, например, в случае разработки геоситуационного направления или при постановке и решении задач по уточнению модельных представлений ретроспективного плана.

2. Во-вторых, это возможность проведения сравнительного анализа большого числа эталонных стратиформных свинцово-цинковых месторождений в слоистых осадочных толщах докембрия различного возраста и сформированных в различных геодинамических обстановках, что позволит выявить "новые" и уточнить "старые" поисковые признаки и оценочные критерии и выйти на их количественные характеристики.

Естественно, что внедрение в практику прогнозирования экспертных систем значительно повышает эффективность использования ЭВМ, значительно упрощает передачу знаний от "учителя к ученику", улучшает сохранность накопленных знаний и возможность их дальнейшего пополнения и совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асаналиев У.А., Попов В.В., Турдукеев И.Д. Месторождения цветных и редких металлов в карбонатных формациях. - М.: Недра, 1988. - 215 с.
2. Бранднер Н.Х., Забиров Ю.А., Пономарев В.Г., Хохлов А.П. Стратиформное свинцово-цинковое оруденение в карбонатных породах Енисейского края (на примере Морянихинского рудопоявления) // Геология и геофизика. - 1985. - № 2. - С. 58-63.
3. Бровков Г.Н., Мирошников А.Е., Охупкин Н.А., Прохоров В.Г. Стратиформное колчеданно-полиметаллическое оруденение в черносланцевых толщах докембрия Енисейского края. - Красноярск: 1983. - 275 с. - Деп. в ВИНТИ, № 389-83.
4. Бровков Г.Н., Ли Л.В., Пономарев В.Г. и др. Металлогения Енисейского края // Закономерности размещения полезных ископаемых. Т.ХУ. - М., 1988. - С. 140-148.
5. Бугаец А.И., Дуденко Л.Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. - Л.: Недра, 1976. - 270 с.
6. Бугаец А.Н., Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Применение экспертных систем в геологическом прогнозировании // Математические методы и автоматизированные системы в геологии. - М.: ВИЭМС, 1986. - 59 с. - (Обзор ВНИИ экон. минер. сырья и геологоразвед. работ).
7. Бугаец А.И., Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Геологическое прогнозирование и методология искусственного интеллекта // История геологии. Геологическое образование. Математическая геология. - М., 1989. - С. 124-131.
8. Волобуев М.И., Зыков С.И. Возраст и геохимические особенности свинцово-цинковых проявлений Енисейского края // Геология и геофизика. - 1963. - № 12. - С. 22-34.
9. Волобуев М.И., Зыков С.И., Ступникова Н.И. и др. Материалы по абсолютному возрасту магматических комплексов и полиметаллических рудопоявлений Саяно-Алтайской складчатой области и Енисейского края // Абсолютное датирование тектономагматических циклов и этапов оруденения по данным 1964 г. - М.: Наука, 1966. - С. 296-311.
10. Волобуев М.И., Зыков С.И., Ступникова Н.М. К вопросу

об использовании изотопов свинца для металлогенического анализа источников рудообразующих веществ // Геохимия. - 1970. - № 1. - С. 22-35.

11. Воронин Ю.А. Исследование операций при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых. - Новосибирск: Наука, 1983. - 288 с.

12. Вострокнутов Е.П. Организация экспертной прогнозирующей системы ГЕНЕЗИС // Математические методы решения задач геологического прогнозирования. - Алма-Ата: КазИМС, 1988. - С. 52-59.

13. Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Методические рекомендации по проектированию баз знаний для автоматизированных прогнозно-поисковых комплексов на основе экспертной системы ГЕНЕЗИС. - Алма-Ата: КазИМС, 1989. - 50 с.

14. Гриненко Л.Н., Пономарев В.Г. О природе сульфидной минерализации Рассохинского рудного поля (Енисейский край) // Геология руд, месторождений. - 1976. - № 4. - С. 83-88.

15. Гриненко Л.Н., Артеменко В.М., Пономарев В.Г. Изотопный состав серы пород и руд Горевского свинцово-цинкового месторождения // Геохимия. - 1984. - № 5. - С. 653-667.

16. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. - М.: Недра, 1987. - 261 с.

17. Дашкевич Н.Н., Мусатов Д.И., Яскевич В.И. Глубинное строение западной части Сибирской платформы и некоторые аспекты ее исторического развития // Тектоника Сибири. Т. 3. - М., 1970. - С. 180-188.

18. Дейт К. Введение в системы баз данных. - М.: Наука, 1980. - 464 с.

19. Дистанов Э.Г., Пономарев В.Г. О геолого-генетических особенностях Горевского свинцово-цинкового месторождения // Геология и геофизика. - 1980. - № 12. - С. 27-31.

20. Добрынин В.Н., Черемисина Б.Н. Математические методы и средства вычислительной техники в геолого-прогнозных исследованиях. - М.: Недра, 1988. - III с.

21. Докембрийская тектоника Сибири/ Ю.А.Косыгин, А.К. Башарин, Н.А.Берзин и др. - Новосибирск: РИО СО АН СССР, 1964. - 126 с.

22. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к

представлению знаний в информатике. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.

23. Забиров Ю.А., Акимцев В.А., Бранднер Н.Х. и др. Структурно-вещественное направление в развитии формационного анализа при крупномасштабных геолого-съемочных работах (западная структурно-формационная подзона Енисейского кряжа) // Литологические методы при детальном расчленении и корреляции осадочных толщ. - Новосибирск, 1990. - С. 90-97.

24. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 165 с.

25. Искусственный интеллект: Справочник в 3-х кн. - М.: Радио и связь, 1990. - Кн. 1 - 464 с.; Кн. 2 - 304 с.; Кн. 3 - 368 с.

26. Клоксин У., Меллиш К. Программирование на языке Пролог. - М.: Мир, 1987. - 336 с.

27. Компьютерный прогноз месторождений полезных ископаемых/ В.В.Марченко, Н.В.Межеловский, Э.А.Немировский и др. -М.: Недра, 1990. - 285 с.

28. Конкин В.Д., Ручкин Г.В., Володин Р.Н., Донец А.И. Типовые геологические модели стратиформных месторождений цветных металлов в докембрийских комплексах. - М.: ВИЭМС, 1987. - 73 с. - (Геол. методы поисков и разведки м-ний металлич. полезн. ископ. Обзор/ВНИИ экон. минер. сырья и геолого-развед. работ).

29. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Гостеолтехиздат, 1961. - 446 с.

30. Кривцов А.И. Прикладная металлогения. - М.: Недра, 1989. - 288 с.

31. Кривцов А.И., Нарсеев В.А. Геологоразведочный процесс и прогнозно-поисковые комплексы // Сов. геология. - 1987. - № 1. - С. 17-27.

32. Крылов С.В., Крылов А.Л., Мишенькин Б.П. Глубинные статистические исследования в области сочленения Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы // Геология и геофизика. - 1967. - № 2. - С. 2-16.

33. Кузнецов В.В., Пономарев В.Г., Акимцев В.А. и др. Горевское цинково-свинцовое месторождение // Геология руд. месторождений. - 1990. - № 5. - С. 3-18.

об использовании изотопов свинца для металлогенического анализа источников рудообразующих веществ // Геохимия. - 1970.-№ I. - С. 22-35.

11. Воронин Ю.А. Исследование операций при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых.- Новосибирск: Наука, 1983. - 288 с.

12. Вострокнутов Е.П. Организация экспертной прогнозирующей системы ГЕНЕЗИС // Математические методы решения задач геологического прогнозирования. - Алма-Ата: КазИМС, 1988. - С. 52-59.

13. Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Методические рекомендации по проектированию баз знаний для автоматизированных прогнозно-поисковых комплексов на основе экспертной системы ГЕНЕЗИС. - Алма-Ата: КазИМС, 1989. - 50 с.

14. Гриненко Л.Н., Пономарев В.Г. О природе сульфидной минерализации Рассохинского рудного поля (Енисейский край) // Геология руд, месторождений. - 1976. - № 4. - С. 83-88.

15. Гриненко Л.Н., Артеменко В.М., Пономарев В.Г. Изотопный состав серы пород и руд Горевского свинцово-цинкового месторождения // Геохимия. - 1984. - № 5. - С. 653-667.

16. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. - М.: Недра, 1987. - 261 с.

17. Дашкевич Н.Н., Мусатов Д.И., Яскевич В.И. Глубинное строение западной части Сибирской платформы и некоторые аспекты ее исторического развития // Тектоника Сибири. Т. 3. - М., 1970. - С. 180-188.

18. Дейт К. Введение в системы баз данных. - М.: Наука, 1980. - 464 с.

19. Дистанов Э.Г., Пономарев В.Г. О геолого-генетических особенностях Горевского свинцово-цинкового месторождения//Геология и геофизика. - 1980. - № 12. - С. 27-31.

20. Добрынин В.Н., Черемисина Б.Н. Математические методы и средства вычислительной техники в геолого-прогнозных исследованиях. - М.: Недра, 1988. - III с.

21. Докембрийская тектоника Сибири/ Ю.А.Косыгин, А.К. Башарин, Н.А.Берзин и др. - Новосибирск: РИО СО АН СССР, 1964. - 126 с.

22. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к

представлению знаний в информатике. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.

23. Забиров Ю.А., Акимцев В.А., Бранднер Н.Х. и др. Структурно-вещественное направление в развитии формационного анализа при крупномасштабных геолого-съемочных работах (западная структурно-формационная подзона Енисейского кряжа) // Литологические методы при детальном расчленении и корреляции осадочных толщ. - Новосибирск, 1990. - С. 90-97.

24. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 165 с.

25. Искусственный интеллект: Справочник в 3-х кн. - М.: Радио и связь, 1990. - Кн. I - 464 с.; Кн. 2 - 304 с.; Кн. 3 - 368 с.

26. Клоксин У., Меллиш К. Программирование на языке Пролог. - М.: Мир, 1987. - 336 с.

27. Компьютерный прогноз месторождений полезных ископаемых / В.В.Марченко, Н.В.Межеловский, Э.А.Немировский и др. - М.: Недра, 1990. - 285 с.

28. Конкин В.Д., Ручкин Г.В., Володин Р.Н., Донец А.И. Типовые геологические модели стратиформных месторождений цветных металлов в докембрийских комплексах. - М.: ВИЭМС, 1987. - 73 с. - (Геол. методы поисков и разведки м-ний металлич. полезн. ископ. Обзор/ВНИИ экон. минер. сырья и геолого-развед. работ).

29. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. - М.: Госгеолтехиздат, 1961. - 446 с.

30. Кривцов А.И. Прикладная металлогения. - М.: Недра, 1989. - 288 с.

31. Кривцов А.И., Нарсеев В.А. Геологоразведочный процесс и прогнозно-поисковые комплексы // Сов. геология. - 1987. - № I. - С. 17-27.

32. Крылов С.В., Крылов А.Л., Мишенькин Б.П. Глубинные статистические исследования в области сочленения Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы // Геология и геофизика. - 1967. - № 2. - С. 2-16.

33. Кузнецов В.В., Пономарев В.Г., Акимцев В.А. и др. Горевское цинково-свинцовое месторождение // Геология руд. месторождений. - 1990. - № 5. - С. 3-18.

34. Левин Р., Дранг Д., Эдельсон Б. Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем с иллюстрациями на Бейсике. - М.: Финансы и статистика, 1990. - 239 с.

35. Минский М. Фреймы для представления знаний. - М.: Энергия, 1979. - 152 с.

36. Миронов А.Г., Ножкин А.Д. Золото и радиоактивные элементы в рифейских вулканогенных породах. - Новосибирск: Наука, 1978. - 254 с.

37. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под ред. Д.А.Поспелова. - М.: Наука, 1986. - 312 с.

38. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения/ Под ред. Р.Р.Ягера. - М.: Радио и связь, 1986. - 408 с.

39. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. - М.: Радио и связь, 1985. - 376 с.

40. Ножкин А.Д., Болдырев М.В. Рифейский вулканизм, тектоническая зональность и металлогения Енисейского края //Геология и геофизика. - 1979. - № 10. - С. 47-60.

41. Ножкин А.Д. Рифейский вулканизм юго-западной части Сибирской платформы // Тектоника байкальского (рифейского) мегакомплекса Сибири. - Новосибирск, 1981. - С. 28-40.

42. Ножкин А.Д. Металлогения главных этапов эволюции коры юго-западной части Сибирской платформы // Металлогения Сибири. Т. П. -Новосибирск, 1987. - С. 175-178.

43. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н.Борисов, А.В.Алексеев, Г.В.Маркурьев и др. - М.: Радио и связь, 1989. - 304 с.

44. Пилипенко В.Н., Каюкин Ю.А. Структурно-текстурные и минералогические особенности стратиформных колчеданных руд северо-западной части Енисейского края // Минералы и парагенезис минералов горных пород и руд Красноярского края. - Новосибирск, 1982. - С. 150-151.

45. Полиметаллическое оруденение Енисейского края/ Отв. ред. Г.Н.Бровков, Н.А.Охалкин. - Красноярск: Краснояр.кн. изд-во, 1976. - 120 с.

46. Пономарев В.Г. Стратиформные сингенетические колчедан-

но-полиметаллические месторождения в протерозойских отложениях Енисейского края // Геология и геофизика. - 1974. - № II. - С. 59-66.

47. Пономарев В.Г. Главные признаки синхронности отложения колчеданно-полиметаллических руд с рифейскими толщами Рас-сохинского рудного поля (Енисейский край) // Вопросы генезиса стратиформных свинцово-цинковых месторождений Сибири. - Новосибирск, 1977. - С. 43-80.

48. Пономарев В.Г., Забиров Ю.А. Поисковые признаки и оценочные критерии свинцово-цинкового оруденения Енисейского края. - Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1988. - 141 с.

49. Пономарев В.Г., Асаналиев У.А., Дистанов Э.Г. и др. Рудные формации стратиформных месторождений цветных металлов Сибири и их металлогеническое значение // Закономерности размещения полезных ископаемых. Т. XV. - М., 1988. - С. 221-226.

50. Пономарев В.Г., Акимцев В.А., Сараев С.В., Доильницын Е.Ф. Изотопно-геохимические индикаторы стратиформного свинцово-цинкового оруденения Ангарского рудного района на Енисейском крае // Изотопные исследования процессов рудообразования. - Новосибирск, 1991. - С. 56-83.

51. Попов В.В. Геологические условия экзогенно-гидротермального рудообразования. - М.: Недра, 1980. - 248 с.

52. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформальных задач в диалоге с ЭВМ. - М.: Наука, 1987. - 288 с.

53. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. - М.: Наука, 1986. - 288 с.

54. Построение экспертных систем/ Под ред. Ф.Хейеса-Рота, Д.Уотермана, Д.Лената. - М.: Мир, 1987. - 441 с.

55. Представление и использование знаний / Под ред. Х.Уэно. - М.: Мир, 1989. - 220 с.

56. Прибайкальский полиметаллический рудный пояс / А.А.Тычинский, Е.П.Акульшина, М.В.Баулина и др. - Новосибирск: Наука, 1984. - 134 с.

57. Принципы прогноза и оценки месторождений полезных ископаемых/ Под ред. В.Т.Покалова. - М.: Недра, 1984. - 437 с.

58. Принципы прогнозирования свинцово-цинковых месторождений и методика составления прогнозных карт/ Под ред. П.Ф.Иванкина и Н.Н.Биндемана. - М.: Недра, 1978. - 192 с.

59. Приобретение знаний / Под ред. С.Осуги, Ю.Саэки. - М.: Мир, 1990. - 304 с.

60. Просняков Н.Н., Володин Р.Н. Некоторые особенности геологического строения Горевского свинцово-цинкового место рождения // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 43. - М., 1962. - С. 141-170.

61. Распознавание образов в задачах качественного прогноза рудных месторождений / Г.С.Федосеев, В.В.Бабич, В.В.Зайков и др. - Новосибирск: Наука, 1980. - 208 с.

62. Распознавание образов: состояние и перспективы/ К.Верхаген, Р.Дейн, Ф.Гун и др. - М.: Радио и связь, 1985. - 104с.

63. Рехарский В.И., Коваленко В.И., Петровская Н.В. Источники и условия мобилизации рудного вещества // Металлогения и рудные месторождения (Секция С.12. Доклады.Т.12. 27-й Междунар. геол. конгресс). - М., 1984. - С. 20-27.

64. Руководство по рациональной методике поисков месторождений медных и полиметаллических руд в вулканогенно-интрузивных поясах/ Под ред. А.Кривцова, Д.Мокану, Е.Филатова, Ц. Петровой. - М.: Секретариат СЭВ, 1984. - 167 с.

65. Ручкин Г.В. Стратиформные полиметаллические месторождения докембрия. - М.: Недра, 1984. - 238 с.

66. Скрипченко Н.С. Прогнозирование месторождений цветных металлов в осадочных породах. - М.: Недра, 1989. - 207 с.

67. Сойер Б., Фостер Д.А. Программирование экспертных систем на Паскале. - М.: Финансы и статистика, 1990. - 191 с.

68. Справочник по прикладной статистике/ Под ред.Э.Ллойда, У.Ледермана, Ю.Н.Тюрина. Т.1-П. - М.: Финансы и статистика, 1989. - Т.1. - 510 с.; Т.П. - 526 с.

69. Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в отложениях венда Юго-Восточной Якутии/ Под ред. В.А. Кузнецова, А.Л.Яншина. - Новосибирск: Наука, 1979. - 232 с.

70. Структурные методы обработки эмпирических данных/Под ред. Э.М.Бравермана, И.Б.Мучника. - М.: Наука, 1983. - 464 с.

71. Уинстон П. Искусственный интеллект. - М.: Мир, 1980. - 520 с.

72. Уотерман Д. Руководство по экспертным системам. -М.: Мир, 1989. - 388 с.

73. Хей Дж. Введение в методы байесовского статистического вывода. - М.: Финансы и статистика, 1987. - 335 с.

74. Хоггер К. Введение в логическое программирование. - М.: Мир, 1988. - 348 с.

75. Хренов П.М., Абрамович Г.Я., Лобанов М.П., Попов Ю.П. Металлогения краевых структур Сибирской платформы // Закономерности размещения полезных ископаемых. Т.ХУ. - М., 1988. - С. 100-113.

76. Чень Ч., Ли Р. Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. - М.: Наука, 1983. - 360 с.

77. Шилов Л.И., Рахманов В.П. Эволюция стратиформного полиметаллического рудообразования в истории Земли (по свинцово-изотопным данным) // Экзогенное породо- и рудообразование в докембрии. - М., 1986. - С. 150-162.

78. Шилов Л.И. Об источнике свинца в стратиформном рудообразовании (по изотопным данным) // Стратиформные рудные месторождения. - М., 1987. - С. 90-105.

79. ЭВМ пятого поколения: концепции, проблемы, перспективы. - М.: Финансы и статистика, 1984. - 110 с.

80. Экспертные системы. Принципы работы и примеры/ Под ред. Р.Форсайта. - М.: Радио и связь, 1987. - 224 с.

81. Экспертные системы: состояние и перспективы/ Под ред. Д.А.Поспелова. - М.: Наука, 1989. - 152 с.

82. Элти Дж., Кумбс М. Экспертные системы: концепции и примеры. - М.: Финансы и статистика, 1987. - 191 с.

83. Bugaev A.N., Vostroknutov E.P., Vostroknutova A.I. et al. Ekspertni sistem prognoziranja i prospekciije lezista "Genesis" // Tehnika (SPRJ). - 1988. - Vol.43, N 2. - P.167-176

84. Mineral deposita models / Eds. Cox D.P., Singer D.A. - // US. Geol. Surv. Bull., 1693. United States Government Printing office. - Washington, 1986. - 379 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Протокол диалога пользователя с экспертной системой

В ходе диалога пользователем было охарактеризовано стратиформное свинцово-цинковое месторождение Сардана (Юго-Восточная Якутия) и получены прогнозные и классификационные заключения.

Модель: Прогнозирование стратиформных свинцово-цинковых месторождений (модель АНГАРА).

Целевая гипотеза: 55; объект: I3; Сардана.

Факт II2: Проводить стадию I? -100

Факт II3: Проводить стадию II? -100

Факт II4: Проводить стадию III? 100

Факт IO3: Представлена ли рудовмещающая толща:

- известняками, доломитами и алевритоглинистыми сланцами? 40

Факт IO4: - доломитами, кремнистыми доломитами, рифогенными постройками доломитов, седиментационными карбонатными брекчиями? 100

Факт IO5: - углеродисто-глинистыми сланцами и углеродистыми карбонатно-алевритоглинистыми сланцами? -100

Факт IO6: Представлена ли подрудная толща:

- известняками и доломитами с прослоями глинистых сланцев? 40

Факт IO7: - алевритами и алевритоглинистыми сланцами? -100

Факт IO8: - пепельно-серыми глинистыми и известково-глинистыми сланцами и углеродистыми известняками? -100

Факт IO9: Представлена ли надрудная толща следующими породами: - известняками, глинистыми известняками? 20

Факт IIO: - кварц-слюдистыми параллельно-слоистыми сланцами? - 100

Факт 7I: Образуют ли рудные тела линзо-, пластообразные залежи, субсогласные с вмещающими породами? 100

Факт 72: Можно ли ожидать многоярусные (кулисообразные) залежания рудных тел? 60

Факт 73: Наблюдаются ли в слоистых рудах складки изгиба, кливажирования? 80

Факт 74: Присутствуют ли в рудах подводно-оползневые тексты - ры? 80

- Факт 75: Образуют ли руды массивные, брекчиевидные текстуры?
80
- Факт 76: Присутствуют ли в рудах колломорфные глобулярные структуры? 40
- Факт 77: Являются ли отдельные линзы, слои микрокварцитов и силицитов составной частью рудных тел? 20
- Факт 78: Образуют ли сидериты, кремнистые сидериты отдельные горизонты, линзы, пласты в рудных телах? -40
- Факт 79: Известны ли руды "шариковой" текстуры? -100
- Факт 80: Выделяются ли в рудных телах горизонты слоистых колчеданных руд? -100
- Факт 81: Широко ли развиты в рудных телах прожилково-вкрапленные текстуры? 20
- Факт 82: Присутствует ли в рудах фромбоидальный пирит? -100
- Факт 83: Наблюдается ли увеличение концентраций Рb в лежащем боку рудных тел? 0
- Факт 84: Выделяются ли на месторождении следующие парегенетические ассоциации: - галенит-сфалерит-пирротин-кварц-сидероплезитовая? -100
- Факт 85: - алмадин-биотитовая? -100
- Факт 86: - пирит-сфалерит-галенит-анкеритовая? 100
- Факт 87: - галенит-сфалерит-пирит-слюдисто-кварцевая? -100
- Факт 88: Выделяются ли на месторождении следующие типы руд:
- пирротин-сфалерит-галенитовый? -80
- Факт 89: - галенит-пирротин-сфалеритовый? -80
- Факт 90: - галенитовый? -80
- Факт 91: - пирротиновый? -80
- Факт 92: - пирит-сфалеритовый? 100
- Факт 93: - серно-колчеданный? -100
- Факт 94: -сфалерит-пиритовый? -60
- Факт 95: Составляет ли содержание Fe в сфалеритах (мас. %):
от 0 до 6? 100
- Факт 96: от 6 до 9? -100
- Факт 97: Составляет ли отношение Pb/Zn в рудах:
-4? -100
- Факт 98: I-2? 60
- Факт 99: 0,25? 20
- Факт 100: Характерен ли для руд простой (малокомпонентный) ми-

неральный состав: пирит (пирротин), сфалерит, галенит? 100

Факт 101: Известны ли в рудном поле или на месторождении магнетит-полиметаллические руды? -100

Факт 102: Являются ли составной частью рудных тел линзы, пласты железистых доломитов и анкеритов? 100

Факт 63: Является ли Ge характерным элементом-примесью в рудах? 100

Факт 64: Характерно ли присутствие в рудах более 1 % Cu? -100

Факт 65: Известный состав S сульфидов руд составляет (в %):
от +16 до +22? 100

Факт 66: от -20 до +20? -100

Факт 67: Наблюдается ли обогащение карбонатов рудных тел Fe и Mn? 60

Факт 68: Характерен ли для главных рудных минералов (руд) узкий спектр элементов-примесей? 100

Факт 69: Отношение Ni/Co в пирротинах больше 1? 0

Факт 70: Отношение Ni/Co в пиритах меньше 1? -100

Факт 57: Близки ли значения отношений изотопов свинца в галенитах: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,19$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,40$;
 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37,20$? 0

Факт 58: Наблюдается ли облегчение изотопного состава C и O карбонатов рудных горизонтов по сравнению с вмещающими породами? 80

Факт 59: Является ли In характерным примесным элементом рудных тел? 80

Факт 60: Наблюдается ли резкое снижение концентраций U, Th, K в рудах по сравнению с вмещающими породами? 100

Факт 61: Присутствуют ли в рудах Sn, Bi, Mo в концентрациях более 5 г/т? -100

Факт 62: Обогащены ли руды Ba и Sr? -100

Гип. 31: Исследуемый район может быть в целом идентифицирован как потенциальное месторождение (95).

Гип. 43: Оценка соответствия исследуемого объекта месторождениям Горевского типа:

- геохимия соответствует (75)

- Гип. 44: - морфология рудных тел не соответствует (-50)
- Гип. 45: - вещественный состав не соответствует (-90)
- Гип. 46: - для оценки литолого-фациальных признаков недостаточно данных (48)
- Гип. 40: Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к месторождениям типа Горевского (-58)
- Гип. 47: Оценка соответствия исследуемого объекта месторождениям Морянихинского типа:
- геохимия соответствует (90)
- Гип. 48: - для оценки морфологии рудных тел недостаточно данных (20)
- Гип. 49: - вещественный состав соответствует (100)
- Гип. 50: - для оценки литолого-фациальных признаков недостаточно данных (0)
- Гип. 41: Ваш объект по большинству признаков может быть отнесен к месторождениям типа Морянихинского (87)
- Гип. 51: Оценка соответствия исследуемого объекта месторождениям Линейного типа:
- геохимия не соответствует (-100)
- Гип. 52: - морфология рудных тел не соответствует (-100)
- Гип. 53: - вещественный состав не соответствует (-100)
- Гип. 54: - литолого-фациальные признаки не соответствуют (-100)
- Гип. 42: Ваш объект по большинству признаков не может быть отнесен к месторождениям типа Линейного (-100)
- Гип. 30: Стадия III проведена с положительным прогнозным заключением. Рекомендуется более детальное изучение потенциального месторождения (95)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава I. ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ	8
Типы прогнозных моделей	10
Компьютерный геопрогноз	13
Возможности экспертных систем для представления знаний	14
Базовые структуры ЭС	16
Модели представления и использования знаний	20
Обработка нечеткой информации	24
ПРОСПЕКТОР - пример экспертной прогнозирующей системы	28
Глава II. ЭКСПЕРТНАЯ ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ СИСТЕМА "ГЕНЕЗИС".	33
Язык описания знаний	34
Основы разработки баз знаний	45
Основные этапы разработки базы знаний	47
Глава III. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА СТРАТИФОРМНОГО ПО- ЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА ЕНИСЕЙСКОМ КРЯЖЕ.	53
Общие сведения	53
Положение Ангарского рудного района в структурах Енисейского кряжа	58
Типовые многофакторные модели обстановок нахожде- ния стратиформного свинцово-цинкового орудене- ния в Ангарском рудном районе	63
Рабочая генетическая схема	83
Глава IV. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРАТИФОРМНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКО- ГО ОРУДЕНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ	115

Темат. план вып. самост. изд. СО АН СССР на 1991
(монографии), № 27

Научное издание

Виталий Георгиевич Пономарев
Евгений Павлович Вострокнутов
Владимир Андреевич Акимцев

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА — ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СТРАТИФОРМНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Утверждено к печати
Институтом геологии СО АН СССР

Редактор Р.Н.Ильина

Технический редактор О.М.Вараксина

Подписано к печати 27.08.91.
Бумага 60x84/16. Печ.л. 7,50+1 вкл. Уч.-изд.л. 7,35
Тираж 350. Заказ 231. Цена 1р. 50к.

Объединенный институт геологии, геофизики
и минералогии СО АН СССР
Новосибирск, 90, Ротапринт.

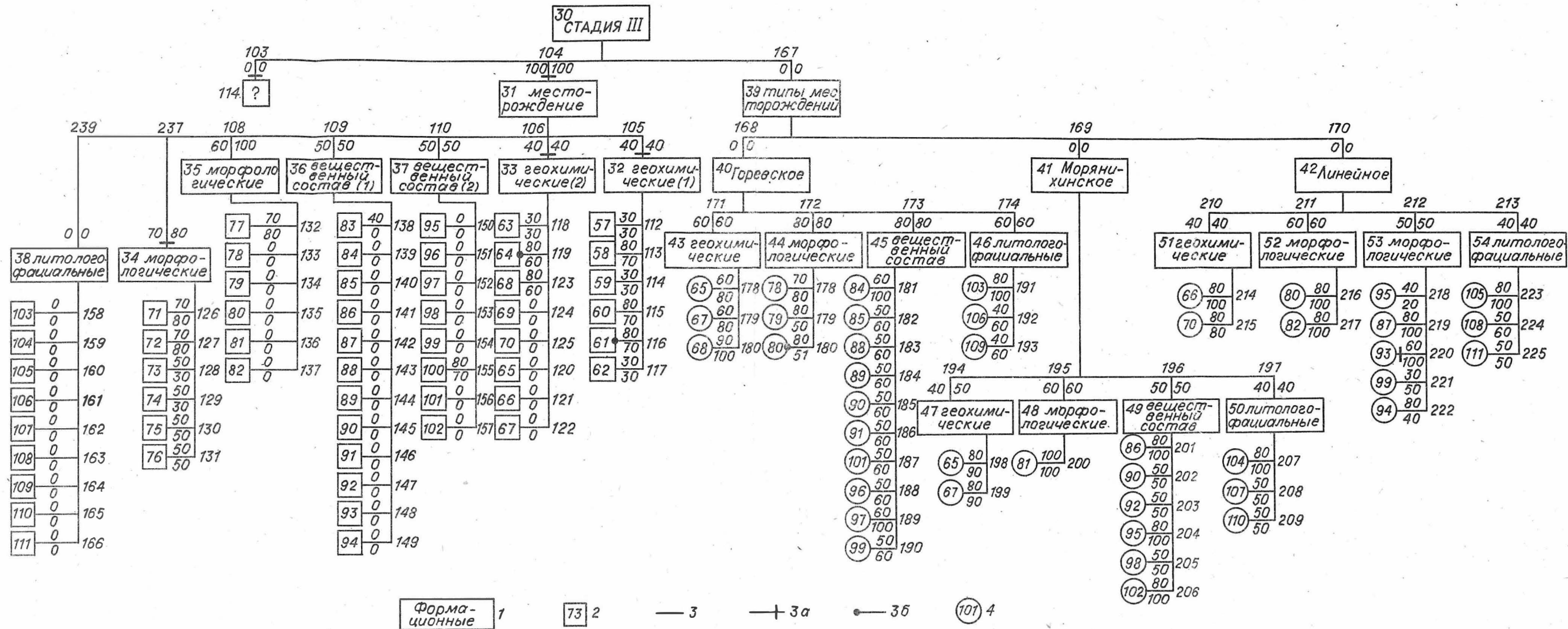


Рис. 16. Схема базы знаний ЭС "АНГАРА" для прогноза стратиформного полиметаллического оруденения в слоистых терригенно-карбонатных толщах (слева сверху общая схема ЭС "АНГАРА")
 а - стадия I, б - стадия II, в - стадия III. I - гипотеза (заклучение); 2 - факт (признак); 3 - правило (закономерность); 3a - сильное правило; 3б - правило с признаком отрицания; 4 - ссылка на факт (повторное использование для решения классификационных задач)

