

Ш. В. Гумиров

**О С Н О В Ы
ТЕОРИИ АДАПТАЦИИ
НЕЖИВЫХ ОБЪЕКТОВ
И АДАПТИВНЫЙ
АНАЛИЗ В ГЕОЛОГИИ**

Ш.В.Гумиров

**Основы теории адаптации
неживых объектов и
адаптивный анализ в
геологии**

Новокузнецк "Интеллект" 1993

УДК 553.3/.9.001.18+[536.75+536.42]+539.219.3

Гумиров Ш.В. Основы теории адаптации неживых объектов и адаптивный анализ в геологии. Новокузнецк, СМИ, Интеллект, 1993, 405 с.

Изложены новая теория адаптации и методика адаптивного анализа. Показана их применимость для анализа и прогнозирования природных, промышленных, социальных и экологических объектов. В результате адаптивного анализа геологических объектов выявлены новые закономерности углеобразования, рудогенеза, миграции элементов в земной коре. Установлена значительная роль твёрдофазной диффузии в дифференциации вещества Земли. Найдены новые закономерности твёрдофазной диффузии в металлах, действующие и в геологических процессах.

Разработаны способы прогнозирования морфологии, мощности и качества угольного пласта по составу боковых пород с помощью фазовых диаграмм адаптации; а также прогнозирования запасов руды по ее химическому составу и породам фундамента.

Для научных работников, занимающихся вопросами принятия решений; для геологов.

Табл. 24, ил. 112, список лит.- 244 назв.

Р е ц е н з е н т ы - доктор геол.-минер. наук Н.В.Иванов,
канд.геол.- минер.наук В.М.Богомазов
(ВСЕГЕИ)

Издание подготовлено Южно-Кузбасским Центром Интеллект при Сибирском металлургическом институте, г.Новокузнецк.

©Гумиров Ш.В.1993

Гумиров Шамил Валетдинович
Основы теории адаптации неживых объектов и
адаптивный анализ в геологии

ВВЕДЕНИЕ

О структуре работы и благодарности

Повышение достоверности прогнозирования состояний объектов способно снизить общественные затраты на их освоение. Прогноз выполняется на основе известных закономерностей, которые выявляют, используя фундаментальные теории. Последние позволяют сформировать необходимый блок данных для анализа, а затем интерпретировать выявленные взаимосвязи. Поэтому актуальна проблема дополнения существующих теорий о развитии объекта новыми положениями.

Объект взаимодействует с внешней средой и разрушается, если воздействие превышает критическую величину. Следовательно, он почти адаптирован к внешним условиям. Однако общие закономерности возникновения и адаптивного развития неживых объектов до сих пор не исследовались. Поэтому существует необходимость в разработке теории адаптации неживых объектов, применение которой позволит по новому взглянуть на взаимосвязь среды и исследуемого объекта.

Целью проделанной работы явилась разработка основных положений теории адаптации неживых объектов и создание на их основе методики адаптивного анализа, направленной на повышение достоверности прогнозирования.

Для достижения поставленной цели потребовалось:

- 1) изучить состояние проблем самоорганизации неравновесных систем; системного анализа; адаптации объектов живой и неживой природы;
- 2) разработать основные положения теории адаптации

неживых объектов;

3) создать новые способы анализа динамических систем в фазовых пространствах;

4) разработать методику адаптивного анализа неживых объектов;

5) проверить основные положения теории и методики в ходе адаптивного анализа:

а) угольных бассейнов и месторождений;

б) железорудных, золото-серебряных и других рудных месторождений;

6) исследовать закономерности твёрдофазной диффузии в одноэлементных кристаллах;

7) изучить адаптацию минералов в литосфере в связи с дифференциацией вещества, с рудогенезом и с твёрдофазной диффузией элементов.

Впервые сформулированы основные закономерности возникновения неживых объектов и их адаптации к воздействию среды. Главные из них – это взаимосвязь размеров объекта с его элементной плотностью; случайное псевдоцелое развитие неживого объекта; протекание адаптации в несколько этапов по мере нарастания воздействия среды; сопутствующее адаптации снижение энтропии объекта.

Следствия из теории проверены на обширном материале угольной и рудной геологии. Это позволило дополнить новыми знаниями общепринятые представления об осадконакоплении и углеобразовании; о рудогенезе и миграции элементов в литосфере; о твёрдофазной диффузии; об адаптации минералов и рудных тел к воздействию среды.

Наиболее продуктивными из них являются следующие выводы:

-угольное и рудное месторождения, и угольный бассейн представляют собой объекты, субадаптированные к условиям среды. Поэтому к ним применимы закономерности возникновения и адаптивного развития неживых объектов, изложенные в теории адаптации;

-в ходе адаптации объект целостно деформируется в многомерном пространстве своих и внешних параметров. Это является основой для прогнозирования неизвестных параметров объекта по известным, а также по энергетическим параметрам среды;

-параметры угольного пласта взаимосвязаны с палеогидроэнергетическими параметрами углевмещающей толщи. Поэтому можно прогнозировать мощность, качество и морфологию угольного пласта по данным о боковых породах;

-рудное месторождение в первую очередь адаптируется к тепловому воздействию недр и магматических тел, а характер адаптации зависит от атомных параметров рудогенных элементов;

-твёрдофазная диффузия атома является кусочной функцией от его массы, радиуса и числа электронов до конфигурации инертного газа. Это знание служит фундаментом для выявления закономерностей рудогенеза и миграции элементов в земной коре;

-интенсивность миграции элементов в литосфере в первую очередь определяется скоростью их твёрдофазной диффузии, а последняя зависит от адаптации атома по его массе,

радиусу и электроотрицательности к условиям среды. На этой основе восстанавливаются векторы миграции и рудогенеза;

–рудогенез является результатом адаптации рудогенных элементов и их минералов к температуре, к давлению, к электрохимическим условиям в литосфере; *и каждому управляющему параметру среды соответствует атомный параметр элемента*. Это позволяет реконструировать по составу минералов динамику среды, сформировавшей породные массивы, месторождения и рудные тела.

По результатам этих работ создана методика адаптивного анализа неживых объектов. Общая часть методики применима к анализу любого неживого объекта для последующего прогнозирования его состояния во времени и в пространстве.

Кроме того, даны методические рекомендации по адаптивному анализу рудных и угольных месторождений; по прогнозу запасов полезного ископаемого, по созданию моделей рудогенеза.

Реализация результатов работы осуществлялась в статьях, прогнозных геологических картах, выполненных в период с 1974 по 1992 год; в геологических отчётах; в отчете по научно-исследовательской работе; в курсе лекций по адаптации неживых объектов для студентов дневного обучения; в компьютерной программе GeoMaster, служащей для прогноза геологических нарушений на угольных пластах и переданной шахтам Кузбасса и Донбасса.

Монография разделена на 4 части и состоит из 16 глав. В первой части даются основные положения теории адаптации неживых объектов и методические основы их адаптивного

анализа.

Во второй части излагается адаптивный анализ угольных месторождений. В третьей части описывается адаптивный анализ рудных месторождений. В последней, четвертой части рассматривается влияние твёрдофазной диффузии элементов на их адаптацию в земной коре и в месторождении.

Исходным материалом для монографии послужили результаты исследований автора в области теории самоорганизации угольных и рудных месторождений с 1972 года. Толчком для разработки теории адаптации явилась монография Г. Хакена "Синергетика".

Автор выражает признательность геологам ВСЕГЕИ, в первую очередь доктору геолого-минералогических наук Н.В.Иванову, заведующему отделом угля В.М.Богомазову, за оказанную поддержку и обсуждение работы. Большая помощь была оказана доктором геолого-минералогических наук, профессором В.Н.Волковым при исследовании самоорганизации углеобразования и возникновении сингенетических нарушений угольного пласта, выполненной в период с 1974 по 1981 год.

Автор благодарен работникам Тематической экспедиции Западно-Сибирского геологического управления и сотрудникам кафедры геологии Сибирского металлургического института за критический разбор работы.

Компьютерная программа GeoMaster была написана под руководством и в основном В.Ш.Гумириным, за что автор приносит ему свою признательность.

Значительная помощь в завершающей стадии была оказана экономическим советником Инженерной Академии России

И.А.Гладуном. Автор приносит ему искреннюю благодарность за обсуждение прикладных аспектов работы.

В своей работе автор придерживался высказывания своего ныне покойного учителя, профессора И.И.Шарудо о том, что исследование прежде всего ценно своей практической применимостью в различных регионах страны и отраслях промышленности.

Автор надеется, что сумел донести до читателя продуктивность адаптивной идеологии. Она позволяет выйти на новые направления исследований благодаря анализу неживого объекта в многомерном фазовом пространстве параметров самого объекта и вещественно-энергетических факторов внешней среды.

Вступительный краткий обзор

Многие естественные и искусственные объекты представляют собой неравновесные системы. Они приспосабливаются к изменениям внешней среды. То есть, в каждый момент времени их форма, внутренняя структура и функциональные параметры субадаптированы к интенсивности внешнего воздействия. Адаптация объектов сопровождается их самоорганизацией в пространстве и во времени.

Объекты, представляющие собой закрытые системы, развиваются по своим внутренним законам. Зная закономерности развития объекта и его состояние в какой-то момент времени, можно с достаточной достоверностью прогнозировать его будущее состояние. Для предсказания состояния неравновесных систем недостаточно знать законы

внутреннего развития, поскольку они адаптированы к внешнему воздействию. Необходима оценка воздействия среды. Будущее состояние открытых систем зависит как от прошлого их состояния, так и от интенсивности внешнего воздействия. Следовательно, при прогнозировании неизвестных параметров объекта, их необходимо рассматривать в координатной системе *внешние воздействия - известные параметры объекта*.

Выявление основных особенностей приспособления систем позволит с упреждением управлять этим процессом в искусственных объектах, а также прогнозировать неизвестные параметры естественных объектов.

Проблемой приспособления природных объектов к изменениям внешней среды ранее занимались преимущественно биологи, медики и философы. Объектом их исследований является живой организм, в том числе человек. Адаптация живого ими рассматривается как результат опережающего отражения действительности (П.К.Анохин, 1962). То есть, опыт организмов является основой их приспособления к изменениям окружающей среды. Необходимым элементом опережающего отражения служит адекватность отражения.

По мнению некоторых исследователей, адаптиациогенез присущ лишь управляемым системам (живым и кибернетическим), поскольку он связан с перебором информации [218]. При этом объект накапливает полезную, нейтральную или минимально вредную информацию и отбрасывает "оптимально вредную информацию" [218, с.7]. Считается, что случайная адаптация организмов приводит к их эволюции.

Однако приспособление неживых объектов к воздействию внешней среды известно так же широко, как и живых. В геологии - это примеры прогрессивного и регрессивного метаморфизма, когда образуются те минералы и горные породы, которые более устойчивы в возникшем состоянии среды. Более того, отдельные исследователи излагают механизм процесса приспособления неживых объектов. В частности, Дж. Ферхуген [217] следующим образом описывает изменение внутренней структуры неравномерно напряжённой горной породы.

Те участки минеральных зерен, которые сильно напряжены, растворяются. Вещество переносится в ненапряженные участки зерна, где происходит его нарастание. Тем самым снимается внутреннее напряжение в горной породе. То есть, она приспособляется к изменившимся внешним условиям, перестраивая свою внутреннюю структуру. Либо происходит рост новых фаз, стабильных при данных метаморфических условиях.

Общеизвестным является принцип Кюри, отмечающий сохранение тех собственных элементов симметрии объекта, которые совпадают с соответствующими элементами симметрии среды. Следовательно, адекватное среде свойство элемента закрепляется во всех природных объектах - как живых, так и неживых. Согласно И.И.Шафрановскому, симметрия объектов на Земле подчиняется ее гравитационному полю [233].

Приведённое в достаточной мере свидетельствует об адаптации некоторых неживых природных объектов к воздей-

ствию внешней среды.

И, наконец, в физике твёрдого тела появилась монография В.Е.Канарчука, даже в названии которой присутствует термин адаптация ("Адаптация материалов к динамическим воздействиям" - Киев, Наук. думка, 1986, - 264 с.).

В результате выполненных им исследований автор выяснил, "...что адаптация металлов к внешним факторам динамически изменяется пропорционально изменению условий эксплуатации деталей, и каждый раз наступает начальная стадия, когда металл как бы "готовит" себя к предстоящим нагрузкам с тем, чтобы опять адаптироваться к ним и при этом минимизировать процесс разрушения" [95, с.4]. То есть, адаптированы те неживые объекты, которые сумели под воздействием среды измениться таким образом, что это воздействие не может разрушить объект, или же разрушения минимальные.

Поскольку разрушение объекта означает затраты энергии внешней среды на увеличение внутренней энергии объекта, то, в более общем случае, адаптация направлена на перенос энергии с минимальными потерями сквозь объект. Если при данном градиенте внешнего поля существует стационарный поток энергии, то объект адаптирован. Рост градиента внешнего поля может вызвать частичное разрушение объекта, благодаря чему скорость переноса внешней энергии возрастает и система перейдёт в новое стационарное состояние. Именно это явление происходит при возникновении конвективного переноса тепла. Автор перевода монографии Дж. Карери [98], Кербиков Б.О.,

в примечании отмечает, что "возникающее упорядоченное конвективное движение увеличивает пропускную способность", то есть тепловой поток. Следовательно, адаптация объекта повышает его упорядоченность. При этом скорость увеличения энтропии внешней среды повышается, являясь функцией градиента внешнего поля и прочностных свойств объекта - проводника.

Можно ли утверждать, что при адаптации неживых объектов в общем случае накапливается полезная или минимально вредная информация, как и при адаптации живых организмов? Видимо, можно. Когда в процессе адаптации возникает новая структура объекта, более приспособленная к новой внешней нагрузке, то старая структура полностью не отмирает. И если внешняя нагрузка примет прежнее значение, то объект для адаптации случайно может использовать фрагменты старой структуры. Тем самым новая адаптация произойдёт достаточно быстро.

Из сказанного ясно, что изучение адаптации неживых объектов - это взгляд с несколько иных позиций на самоорганизацию неравновесных систем (объектов), то есть на синергетику. Последней проблеме посвящены работы Г. Хакена, И. Пригожина, Ю.Климонтовича, И.В.Волькенштейна и других исследователей [170, 102, 103, 183, 94, 47, 48, 6]. В результате самоорганизации происходит появление кооперативных свойств у элементов объекта. По определению исследователей, самоорганизация - это "установление в диссипативной неравновесной среде пространственных структур (вообще говоря, эволюционирующих во

времени), параметры которых определяются свойствами самой среды и слабо зависят от пространственной структуры источника неравновесности (энергии, массы и т.д.), начального состояния среды, а зачастую и граничных условий" [34, с.253].

Дж. Карери считает, что степень самоорганизованности определяется коррелированностью параметров объекта: "...чем сильнее корреляция между событиями, составляющими некоторый процесс, тем выше степень порядка в материальной системе" [98, с.141. Он же отмечает, что упорядоченность живого организма служит сохранению его цельности: "Эволюция ведёт также к возрастанию упорядоченности вследствие необходимости сохранять внутреннее единство биологического организма с все более высоким уровнем сложности" [96, с.220].

Однако изучением связного множества элементов, которые между собой коррелированы, занимается системный анализ [9, 21, 35, 42, 43, 122, 151, 152, 154, 175, 214, 231, 235 и др.]. И основным объектом исследования является совокупность "...взаимосвязанных, взаимодействующих объектов, определённого рода системные, целостные образования" [104.с.62]. У целостных систем и другие признаки совпадают со свойствами самоорганизующихся систем. Это, прежде всего, развитие под воздействием среды: "Система действует, развивается во внешней по отношению к ней среде, связана с ней множеством коммуникаций", "...существует ...детерминация целого условиями внешней среды и обратно воздействие целого на внешние условия"

(В.Г.Афанасьев, 1980).

Из приведённого становится ясно, что, при решении проблем адаптации живых организмов, самоорганизации неживых и живых объектов, а также системных образований исследователи изучают одни и те же свойства сходных объектов. Сходство заключается в их целостности, взаимодействии с внешней средой и в адаптации к воздействию среды.

Различие углов зрения обусловлено разными целями исследователей. Но нашему мнению, проблема сохранения цельности объекта более приоритетна, поскольку распад объекта означает прекращение его взаимодействия с внешней средой и прерывание его адаптации.

Именно поэтому перед нами встаёт проблема развития природного объекта с сохранением его цельности. Изучаемая проблема разбивается на ряд задач:

1. Какие свойства элементарных объектов позволяют им образовывать цельный объект более высокого уровня?

2. Каков всеобщий механизм адаптации цельного объекта?

3. В каком направлении меняется энтропия, организованность объекта при его адаптации?

4. Как при решении производственных задач использовать закономерности развития субадаптированных цельных объектов?

Наиболее распространённым в настоящее время термином, обозначающим совокупность взаимодействующих элементов, является понятие системы. Однако значение данного термина (система) в геологии размыто. То есть,

термин не имеет единственного материального или абстрагированного соответствия. Поэтому, для обозначения цельного объекта, или же более цельной части объекта, нами используется термин комплекс. Данный термин, в общем, идентичен понятию система, но у него есть единственное достоинство: меньшая размытость благодаря относительно редкому употреблению.

В качестве цельного природного объекта нами исследуется угольное и рудное месторождение. В ходе исследования проверяются те теоретические выводы, которые получены для абстрагированного цельного объекта.

Нами сделана попытка рассмотреть месторождение как комплекс с момента его возникновения, абстрагируясь, насколько это возможно, от конкретной обстановки. Для этого проанализированы необходимые данные по 889 рудным и 154 угольным месторождениям.

Наиболее существенной чертой такого подхода является, в первую очередь, оценка энергии воздействия внешней среды. Затем – рассмотрение этапов адаптации месторождения и выяснение тех внутренних факторов, которые оказали наиболее значительное влияние на его адаптацию.

Оказался плодотворным и сам подход, когда месторождения одного генетического типа рассматривались как однотипные комплексы разной стадии развития. Хотя данный подход и не нов: он постоянно применяется при исследовании звезд астрофизиками [234].

Проблеме концентрации рудного вещества в земной

коре посвящено много исследований как на уровне рудных формаций, так и отдельных месторождений, рудных столбов, "кустов", гнёзд. Считается, что основным условием локализации рудогенных элементов являются:

1) наличие их источника, содержащего рудное вещество в относительно рассеянной форме [237, 239, 65, 8, 50, 92, 197, 17 и др.];

2) перенос рудогенных элементов либо с их концентрированием в ходе транспортировки, либо в концентрированных флюидах или расплавах [17, 81, 148, 162, 168, 205, 232];

3) локализация транспортируемого рудного вещества в различных ловушках [2, 100, 136, 150, 225, 244], или на термо-, баро-, геохимических барьерах [64, 106, 169, 185, 190, 196, 204, 237, 239 и др.].

Для выполнения этих основных условий необходимы дополнительные условия:

1) энергия для мобилизации рассеянного рудного вещества и для его транспортировки;

2) зоны, проницаемые для флюидов или расплавов, транспортирующих рудное вещество;

3) относительно пористые зоны - ловушки в земной коре, способные вместить приносимые рудогенные элементы;

4) малопроницаемые для флюидов, точнее, для рудогенных элементов "стенки" пористых ловушек. "Покрышка" у ловушки может отсутствовать.

В качестве энергии, обеспечивающей мобилизацию и транспортировку рудного вещества, обычно рассматривается

мантийное тепло [193], поступающее по глубинным разломам; тепло, выделяемое остывающими интрузивами и эффузивами [196], а в некоторых случаях энергия тектонических движений. Последняя реализуется путём создания вакуума при взаимном перемещении стенок криволинейных трещин. Такой "вакуумный насос" всасывает в трещину поровый флюид, содержащий рудогенные элементы [8]. Но и в этом случае эффективность работы "вакуумного насоса" будет определяться тепловым потоком, усиливающим скорость химических реакций. Следовательно, влияющим на концентрацию рудогенных элементов во флюиде. Поэтому несомненно, что величину теплового потока необходимо оценивать и на пострудном этапе развития месторождения. Однако способы расчёта его величины не разработаны.

Общеизвестно, что, при поступлении по рудоподводящим каналам флюидов, во вмещающих породах возникает волна кислотного опережения. Именно она обуславливает пневмогидротермальную переработку породной толщи вблизи флюидоподводящих каналов [29]. При этом здесь обычно возрастает эффективная пористость горных пород [68, 78, 97, 146, 173, 176, 177]. Создаётся ёмкость, способная вмещать минеральные новообразования. Позже в возникшем объёме из флюидов откладываются те или иные рудогенные элементы, обычно в рассеянной форме [13, 65].

На следующем этапе, под действием теплового потока или "вакуумного насоса", происходит мобилизация рудного вещества и локализация его в рудных телах [50, 80, 82, 123, 149, 162, 182, 187, 197, 213, 222, 237, 239]. Нам

представляется, что все три перечисленных этапа являются последовательным развитием единого процесса, который доходит до конца при соблюдении определённых условий.

Существует определённая стадийность в отложении различных рудогенных элементов [75, 85, 123, 128, 166, 171, 174, 204, 230]. Нами она рассмотрена в зависимости от атомных параметров этих элементов. Оказалось, что сначала отлагаются элементы с малым атомным радиусом, затем - с большим. Если данное явление в какой-то мере отражает очерёдность в поступлении основной массы того или иного химического элемента, то здесь, несомненно, влияние фильтруемости их растворов.

Выполненные В.А.Жариковым, Ю.В.Алехиным, В.Т.Рысиковой исследования фильтрации растворов сквозь горные породы дают ряд фильтруемости разных катионов [73]. Авторами данного исследования приводятся достаточно полные объяснения изучаемого явления. В качестве одной из причин указывается и ситовой эффект. По результатам этих исследований нами построена диаграмма *фильтруемость - атомный радиус* рудогенного элемента. При этом фильтруемость аниона хлора взята за единицу. Кривые на диаграмме чётко указывают на обратную взаимосвязь между фильтруемостью и атомным объёмом. То есть весьма вероятно причинная связь: ситовой эффект → фильтруемость → стадийность рудоотложения.

Поэтому существует необходимость в рассмотрении влияния атомного объёма рудогенного элемента на пострудное развитие месторождения.

Мы рассматривали роль и других атомных параметров рудогенных элементов в рудогенезе.

Некоторые термины и сокращения

ε - элемент, элементарный объект исследования, состоит из праэлементов, выделение которых либо невозможно по техническим условиям эксперимента, либо нецелесообразно. Элемент рассматривается как комплекс низшего уровня.

Γ - группа. Совокупность неустойчиво взаимодействующих элементов, не имеющая определённой структуры. Обратная связь между элементами кратковременна и неустойчива.

О - объект. Объединение физических тел по признакам.

К - комплекс. Часть объекта, целостно реагирующая на внешнее воздействие. Состоит из устойчиво взаимодействующих элементов с обратной связью между ними. Обладает чёткой структурой. Изменение i -го элемента вызывает изменение других элементов.

C - система. Абстрагированное динамичное функциональное отображение объекта или его части. Соответствует одной или нескольким функциям объекта или его части.

M - модель. Управляемое отображение функции объекта.

IK - иерархия комплекса. Многоуровневое строение комплекса i -го уровня, когда образующие его элементы являются комплексами $(i-1)$ -го уровня, последние сложены из комплекса $(i-2)$ -го уровня и т.д.

PVU - пространственно - векторные условия. Случайно возникающие объективные условия, которые обеспечивают

образование комплекса i -го уровня из комплексов уровней $j < i$. Включают пространственное совпадение слагающих комплексов, их энергетическое состояние, концентрацию, направление перемещения и т.д.

I - среда. Совокупность разнотипных праэлементов. Содержит элемент и активную среду элемента.

Ia - активная среда комплекса (элемента). Совокупность праэлементов среды, способных взаимодействовать с комплексами данного типа. Часть активной среды, находящаяся внутри элемента - это его внутренняя среда, а за пределами элемента - внешняя среда.

a - адаптация комплекса. Это происходящее под энергетическим воздействием активной среды вынужденное изменение состояния комплекса, обеспечивающее минимизацию воздействия среды при условии сохранения основной функции комплекса.

св - связь. Физический канал, по которому обеспечивается обмен веществом, энергией и информацией [115, с.9].

II - поле комплекса. Часть активной среды комплекса, параметры которой существенно изменены под воздействием комплекса.

Часть I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДАПТИВНОГО АНАЛИЗА

Глава I. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

1.1. Фазовое пространство системы

Под фазовым пространством понимают совокупность всевозможных мгновенных состояний физической системы. Фазовое пространство - структурированное множество элементов - фазовых точек, каждая из которых условно изображает состояние системы. В математике часто не делают различия между состояниями системы и изображающими их фазовыми точками. Таким образом, понятия состояние системы и фазовое пространство жёстко связаны.

В фазовом пространстве показываются как эволюция во времени динамической системы, так и статистическое состояние неподвижной системы. Траектория динамической системы в фазовом пространстве может быть либо детерминированной, либо вероятностной. Статистические состояния неподвижной системы описываются на фазовом пространстве вероятностным распределением.

Траекторию динамической системы получают, соединив в фазовом пространстве последовательные во времени фазовые точки. Для анализа многомерного фазового пространства обычно последовательно рассматривают фазовые плоскости, образованные двумя параметрами системы, характеризующими ее состояние. Это так называемые фазовые портреты динамической системы.

Фазовый портрет неподвижной системы в фазовом пространстве показывает вероятностное распределение ее

состояний. При анализе реальной неподвижной системы, поле ее состояний обычно состоит из кластеров, качественно различных. Поэтому фазовый портрет неподвижной системы можно назвать фазовой диаграммой. То есть, при переходе из одного кластера в другой, состояние системы меняется скачкообразно существенным образом.

Нами разработаны способы анализа системы с помощью фазового портрета адаптации объекта и фазового портрета развития объекта.

1.2. Фазовый портрет адаптации объекта

В числе других факторов, на мгновенное состояние комплекса влияет энергетический поток из среды, проходящий через комплекс или используемый им. Мгновенное состояние комплекса, в свою очередь, в последующее мгновение определяет характер энергетического потока из среды. Это связано с тем, что энергетический поток времени t_1 меняет свойства комплекса времени t_2 , в том числе те свойства, которые воздействуют на энергетический поток времени t_3 (ч.2).

То есть рассматриваются три последовательных мгновения t_1 , t_2 , t_3 . Мгновения t_1 и t_3 характеризуются двумя последовательными во времени значениями энергетического потока из среды через комплекс. Мгновение t_2 характеризуется состоянием комплекса. Данный способ анализа можно использовать при исследовании инерциальных систем, когда объект реагирует на внешнее воздействие с запаздыванием во времени. На фазовой плоскости, образованной энергетическими потоками $\mathfrak{E}_1, \mathfrak{E}_3$ времени t_1 и t_3

наносится фазовая точка, характеризующая изменение потока. Если $\Theta_1 = \Theta_3$, то поток постоянный. При $\Theta_1 > \Theta_3$ поток ослабевает, а при $\Theta_1 < \Theta_3$ поток усиливается.

Фазовая точка характеризуется одним из изучаемых параметров комплекса. По значениям этого параметра на фазовой плоскости проводятся изолинии анализируемого параметра комплекса. *Тем самым связываются энергетическое воздействие среды и состояние комплекса.*

Положительным качеством данного способа анализа является то, что он позволяет выявить области существенного изменения состояния комплекса. То есть определить, при каких условиях происходит адаптация комплекса с изменением его структуры. И какие изменения параметров объекта происходят на участках адаптации. Другими словами, сначала найти участки адаптации по энергетическим показателям. А затем целенаправленно выяснять изменения элементов и структуры комплекса на этих участках.

Фазовый портрет адаптации объекта может либо дать мгновенный срез всего объекта, либо может указать вероятностную схему его развития с адаптацией.

В первом случае информация в моменты t_1 , t_2 , t_3 снимается с многих, равномерно расположенных точек объекта. Во втором случае информация поступает с одной или нескольких точек в течение длительного срока.

На фазовом портрете адаптации обычно выделяются

кластеры, характеризующиеся различными состояниями объекта. То есть внутри кластера параметры объекта меняются постепенно. А при переходе из одного кластера в другой кластер состояние объекта меняется скачком. Поэтому в ходе анализа фазового портрета объекта необходимо объяснить граничные линии кластеров и граничные линии поля существования фазовых точек.

1.3. Фазовый портрет развития объекта

Фазовый портрет развития объекта строится по одному параметру. При этом процесс развития объекта рассматривается в качестве системы. Элементами системы являются последовательные во времени состояния объекта.

Фазовая плоскость образована двумя, последовательно расположенными во времени состояниями объекта. Фазовая точка на фазовой плоскости соответствует одному состоянию системы.

Предположим, что временному ряду $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$, соответствуют состояния объекта $O_1, O_2, O_3 \dots O_n$. Последовательно, с шагом равным единице, выбираются пары состояний объекта: $O_1-O_2, O_2-O_3, O_{n-1}-O_n$. Значение первого элемента каждой пары откладывается по горизонтальной оси фазовой плоскости, значение второго элемента по вертикальной оси. Эти значения являются координатами фазовой точки, характеризующей состояние системы S . То есть, состояние S_1 системы имеет координаты (O_1, O_2) ; состояние S_2 - координаты (O_2, O_3) ; состояние S_3 - координаты (O_3, O_4) и т.д.

Последовательно соединяя фазовые точки S_1 , S_2 , S_3 и последующие, получим траекторию развития объекта.

В реальных системах фазовые точки часто образуют кластеры. То есть объект переходит из одного дискретного состояния в другое. В таких случаях необходимо строить матрицу переходов из одного кластера в другой.

Фазовый портрет объекта представляет собой свёрнутое графическое изображение матрицы переходов.

1.4. Основные выводы по главе "Анализ объекта..."

Существуют следующие общепринятые представления и методы по анализу состояния объекта в фазовом пространстве:

а) фазовое пространство – это совокупность всевозможных мгновенных состояний физической системы. Каждому состоянию соответствует фазовая точка в фазовом пространстве;

б) динамическая система изображается как временная последовательность фазовых точек на фазовых портретах;

в) неподвижная система изображается вероятностным распределением фазовых точек внутри кластеров.

Использование и дальнейшее развитие этих методов и представлений нам позволило предложить новые понятия и способы анализа в фазовом пространстве:

1. Реальный объект инерционален и субадаптирован к воздействию среды. Поэтому его состояние в данный момент – это функция потоков из среды, проникавших в объект в прошедший момент времени. В свою очередь потоки из среды

будущего момента зависят от состояния объекта в данный момент времени.

2. Фазовый портрет адаптации объекта - это совокупность фазовых точек в фазовом пространстве потоков прошлого и будущего моментов времени. Одновременно фазовой точке присваиваются анализируемые параметры объекта. Таким образом фазовый портрет адаптации позволяет изучать взаимодействие среды и объекта.

3. Фазовый портрет развития объекта - это временная последовательность фазовых точек в фазовом пространстве двух состояний, смежных во времени. Фазовые точки характеризуют момент перехода из позапрошлого состояния в прошлое, из прошлого состояния в настоящее и из настоящего в будущее и т.д. во временной цепи. Фазовый портрет позволяет изобразить на диаграмме вероятностную матрицу переходов из одного момента перехода в другой момент перехода, т.е. показать Марковские цепи в свёрнутой графической форме.

Глава 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АДАПТАЦИИ НЕЖИВОЙ ПРИРОДЫ

2.1. Целостно реагирующая часть объекта как комплекс

Естественные тела, обладающие сходными признаками, образуют объект человеческой деятельности: изучения, изменения или использования. Природные объекты функционируют внутри вмещающей среды. Частицы среды, выделение которых нецелесообразно или же невозможно по техническим условиям эксперимента, назовём праэлементами.

В качестве отправной аксиомы примем:

Аксиома 1. *Праэлементы способны самопроизвольно, при благоприятных условиях, объединяться в элементарные объекты, названные элементами. Элементы в свою очередь образуют объекты более высокого уровня.*

Предметом наших исследований являются такие объекты или части объекта, которые целостно реагируют на внешнее воздействие. Их мы называем комплексами. Целостность комплекса выражается в том, что изменение i -го элемента вызывает изменение других элементов комплекса, которые в ответ меняют i -ый элемент.

Комплекс образуется лишь в такой ассоциации природных объектов, где в ответ на внешнее возмущение возникают, согласно принципу тормозящего противодействия Ле Шателье-Брауна, коллективные действия объектов по уменьшению величины возмущения или его последствий.

Почему предмет наших исследований мы не называем системой? В геологии понятие системы имеет множество



толкований. Например: объект - система, объект - много систем, несколько взаимодействующих объектов - система, объект с внешними связями - система, признаки объекта - система, геологическое явление - система, метод исследования - система, система целей развития, минерально-сырьевая база - система, модель - система, система прогноза, система геофизических аномалий, условия образования залежи - система, литомониторинг - система, система организационных работ и т.д. (Системный анализ в геологии. 2 Всес.конф. Тезисы докл.-М.:1986). Все эти толкования, в общем, удовлетворяют определению Л. Фон Берта-ланфи: "Система может быть определена как совокупность элементов, находящихся в определённых отношениях друг с другом и со средой".

Нас интересуют устойчивые отношения элементов, образующие устойчивую внутреннюю структуру объекта. Наличие обратной связи предполагает тормозящее противодействие объекта внешним возмущениям. Существенным отличием комплекса от системы является то, что комплекс соответствует объекту или его части независимо от степени их познания, а система отражает известные функции объекта [42, 43, 87, 104]. Другими словами, комплекс - это объективная реальность, а система - субъективное отображение части этой реальности. Соотношения терминов, отражающих ассоциации физических тел, приведены в [табл. 2.1](#).

2.2. Иерархия комплексов

Комплексы одного вида **К** возникают в благоприятных

условиях из n различных видов комплексов (элементов) $K_{(i-1)j}$, ($j=1, 2, 3 \dots n$) нижнего, $(i-1)$ -го уровня. Для этого необходимо выполнение определённых векторных, пространственных, энергетических и других условий:

$$K_{(i-1)j} \xrightarrow{U} K_i, j=1, 2, \dots, n, \quad (2.1)$$

где U - условия возникновения, $U=(V, p, \varepsilon)$;

V - векторные условия возникновения. Характеризуют направление движения каждого вида комплексов уровня $(i-1)$;

p - пространственные условия возникновения, определяют концентрацию каждого вида объектов уровня $(i-1)$ во всех точках пространства;

ε - энергетические условия, соответствующие прочности связи между комплексами уровня $(i-1)$;

\longrightarrow - возникновение комплексов более высокого уровня.

Преобразование (2.1) соответствует случаю, когда комплексы K образуют лишь один вид комплекса более высокого уровня. Изобразим это в виде схемы (где e - элемент):

$$e \rightarrow K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow \dots \rightarrow K_{i-1} \rightarrow K_i \rightarrow K_{i+1}. \quad (2.2)$$

Назовём это последовательной конденсацией комплексов. За счёт приспособления комплексов одного вида K_{ij} к различным условиям воздействия в неоднородной среде могут возникнуть новые виды комплексов этого же уровня:

$$K_{ij} \subseteq K_i, \quad K_{ij} \cap I \longleftrightarrow K_{i(j+1)} + K_{i(j+2)} + \dots + K_{i(j+n)}, \quad (2.3)$$

где символ \longleftrightarrow означает преобразование комплексов одного вида в комплексы другого вида, но одного уровня в результате адаптации к условиям среды I .

Рассмотрим ситуацию, когда каждый новый вид комплекса i -го уровня участвует в возникновении нового вида комплекса уровня $(i+1)$. Каждый из последних участвует в новой цепи последовательной конденсации комплексов более высоких уровней:

$$K_{ij} \longleftrightarrow \begin{cases} K_{i(j+1)} \rightarrow K_{(i+1)(j+1)} \rightarrow K_{(i+2)(j+1)} \rightarrow \dots \rightarrow K_{(i+m)(j+1)} \\ K_{i(j+2)} \rightarrow K_{(i+1)(j+2)} \rightarrow K_{(i+2)(j+2)} \rightarrow \dots \rightarrow K_{(i+m)(j+2)} \\ \dots \\ K_{i(j+n)} \rightarrow K_{(i+1)(j+n)} \rightarrow K_{(i+2)(j+n)} \rightarrow \dots \rightarrow K_{(i+m)(j+n)} \end{cases} \quad (2.4)$$

Это конденсация с бифуркацией.

К основному виду конденсации следует отнести случай, когда в неблагоприятных условиях комплекс 1-го вида уровня i распадается на комплексы уровня $(i-k)$, из которых формируется новый вид комплекса уровня i .

$$K_{i1} \xrightarrow{-\otimes} K_{i-k} \rightarrow K_{i2} \xrightarrow{-\otimes} K_{i-k} \rightarrow K_{i3} \xrightarrow{-\otimes} K_{i-k} \rightarrow \dots \rightarrow K_{i(nk)}, \quad (2.5)$$

$k \geq 1, \quad n \geq 1,$

где символ $-\otimes \rightarrow$ означает распад комплекса высокого уровня на комплексы более низкого уровня.

Это - маятниковая конденсация.

Пример 1. *Необходимые условия возникновения комплексов высокого уровня.*

1. Автохтонное торфонакопление:

- а) комплексы 1-го уровня: растительные остатки, вода;
- б) комплексы 2-го уровня: слой торфа;

в) векторные условия: растительные остатки не должны выноситься из торфяного болота;

г) пространственные условия: растительных остатков должно быть достаточно, чтобы они не успели разложиться на химические элементы до захоронения; уровень воды должен обеспечивать рост растений и захоронение растительных остатков;

д) энергетические условия: гидродинамическая активность должна быть низкой, чтобы торфяной слой не разрушался.

Это основные условия, механизм соблюдения которых как случайное совпадение благоприятных внешних условий (климатических, тектоно-эвстатических и др.), так и самосохранение торфяника от разрушения.

2. Возникновение рудного тела:

а) комплексы 1-го уровня: различные рудогенные элементы;

б) комплексы 2-го уровня: рудное тело;

в) векторные условия: рудогенные элементы должны поступать в рудное тело из рудогенной или рудовмещающей толщи;

г) пространственные условия: концентрация каждого рудогенного элемента должна быть достаточной для образования устойчивых минералов в рудном теле;

д) энергетические условия: свободная энергия рудогенных элементов должна резко падать на геохимическом барьере, где образуется рудное тело; энергия внешней среды должна быть ниже критического значения, выше кото-

2.3. Размер комплекса

Комплекс возникает внутри той группы, где элементы взаимодействуют. Где изменение i -го элемента вызывает изменение всех элементов комплекса, которые в свою очередь меняют i -й элемент. Предположим, что связь между элементами осуществляется посредством изменения активной среды, т.е. через поле.

Под воздействием внешней среды состояние элемента e_i меняется. Это вызывает изменение величины поля, т.е. возникает сигнал. Если сигнал другими элементами не усиливается, тогда он будет затухающим. Определим размер комплекса, приняв, что элемент e_i - излучатель - находится в его центре. Для упрощения положим, что среда изотропна. Радиус комплекса выразим в разностях потенциалов поля. Примем потенциал поля (E) равным 1 у излучателя:

$$E_{e_i} = 1 . \quad (2.6)$$

Величина сигнала у излучателя будет равна амплитуде колебания значения поля:

$$U_{e_i} = \Delta E_{e_i} , \quad (2.7)$$

где U_{e_i} - величина сигнала у излучателя.

Величина сигнала в произвольной точке комплекса будет зависит от значения поля вблизи приёмника и от величины сигнала у излучателя:

$$U_n = \frac{\Delta E_e}{E_e} E_n = \Delta E_{e_i} \cdot E_n = U_{e_i} \cdot E_n , \quad (2.8)$$

где E_n - значение поля вблизи приёмника (принимающего

элемента);

U_n – величина сигнала на приёмнике.

Будет ли сигнал U_n воспринят приёмником или нет, зависит от чувствительности принимающего элемента e_n . Сигнал излучателя будет принят приёмником при условии:

$$U_n \geq \xi_n, \quad (2.9)$$

где ξ_n – чувствительность приёмника.

Из формул (2.8) и (2.9) найдём значение поля вблизи приёмника и радиус комплекса:

$$E_n \geq \frac{\xi_n}{U e_i}, \quad (2.10)$$

$$R_n \leq 1 - \frac{\xi_n}{U e_i}, \quad (2.11)$$

где R_n – радиус комплекса в потенциалах поля.

В частном случае, если величина поля в комплексе ранее равнялась нулю:

$$R \leq 1 - \xi_n. \quad (2.12)$$

Таким образом, величина комплекса зависит, по крайней мере, от двух параметров входящих элементов:

- 1) от величины сигнала излучателя, т.е. от величины возмущения поля, вызванного тем или иным элементом;
- 2) от чувствительности воспринимающих элементов комплекса.

Это означает, что в том или ином объекте могут возникать различные комплексы в зависимости от указанных параметров элементов, от местоположения источника возмущения поля, от вида поля. *Следовательно, комплексы в объекте могут взаимно перекрываться, и одни и те же*

элементы могут входить в разные комплексы.

Несомненно, что при определённых условиях могут возникать локализованные в пространстве комплексы.

2.4. Соответствие размера и качества комплекса

Реальная внешняя среда неоднородна. Поэтому пространственно-векторно-энергетические условия образования объектов из элементов существуют не во всей области распространения элементов, а в отдельных зонах. Это приводит к тому, что часть элементов не конденсируется в объекты, а остаётся в свободном состоянии. Следовательно, формулу (2.1) необходимо дополнить ещё одним слагаемым:

$$K_{(i-1)j} \xrightarrow{U} K_i + K'_{(i-1)j}, \quad (2.13)$$

где $K'_{(i-1)j}$ – свободные комплексы $K_{(i-1)j}$, не вошедшие в комплексы K_i более высокого уровня.

Следствие. Если радиус комплекса K_{i-1} не меняется в комплексах более высокого уровня K_j , ($j > (i-1)$), то в области распространения комплексов K_{i-1} вероятность встречи комплексов более высоких уровней уменьшается с ростом уровня комплекса:

$$P_{K_{i-1}} > P_{K_i} > P_{K_{i+1}} > P_{K_{i+2}} > \dots > P_{K_{i+n}}, \quad (2.14)$$

где P_{K_i} – вероятность встречи комплекса уровня i при его поиске по постоянной сетке.

Это лишь математическое выражение того очевидного вывода, что комплексы более высокого уровня встречаются

лишь в той области пространства, где есть для них материал. То есть, комплексы низкого уровня, являющиеся элементами комплексов более высокого уровня.

Пример 4. *Вероятность встречи атома элемента, его минерала, рудного тела и месторождения. Если регион будет разбуриваться по постоянной сетке, то вероятность встречи атома химического элемента будет очень высокая, минерала этого элемента - несколько ниже, ещё меньше - вероятность встречи оруденения и наименьшая вероятность - месторождения данного химического элемента.*

Предположим, что U - условия включают сближение элементов, которое продолжается и после возникновения комплекса. Такое векторное условие вызовет увеличение плотности вещества в комплексе. Если в двух первоначально одинаковых комплексах сближение элементов происходит с различной скоростью, то через некоторое время концентрация элементов в комплексах будет различаться.

В комплексе большего размера концентрация элементов будет меньше, чем в комплексе меньшего размера. То есть будет соблюдаться соотношение:

$$R_k = \frac{k}{\rho_k} \quad (2.15)$$

где R_k - радиус комплекса;

ρ_k - плотность вещества (концентрация элементов) в объекте, т.е. его качество;

k - коэффициент пропорциональности.

В системе $R_k - \rho_k$ поле существования комплексов одного вида, но с разной интенсивностью сближения элементов, должно ограничиваться линией обратной

зависимости в соответствии с формулой (2.15).

Отметим, что обратная зависимость возникает и при разной продолжительности времени сближения элементов в двух первоначально одинаковых комплексах. Если скорость сближения одинакова, но время развития комплексов различно, то в комплексе меньшего размера элементная плотность будет выше.

В том случае, если U - условие включает поступление элементов из одного центра и их последующий разнос на окраину комплекса, то взаимосвязь между элементной плотностью и размером комплекса будет прямая. То есть, чем больше элементов поступит в центр комплекса, тем большим станет размер комплекса. Одновременно возрастёт средняя элементная плотность внутри комплекса. Другими словами, увеличится концентрация элементов в комплексе.

Первоначальные размеры комплексов одного вида могут различаться, как и их первоначальная элементная плотность. На первый взгляд, это предполагает отсутствие закономерной связи между размером и качеством комплекса в природе.

Однако общеизвестно, что значения параметров природных объектов обычно подчиняются нормальному распределению.

Исходя из этого, выдвинем вторую аксиому.

Аксиома 2. Комплексы одного вида, возникшие в одной области пространства, характеризуются приблизительно одинаковыми значениями параметров.

Размытость заставляет работать с границами кластеров.

2.5. Адаптация как псевдоцелое развитие

Под воздействием внешней среды комплекс случайным образом меняется. Если эти изменения повышают устойчивость комплекса, то он сохраняется, если снижают устойчивость - комплекс разрушается. В качестве примера развития комплексов рассмотрим изменение их основных свойств под влиянием среды. Предварительно введём следующие понятия:

состояние комплекса (W_K) - координаты его элементов в системе отсчёта комплекса;

состояние среды (W_C) - координаты частей среды в системе отсчёта комплекса;

энергия связи (p) элементов - энергия, необходимая для отрыва элемента от комплекса и перемещения в бесконечность;

разрушение комплекса - изменение основной функции комплекса в результате его распада или распада элементов.

Основной причиной развития объектов-комплексов служит изменение состояния внешней среды от А до F:

$$W_K = (A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F) \quad (2.16)$$

При этом вынужденно, но случайным образом меняется состояние объекта [152, с.17], т.е. каждого i -го комплекса:

$$W_K = (a_i \rightarrow b_i \rightarrow c_i \rightarrow d_i \rightarrow e_i \rightarrow f_i).$$

Случайное изменение является причиной того, что энергия связи элементов у разных комплексов меняется по-разному. Предположим, что разрушение комплекса происходит по-разному при $p > p_2$, $p < p_1$ (рис.2.1). При переходе внешней среды в состояние С разрушается комплекс K_1 , а в состоя-

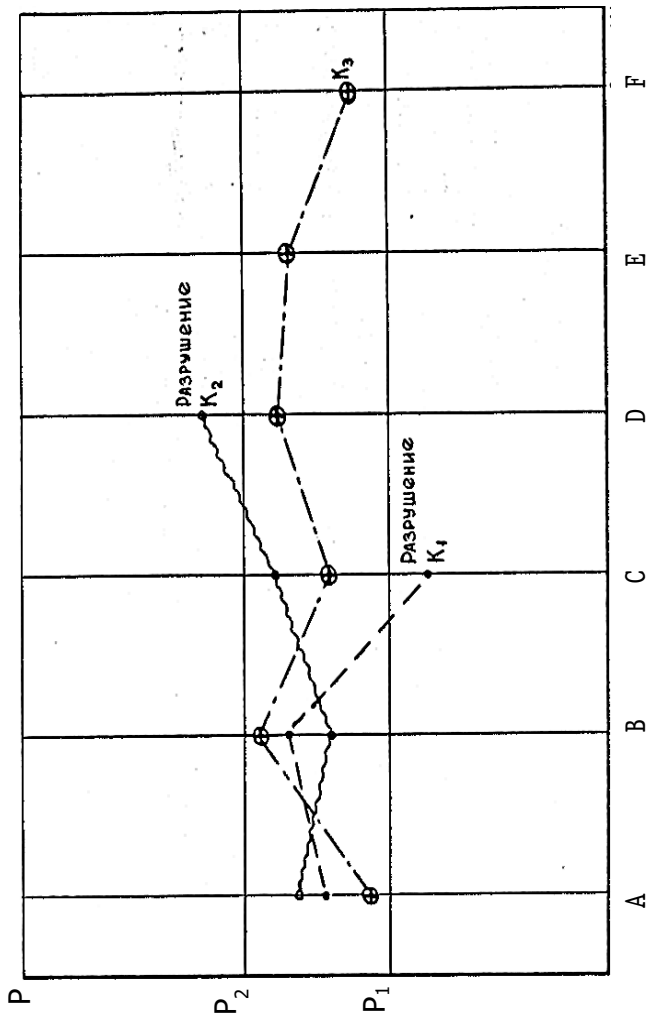


Рис. 2.1. Вынужденное изменение состояния комплекса (W_K) и энергия связи (P) их элементов из-за воздействия внешней среды.

ние D - комплекс K_2 . В рассмотренном отрезке времени сохраняется, благодаря адаптации, лишь комплекс K_3 . Адаптация комплекса K_3 , как и других комплексов, происходила вынужденно под воздействием меняющейся внешней среды.

Однако она оказалась более успешной, поскольку случайные внутренние флуктуации комплекса K_3 шли в благоприятном для адаптации направлении. *И случайные флуктуации комплекса сыграли управляющую роль в механизме поиска наиболее оптимальных вариантов развития.* В любой момент времени сохраняются лишь те комплексы, которые наиболее адаптированы к воздействию среды.

Поэтому комплексу, в связи с наличием у него способности к случайному поиску оптимального варианта приспособления, дадим новое дополняющее определение:

комплекс - это реальный объект или его часть, обладающая способностью к случайному псевдоцелевому развитию, направленному на адаптацию к воздействию внешней среды.

Вывод о случайном псевдоцелевом развитии адаптированного комплекса имеет два следствия, первое из которых тривиально:

Следствие 1. *Любой адаптированный комплекс обладает такими свойствами и такими механизмами адаптации, которые наиболее выгодны в той внешней среде, где данный комплекс устойчиво функционирует.*

Следствие 2. *Процесс развития адаптированного комплекса можно моделировать, представив механизм его адаптации как целеустремлённый процесс.*

2.6. Способы самосохранения комплекса

В природе однотипные элементы часто встречаются группами, т.е. зона их развития локализована в пространстве. Причина этого кроется в следующем:

1) пространственно-векторные условия возникновения однотипных элементов обеспечиваются в локальных областях;

2) каждый из элементов лучше сохраняется в группе и в комплексе, чем за их пределами;

3) лучше сохраняется цельность той ассоциации, где взаимосвязь между элементами более устойчива.

Разрушение комплекса (элемента) происходит в том случае, если величина внешнего воздействия выше, чем сила связей составных частей. Решающим для сохранения комплекса является соотношение:

$$\sigma = \frac{\beta}{h}, \quad (2.17)$$

где β - сила одной связи, между двумя элементами,

h - внешняя сила, действующая на одну связь,

σ - прочность связи.

Величину σ назовём прочностью связи. При $\sigma > 1$ старая структура комплекса сохраняется, следовательно, его функция не меняется. При $\sigma < 1$ старые связи комплекса частично или полностью разрушаются. Частичное разрушение комплекса связано с тем, что, благодаря неодинаковости свойств элементов, связи также имеют различную силу.

В первом приближении *механизм адаптации комплекса*

представляется следующим. Предположим, что несвязные элементы способны вступить в новые связи. Прочность новой связи может быть больше или меньше 1. Если $\sigma < 1$ вновь возникшая связь разрушается, если $\sigma > 1$, то новая связь сохраняется. *Так перестраивается структура комплекса и меняется его форма.*

Пример 5. *Разрушение - рост дифференцированно напряженного кристалла. Сильно напряжённые части кристалла растворяются и одновременно происходит рост кристалла в другом ненапряженном месте* (Дж.Ферхуген и др. Земля. Введение в общую геологию. М: Мир. 1974, 845 с). Д.Дерни и Дж.Рамсей отмечают: "Рост кристаллов в дифференцированно напряжённой породе будет иметь тенденцию ограничиваться гранями, испытывающими относительно низкие нормальные напряжения" [63, с.103]. Дж.Ферхуген считает, что рост новых кристаллов внутри и за счёт сильно дифференцированных старых кристаллов является причиной сложения связно текущей горной породы недеформированными зёрнами. Однако для этого необходима достаточно высокая скорость диффузии и низкая скорость связанного течения.

В приведённом примере, благодаря адаптации, цельность кристалла и горной породы не исчезает. Кристалл сохраняет способность расти, а у горной породы не меняется минеральный состав. Здесь вводится соотношение скоростей разрушения старых связей и образования новых.

В общем случае *цельность комплекса сохраняется тогда, когда рост разрушающего воздействия отстаёт от*

увеличения средней силы связи элементов. Это отношение охарактеризуем понятием скорость реакции комплекса:

$$r = \frac{d\beta}{dt} : \frac{dh}{dt} = \frac{d\beta}{dh}, \quad (2.18)$$

где r - скорость реакции комплекса;

$d\beta$ - изменение средней силы связи за время dt ;

dh - изменение разрушающего воздействия.

При $r \geq 1$ комплекс сохраняется благодаря адаптации с изменением его структуры и формы. При $r < 1$ комплекс не успевает адаптироваться и распадается.

В приведённом четвертом примере *необходимым условием разрушения и изменения формы кристалла является дифференцированная нагрузка.* То есть комплекс вынужденно меняется при наличии пространственного градиента напряжённости внешнего поля.

В каких условиях растёт градиент напряжённости? Любой комплекс либо накапливает поступающую извне энергию и вещество, либо перепускает их сквозь себя. *В том случае, если комплекс не успевает переработать (накопить или пропустить) поступающую энергию и вещество, то начинается рост пространственного градиента напряженности внешнего поля.* Увеличение градиента приводит к разрушению старых связей комплекса. Если вновь возникшие связи обеспечивают переработку поступающей извне энергии и вещества, то комплекс адаптируется.

Градиент напряжённости внешнего поля вблизи комплекса не увеличивается при условии, что комплекс перемещается под влиянием этого поля. Следовательно,

связи комплекса не разрушаются и его цельность сохраняется. Такое перемещение также является одним из видов адаптации комплекса.

При перемещении комплекс может оказаться в зоне с благоприятными условиями. Однако для этого необходимо, чтобы внешняя среда была неоднородной. Комплекс может сохраниться и в том случае, *если свойства внешней среды меняются* во времени. И неблагоприятные условия быстро сменяются благоприятными.

Распад связей может сопровождаться выносом свободных элементов за пределы комплекса. Если при этом существенно изменится *элементная концентрация*, то комплекс перестанет выполнять свои функции, т.е. разрушится.

Если условия внешней среды периодически меняются, переходя из состояния А в состояние Б, и вновь возвращаясь, то в некоторых комплексах могут существовать связи, соответствующие как состоянию А, так и Б. При очередном изменении внешних условий до состояния Б легче и быстрее адаптируется тот комплекс, в котором сохранились остатки связей, соответствующих состоянию Б. Такое приспособление комплекса назовём *адаптацией с использованием шаблона*.

Пример 6. *Унаследованность палеорусел почвы при захоронении торфяника. В качестве комплекса рассмотрим аллювиально-дельтовую ландшафтную область, в качестве элемента верхний осадочный слой. Если при торфонакоплении (состояние А) перекрывались торфом*

палеорусла (состояние Б), то захоронение торфяника происходило за счёт проникновения наносов (возврат в состояние Б) по унаследованным водотокам, расположенным над палеоруслами. Торфяник эпигенетически не размывался, что свидетельствует о лёгкой адаптации комплекса к состоянию Б [54].

Обычно элементы в комплексе расположены достаточно близко, что обеспечивает прочную связь между ними. Благодаря высокой концентрации элементов в комплексе создаётся внутренняя среда, состояние которой отличается от внешней. Кратковременные изменения внешней среды в первую очередь воздействуют на элементы окраины комплекса. Эти элементы либо разрушаются, либо адаптируются, поглощая энергию внешней среды. Поэтому состояние внутренней среды оказывается более устойчивым и элементы окраин начинают отличаться от других элементов комплекса. Возможны более сложные формы специализации элементов.

Рассмотренные условия сохранения элемента (комплекса) сведены в [табл.2.2](#) .

И, наконец, постараемся доказать следующее положение:

В комплексе более высокого уровня K_i прочность связи σ_{i-1} между его элементами - комплексами нижнего уровня K_{i-1} меньше или равно прочности связи σ_{i-2} между комплексами ещё более низкого уровня K_{i-2} , образующими комплекс K_{i-1} .

То есть $\sigma_{i-2} \geq \sigma_{i-1}$.

Доказательство (от обратного):

Если $\sigma_{i-n} < \sigma_{i-(n-1)} < \dots < \sigma_{i-2} < \sigma_{i-1}$, то воздействие

среды в первую очередь вызовет разрушение комплексов нижнего уровня:

$$K_{i-n} \xrightarrow{-\otimes} K_{i-(n+1)}.$$

Это вызовет распад комплексов более высокого уровня, образованных данными комплексами:

$$K_{i-(n-1)} \xrightarrow{-\otimes} K_{i-n},$$

и так далее.

Поскольку K_{i-n} входит в множество K_{ij} , то разрушение K_{i-n} вызовет массовое разрушение всех видов комплексов высокого уровня.

Если бы условие $\sigma_{i-2} < \sigma_{i-1}$ существовало, то за длительное время реализовалась бы такая катастрофическая ситуация.

Поскольку в природе существуют комплексы разных уровней, то наиболее вероятно выполнение условия:

$$\sigma_{i-n} > \sigma_{i-(n-1)} > \dots > \sigma_{i-2} > \sigma_{i-1} > \sigma_i.$$

2.7. Изменение формы и структуры комплекса в ходе его адаптации

Приспособление комплекса к изменениям среды происходит вынужденно под воздействием внешних сил. Поскольку комплекс состоит из взаимодействующих элементов, то любой свободный элемент стремится вступить в связь с другими элементами комплекса. Благодаря неодинаковости элементов прочность (σ) этой связи может оказаться больше или меньше 1. В последнем случае эта связь разрушается и случайно возникает новая связь. Затем все повторяется.

Другими словами, возникающие связи конкурируют, и сохраняются те из них, прочность которых больше 1. Тем самым меняется структура комплекса и его форма. *В конкуренции случайно возникающих связей элементов и состоит сущность адаптации комплекса.*

Адаптация происходит в несколько этапов, по мере увеличения внешнего воздействия и вызванного этим уменьшения прочности связей элементов (см. формулу (2.17)).

1. Начальный этап – стабильная адаптация: *переработка (накопление и перенос) поступающей извне энергии и вещества осуществляется имеющимися связями комплекса.*

2. Этап изменения структуры – структурная адаптация: *увеличение внешнего воздействия снижает прочность связей. Наиболее слабые связи разрушаются, возникают новые. Происходит конкуренция связей, в результате чего меняется структура комплекса.*

3. Этап разрушения комплекса – катастрофическая адаптация. *Рост внешнего воздействия снижает прочность всех связей, они разрушаются, комплекс распадается. Однако элементы комплекса сохраняются.*

Описанная схема подтверждается исследованиями по разрушению металлов и полимеров [95, с.53, с.100; 94, с.64; с.164].

Переход с одного этапа адаптации к другому сопровождается скачкообразным увеличением количества транспортируемой комплексом энергии и вещества. Это позволяет отмечать изменение структуры комплекса и переход от одного этапа адаптации к другому по резким изменениям

энергетического состояния внешней среды или комплекса .

Пример 7. *Структурообразование при нагревании жидкости - эффект Бенара . В неглубоком сосуде подогревается снизу вязкая жидкость . При малой разности температур ΔT между нижней и верхней поверхностью жидкости теплота переносится снизу благодаря теплопроводности . Это соответствует этапу стабильной адаптации , поскольку слои жидкости не перемешиваются . При разности температур более сверхкритической ($\Delta T > \Delta T_{кр}$) в жидкости возникает конвекция с образованием гексагональных ячеек . То есть возникает упорядоченная структура , напоминающая кристалл . Это соответствует этапу структурной адаптации . Одновременно с образованием структурной упорядоченности скорость переноса теплоты резко возрастает [98, с.150].*

При катастрофической адаптации комплекса K_i разрушаются связи, удерживающие его элементы. Последние начинают перемещаться под действием внешних сил. Тем самым снижается градиент внешнего поля, что способствует выживанию комплексов K_{i-1} . То есть катастрофическая адаптация направлена на выживание элементов разрушающегося комплекса .

Процесс адаптации комплекса можно представить в виде логической блок-схемы (рис.2.2). Из схемы видно, что при каждом увеличении внешних сил происходит минимально необходимое разрушение связей комплекса .

2.8. Влияние адаптации комплекса на энтропию

Энтропия изолированной системы описывается формулой

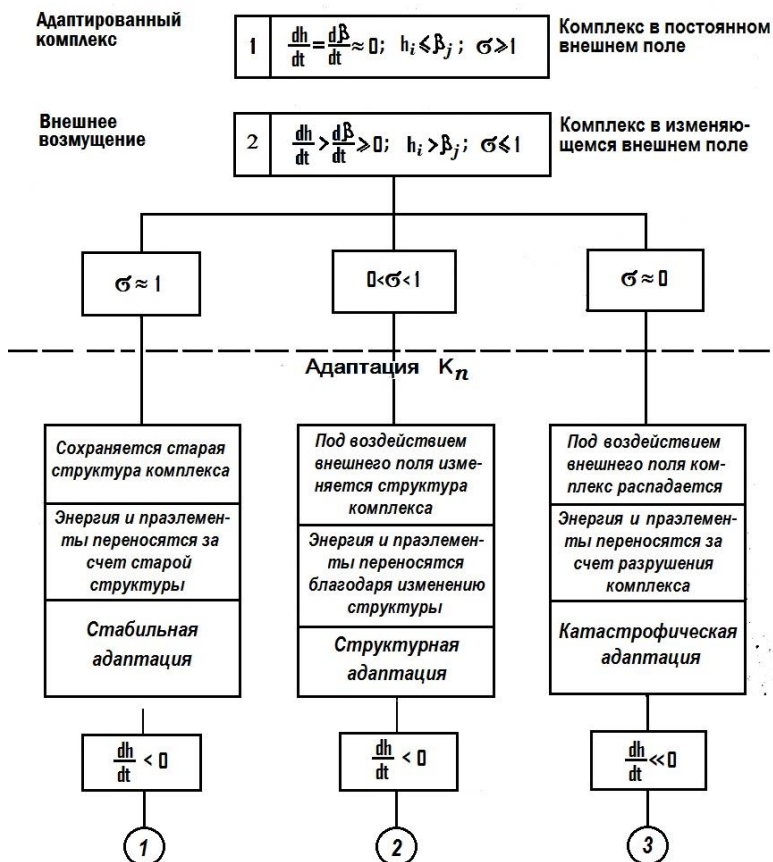


Рис. 2.2. Основные виды адаптации комплекса K_n в зависимости от прочности связи (σ) элементов.

$$\Delta S = \Delta Q_u / T_k, \quad (2.19)$$

где ΔS - энтропия; ΔQ_u - тепловая энергия; T_k - температура изолированной системы.

В термодинамике под температурой понимается количество кинетической энергии поступательного движения частицы со скоростью, равной проекции средней скорости \bar{v} частицы на случайный вектор трёхмерного пространства [159, с.192]:

$$T = \left[\frac{2}{3k} \right] \cdot \bar{K} = \left[\frac{2}{3k} \right] \frac{m \cdot \bar{v}^2}{2} = \frac{m \cdot 3 \cdot \bar{v}_x^2}{2} \left[\frac{2}{3k} \right] = \frac{2}{k} \cdot \frac{m \cdot \bar{v}_x^2}{2}, \quad (2.20)$$

где T - температура;

\bar{K} - средняя кинетическая энергия поступательного движения частицы;

m - масса частицы;

\bar{v}_x^2 - проекция средней скорости частицы на случайный вектор трёхмерного пространства;

k - постоянная Больцмана, определяет шкалу температуры.

Обозначим:
$$\frac{m \cdot \bar{v}_x^2}{2} = \bar{K}_a, \quad (2.21)$$

и условимся \bar{K}_a называть активной энергией частицы, поскольку именно эта величина определяет работу системы:

$$PV = NkT = Nk \left[\frac{2}{k} \cdot \frac{m \cdot \bar{v}_x^2}{2} \right] = N \cdot 2 \cdot \bar{K}_a, \quad (2.22)$$

где P - давление, V - объём системы из N частиц.

Температура через \bar{K}_a выразится следующим обра-

ЗОМ:

$$T = \frac{2}{k} \overline{K_a} \quad (2.23)$$

Преобразуем формулу (2.19) с учётом (2.23):

$$\Delta S_u = \frac{\Delta Q_u}{\left(\frac{2}{k}\right) \overline{K_a}} = \frac{k \cdot \Delta Q_u}{2 \overline{K_a}} \quad (2.24)$$

Сравним формулы (2.20) и (2.23):

$$T = \left[\frac{2}{3k} \right] \cdot \overline{K} = \frac{2}{k} \overline{K_a} \longrightarrow \overline{K_a} = \frac{1}{3} \overline{K},$$

где величина $1/3$ показывает, какая часть от среднего кинетической энергии частицы является активной кинетической энергией. Обозначим $\alpha = 1/3$, поскольку эта величина зависит как от строения молекул газа, так и от вида процесса [159, с.205]. Поэтому:

$$T = \frac{2}{k} \overline{K} \alpha, \quad \alpha = \frac{\overline{K_a}}{\overline{K}}$$

Для открытой неравновесной системы попытаемся ввести понятие неравновесной энтропии S_H через активную энергию $\overline{K_A}$:

$$\overline{K_A} = K_a \cdot N, \quad (2.25)$$

где $\overline{K_A}$ - суммарная активная энергия всех частиц в единичном объёме;

N - число частиц в единичном объёме системы.

В неравновесной системе существует поток энергии от “источника” к “приёмнику”. Схему передачи тепловой энергии можно представить в виде модели-развёртки неравновесной системы (рис.2.3).

Теплоноситель с высокой скоростью движется от ис-

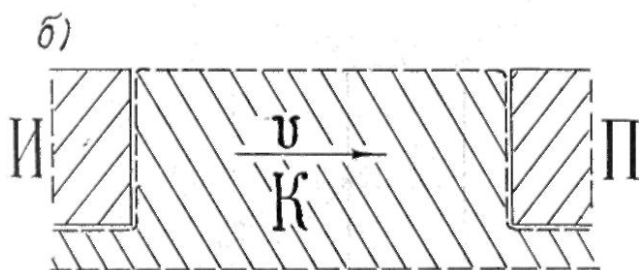
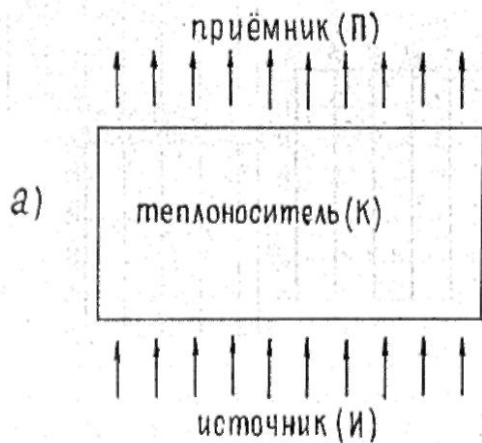


Рис. 2.3. Схема передачи тепловой энергии от источника (И) к приёмнику (П) (а), модель-развёртка данной неравновесной системы (б).

точника к приёмнику. Для упрощения примем следующее:

а) тепловая энергия получается теплоносителем и отдаётся лишь при контакте соответственно с источником и приёмником;

б) в зоне контакта с приёмником температура теплоносителя снижается до нуля градусов;

в) теплоперенос происходит при полном энергонасыщении теплоносителя, то есть при температуре T .

Скорость передачи тепла:

$$\frac{dQ_{\Pi}}{dt} = -q \cdot V = -\frac{c \cdot T \cdot m}{l} \cdot V, \quad (2.26)$$

где dQ_{Π} - передаваемое за время dt тепло;

l - расстояние от источника до приёмника;

q - количество тепловой энергии, приходящейся на единицу расстояния;

c, T, m - соответственно теплоёмкость, температура и масса теплоносителя;

V - скорость движения теплоносителя от источника к приёмнику.

Условно представим, что тепло передаётся неподвижным теплоносителем. Предположим, что теплоперенос сопровождается повышением температуры теплоносителя до величины T_T . Другими словами, температура всего теплоносителя периодически возрастает до теоретического значения T_T , а затем понижается до величины T .

Тогда скорость передачи тепла можно выразить следующим образом:

$$\frac{dQ_{\Pi}}{dt} = \frac{c \cdot m \cdot dT_{\tau}}{dt}. \quad (2.27)$$

Из формул (2.26) и (2.27) получим:

$$dT_{\tau} = -T \cdot V \cdot \frac{1}{l} \cdot dt.$$

Проинтегрируем:
$$\int_{T_{\tau}}^T dT_{\tau} = \int_{t_1}^{t_2} \left[-T \cdot V \cdot \frac{1}{l} \right] dt,$$

$$T_{\tau} = T \cdot \left(V \cdot \frac{\Delta t}{l} \right) + T = T \cdot \left(\frac{V \cdot \Delta t}{l} + 1 \right). \quad (2.28)$$

Так как теплоноситель находится в 2-х состояниях, то средняя температура:

$$T_c = \frac{T_{\tau} + T}{2},$$

где T_c - средняя теоретическая температура теплоносителя.

Выразим через T_c неравновесную энтропию ΔS_H :

$$\Delta S_H = \frac{\Delta Q}{T_c} = \frac{\Delta Q}{T \cdot \left[\frac{V \cdot \Delta t}{2 \cdot l} + 1 \right]}.$$

При: $\Delta t = 1c$, $\delta l = V$,

где δl - путь, пройденный точкой теплоносителя за 1 секунду.

Учитывая, что $\Delta S = \Delta Q / T$, получаем:

$$\Delta S_H = \frac{\Delta S \cdot l}{\frac{\delta l}{2} + l}. \quad (2.29)$$

Преобразуем формулу (1.1.29):

$$\Delta S_H = \Delta S \cdot \frac{l \cdot q}{\left[\frac{\delta l \cdot q}{2} + l \cdot q \right]} = \Delta S \cdot \frac{\Delta Q}{\left[\frac{\delta Q}{2} + \Delta Q \right]}, \quad (2.30)$$

где ΔQ - рост количества теплоты в объекте (в теплоносителе);

δQ - скорость транспортировки тепловой энергии теплоносителем.

Таким образом, неравновесная энтропия снижается с ростом скорости транспортировки тепловой энергии.

Выразим неравновесную энтропию через кинетическую энергию. Учитывая, что: $V=(V_1+ V_2):2$ и $a=(V_2 - V_1):\Delta t$, или при $V_1 =0$, $\rightarrow V=V_2 : 2$, и $a=V_2: \Delta t$, умножим числитель и знаменатель на внешнюю силу $F=(m \cdot a)$:

$$\Delta S_H = \Delta S \frac{\frac{l}{2} + l}{\frac{\Delta l}{2} + l} = \Delta S \frac{l}{\frac{V \cdot \Delta t}{2} + l} = \Delta S \frac{lF}{\frac{V_2 \cdot \Delta t \cdot m \cdot V_2}{2} + lF} = \Delta S \frac{lF}{\frac{m \cdot V_2^2}{2} + \frac{1}{2} + lF} = \frac{\Delta S \cdot A}{\frac{\mathcal{K}}{2} + A},$$

$$\Delta S_H = \Delta S \frac{A}{\frac{\mathcal{K}}{2} + A}, \quad (2.31)$$

где V_1, V_2 - скорость движения теплоносителя в моменты времени t_1, t_2 ;

a - ускорение движения теплоносителя;

A - работа внешней силы;

\mathcal{K} - часть работы A , преобразованная в кинетическую энергию теплоносителя.

При $\mathcal{K}=0$, $\rightarrow \Delta S_H = \Delta S$.

В ходе адаптации комплекса (в данном случае теплоносителя) приращение работы внешней силы (dA) направлено на разрушение внутренних связей в комплексе, но, $\mathcal{K} = \text{const}$. Поскольку при этом в формуле (2.31) величина дроби в правой части растёт, то увеличивается и значение неравновесной энтропии.

Другими словами, *в точке адаптации энтропия*

комплекса возрастает. После адаптации увеличивается часть работы А, затрачиваемая на рост кинетической энергии К из-за снижения внутренних потерь, следовательно, после адаптации комплекса снижается его энтропия и одновременно возрастает темп снижения энтропии dS_n :

$$-\left| \frac{dS_{n1}}{dt} \right| < \left| \frac{-dS_{n2}}{dt} \right|,$$

где dS_{n2} , dS_{n1} - прирост энтропии соответственно до адаптации и после.

Рассмотрим комплекс K_i , состоящий из комплексов K_{i-1} . Неравновесная энтропия комплекса K_i описывается уравнением (2.31), а неравновесная энтропия комплекса K_{i-1} следующей формулой:

$$\Delta S_n = \Delta S \frac{\delta}{\varepsilon + \delta}, \quad (2.32)$$

где S_n - неравновесная энтропия комплекса K_{i-1} ;

ΔS - энтропия комплекса K_{i-1} в состоянии равновесия;

δ - работа внешних сил по отношению к комплексу K_{i-1} ;

ε - часть работы δ , преобразованная в кинетическую энергию комплекса K_{i-1} .

В точке адаптации ($\mathcal{K} = \text{const}$), а приращение работы dA увеличивает внутреннюю энергию комплекса K_i .

При $\delta = \text{const}$, $\rightarrow d\varepsilon > 0$, $\int d\varepsilon = dA$, происходит снижение энтропии отдельного комплекса K_{i-1} :

$$dS_n < 0$$

То есть, в точке адаптации комплекса K_i его энтропия возрастает, а энтропия его элементов снижается.

После адаптации, как мы отметили, энтропия комплекса (K_i) снижается. И, в общем: *в результате адаптации комплекса возрастает упорядоченность и комплекса K_i , и его элементов.*

Неравновесная энтропия (см. формулу (2.31)) снижается с увеличением времени существования объекта: $\Delta S_H = \frac{1}{t}$, где t - время существования объекта.

Однако в определении энтропии изолированной системы, то есть классической энтропии, время не участвует.

Преобразуем формулу (2.29), описывающую неравновесную энтропию, таким образом, чтобы исключить из неё время:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t}, \quad \Delta l = \frac{V_2 + V_1}{2} \Delta t$$

где a - ускорение движения теплоносителя;

V_1, V_2 - скорость движения теплоносителя в моменты времени t_1, t_2 .

Получаем:

$$\frac{\Delta l}{2} F = \frac{\Delta l}{2} m a = \frac{m V_2^2}{2} - \frac{m V_1^2}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} (\mathcal{K}_2 - \mathcal{K}_1) = \frac{1}{2} \Delta \mathcal{K},$$

где $\mathcal{K}_2, \mathcal{K}_1$ - кинетическая энергия в моменты времени t_1 и t_2 . Если примем $\Delta t = t_2 - t_1 = 1$ секунде, то $\Delta \mathcal{K}$ - это приращение кинетической энергии за 1 секунду, т.е. скорость приращения кинетической энергии.

$$\Delta S_{HH} = \Delta S \frac{M}{\frac{1}{2} \Delta K + M}, \quad (2.33)$$

где ΔS_{HH} - нестационарная энтропия;

ΔS - энтропия комплекса K_{i-1} в состоянии равновесия;

M - мощность внешней силы;

$\Delta \mathcal{K}$ - приращение кинетической энергии за 1 с, т.е. скорость приращения кинетической энергии.

Нестационарная энтропия не зависит от времени, и переходит в энтропию изолированной системы при $a = 0$:

$$\Delta S_{\text{нн}} = \Delta S, \text{ при } a=0, V=\text{const.}$$

2.9. Основные выводы по главе "Теория адаптации ... "

При разработке теории адаптации автор опирался на следующие общеизвестные явления и представления:

а) адаптация - это процесс приспособления объекта к воздействию внешней среды посредством действий или флуктуаций;

б) живые и неживые объекты в природе объединяются в ассоциации, образуя более крупные объекты высокого уровня;

в) существует иерархическая, вложенная структура организованности объектов различных уровней;

г) объекты взаимодействуют с другими объектами и с внешней средой, и за счёт этого изменяются;

д) в процессе изучения объекту ставят в соответствие систему или модель. Система представляет собой исследуемое отображение объекта, а модель отображает функционирующие части системы;

е) неравновесная неупорядоченная система способна самоорганизоваться при сверхкритическом градиенте внешнего воздействия.

На основании общеизвестных представлений автором были предложены следующие положения адаптивной идеологии развития неживых объектов:

1. **Аксиома:** объекты нижнего уровня при благоприятных условиях самопроизвольно объединяются в объекты более высокого уровня.

2. Часть объекта, целостно реагирующую на внешнее воздействие, предложено называть **комплексом**.

3. Внутри одного объекта могут существовать один или несколько комплексов, иногда взаимно перекрываясь.

4. Для комплексов, как и для объектов, характерна вложенная иерархическая структура организованности.

5. Комплексы высокого уровня образуются (конденсируются) из комплексов нижнего уровня при выполнении пространственно-векторно-энергетических условий.

6. Существуют следующие виды конденсации: последовательная, последовательная с адаптацией, бифуркационная, маятниковая и сложная.

7. Существует соответствие между размером комплекса, его элементной плотностью и направлением перемещения элементов при формировании комплекса. Это позволяет прогнозировать размеры и массу (количество элементов) комплекса.

8. Любой комплекс субадаптирован к внешнему воздействию, и процесс его адаптации можно смоделировать как целеустремленный. Тем самым существующему комплексу присваиваются черты разумной организованности.

9. Предложено различать девять способов и условий адаптации комплекса:

- за счёт прочности связи элементов;
- за счёт быстроты его реакции;
- путём перемещения комплекса;
- благодаря неоднородности среды;
- благодаря временной изменчивости среды;
- путём адаптации по шаблону;
- благодаря высокой элементной плотности;
- благодаря стабильности внутренней среды;
- за счёт вынужденной специализации элементов.

10. Прочность внутренних связей у комплекса нижнего уровня обычно выше, чем то же у комплекса высокого уровня.

11. Адаптация представляет собой связную деформацию комплекса и происходит в три этапа, по мере роста интенсивности внешнего воздействия:

- начальный этап - стабильная адаптация;
- этап структурной адаптации;
- последний этап - катастрофическая адаптация.

12. В точке адаптации энтропия комплекса возрастает, а после адаптации снижается.

13. Вводятся понятия неравновесной и нестационарной энтропии для оценки степени упорядоченности неравновесных систем.

Глава 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДИКЕ АДАПТИВНОГО АНАЛИЗА

3.1. Особенности адаптивного анализа

Целью адаптивного анализа является прогнозирование и управление состоянием объекта, меняющегося под воздействием среды. Среда и объект анализируются одновременно.

Теоретической основой методики адаптивного анализа является разрабатываемая автором теория адаптации комплекса. Основа теории адаптации заключается в вынужденном приспособлении объекта к вещественно-энергетическому воздействию среды. В зависимости от интенсивности и градиента воздействия возможны три вида адаптации: стабильная, структурная и катастрофическая. При стабильной адаптации структурные связи комплекса сохраняются; при структурной адаптации связи частично разрушаются; при катастрофической адаптации комплекс разрушается, однако сохраняются его элементы.

Из теории адаптации неживых объектов следует:

1. Объект меняется под воздействием внешней среды, в зависимости от силы этого воздействия и от особенностей развития самого объекта. *Поэтому объект должен анализироваться вместе со средой.*

2. В ходе адаптации объект связно деформируется, а в точках структурной и катастрофической адаптации структура объекта меняется дискретным образом. *Необходимо выявлять эти характерные точки и прогнозировать в них существенное изменение свойств объекта. Связная деформация позволяет прогнозировать одни параметры объекта по известным другим его*

параметрам.

3. Величина комплекса, то есть целостно реагирующей части объекта, определяется природой и градиентом внешнего воздействия. В одном объекте могут взаимно перекрываться несколько комплексов. *При прогнозировании необходимо верно оценивать границы комплекса.*

4. Величина и элементная плотность комплекса взаимосвязаны. *Следовательно, по качественным параметрам объекта можно прогнозировать его размеры и наоборот.*

Исследование начинается с поиска главных управляющих параметров среды и самого объекта, и с определения характера их связи с состоянием объекта.

Анализ выполняется преимущественно графическим способом, с использованием фазовых диаграмм. В том числе разработанных нами фазовых портретов объекта и фазовых портретов развития по одному параметру [53].

Точкой практического приложения адаптивного анализа может стать любой изменяющийся комплекс: неживой природный объект, живой природный объект, социальный объект, производственный объект. Главным условием применения метода адаптивного анализа является возможность определения границ объекта, количественная оценка его параметров, выделение вещественно-энергетических потоков через объект и их оценка.

По мнению автора, возможности метода ограничиваются прогнозированием значений параметров объекта с определением лишь порядка их значений.

Ценным свойством адаптивного подхода является сти-

мулирование исследования объекта или явления в нетрадиционных направлениях. Это позволяет, как продемонстрировано на примере изучения геологических объектов, выявлять новые закономерности развития внешней среды и объекта.

3.2. Ход выполнения адаптивного анализа

3.2.1. Выделение объекта исследований

Адаптивный анализ можно использовать для исследования объекта или части объекта естественного или искусственного происхождения. Объект или часть объекта должны отвечать требованию, предъявляемому к комплексу. Это целостная реакция на внешнее воздействие, обусловленное устойчивым взаимодействием элементов комплекса.

Кроме того, должны существовать следующие возможности для исследователя:

- 1) идентификации комплекса для выделения его из внешней среды;
- 2) определения и количественной оценки вещественного, энергетического и информационного потоков, проходящих через комплекс или преобразуемых им;
- 3) формализации параметров комплекса и факторов среды, воздействующих на комплекс.

Таким образом, объект исследования должен обладать целостностью. Это свойство заключается в том, что на воздействие внешней среды реагирует основная часть объекта. В то же время не должна вовлекаться в ответную реакцию объекта внешняя среда. Это возможно при условии,

что информационный, вещественный и энергетический обмен (ИВЭ-обмен) внутри объекта, между его элементами, происходит с более высокой скоростью, чем ИВЭ-обмен между объектом и средой. Другими словами, изменение, происшедшее в одном из элементов комплекса, быстрее вызывает отклик в других элементах комплекса, чем во внешней среде.

В зависимости от характера воздействия среды, от формы изменения элемента комплекса, в ответную реакцию может вовлекаться разное количество элементов объекта. То есть, комплекс в пространстве вокруг некоторого центра размазан, и может иметь различные размеры в зависимости от типа воздействия. Размеры комплекса определяются градиентом воздействия среды во времени. При высоких градиентах комплекс локализуется в малой области из-за разрыва слабых связей по контуру области. В результате вместо комплекса большого размера появляются комплексы меньшего размера, практически не взаимодействующие между собой.

Пример I. Коллектив сотрудников организации является комплексом, поскольку ИВЭ-обмен внутри коллектива идёт с более высокой скоростью, чем между организацией с одной стороны и другими организациями или обществом с другой. В зависимости от интенсивности внешнего воздействия на какой-либо отдел организации, целостно на среду реагирует либо лишь отдел, либо реагирует совместно с другим отделам. То есть, событийный размер комплекса «размазан».

Если на организацию из среды подаётся разрушающая «энергетическая» нагрузка большой интенсивности, слабые связи внутри объекта начинают рваться. Происходит структурная адаптация организации. Разрушающая нагрузка может выступать в форме резкого снижения прибыли организации. При этом будет происходить сокращение числа сотрудников или отделов, либо добровольное, либо управляемое. Будут сохраняться наиболее сильные элементы и сильные связи внутри организации.

Если на организацию из среды будет подана пространственно локализованная разрушающая нагрузка, то разрушение тоже будет локализовано. Данное событие можно смоделировать самостоятельно.

Разрушающая нагрузка может быть также информационной природы. Например, прогнозируемая информация об ожидаемом кризисе в сбыте продукции и в доходах.

Может исследоваться не развивающийся объект, свойства которого сформировались ранее, а отображение комплекса. В этом случае невозможно непосредственное измерение интенсивности внешнего палеовоздействия палеосреды. Поэтому необходимо оценивать отображение палеовоздействия внутри отображения палеокомплекса или внутри отображения палеосреды. Иллюстрацией к сказанному является изучение закономерностей древнего осадконакопления (см.ч.2).

Пример 2. *Объектом исследования может быть ствол отмершего дерева большого возраста. При этом палеокомплексом является живое дерево. Информация об интенсивности воздействия внешней палеосреды заложена в*

толщине годовых колец ствола. Здесь могут изучаться:

а) закономерность изменения интенсивности воздействия внешней палеосреды путем составления по данному параметру фазового портрета развития объекта во времени;

б) закономерность изменения свойств комплекса в зависимости от интенсивности внешнего воздействия, путём составления фазовых портретов адаптации объекта по двум, смежным во времени значениям одного параметра объекта. В качестве третьего параметра, характеризующего объект, можно использовать либо химический состав древесины, либо другие показатели.

3.2.2. Оценка вещественного, энергетического и информационного потока сквозь комплекс

Основными требованиями к изучаемым информационным, вещественным и энергетическим потокам (ИВЭ-потокам) является их существенная роль в функционировании объекта. То есть они должны поставлять энергию и материалы для строительства комплекса, и нести информацию для его успешной адаптации.

При выборе изучаемого ИВЭ-потока исследователю необходимо заранее предвидеть, что его невозможно оценить с абсолютной достоверностью. Причиной этого является неоднородность среды, неодинаковость однотипных комплексов, неадекватная реакция комплекса на воздействие одинаковой силы. Кроме того, существуют неучтённые факторы, поэтому повышение точности оценки

одного из учитываемых факторов не повысит достоверность прогнозирования на величину, соответствующую дополнительным затратам.

Пример 3. Выбор и оценка ИВЭ-потоков для горного предприятия, добывающего полезное ископаемое. Функционирование горного предприятия определяется следующими потоками:

1) входные ИВЭ-потоки:

- а) материальное снабжение,*
- б) людские ресурсы,*
- в) планово-экономические показатели.*

2) выходные ИВЭ-потоки:

- а) материальные затраты,*
- б) травматизм,*
- в) добываемое полезное ископаемое.*

Оценка выходных ИВЭ-потоков:

- 1. Материальное снабжение, процент удовлетворения потребности вместе с необходимым резервом, качество поставляемого оборудования и материалов.*
- 2. Людские ресурсы - процент удовлетворения потребности, качественный состав работников, профессиональное качество, качество по целевым запросам работников.*
- 3. Планово-экономические показатели - отношение прибыли к затратам, какие директивы по использованию прибыли.*

Оценка выходных ИВЭ-потоков:

- 1. Материальные затраты - невозстанавливаемые потери*

оборудования и материалов; качественный состав теряемого оборудования.

2. Травматизм - невосстанавливаемые потери работников, качественный состав потерь.

3. Добываемое полезное ископаемое - количество и качество добытого сырья, спрос на сырье.

Это один из вариантов оценки входных и выходных ИВЭ-потоков. Однако возможно множество подобных вариантов.

Пример 4. *Выбор и оценка ИВЭ-потоков для государственного образования. Функционирование государства зависит от следующих ИВЭ-потоков:*

1) Входные ИВЭ-потоки:

а) технологический поток. Оценивается в процентах удовлетворения потребностей и необходимого резерва; а также качеством поставляемой технологии;

б) финансовый поток. Оценивается процентом удовлетворения капитальных вложений, а также качеством финансовых вложений;

в) людской поток - оценивается процентом удовлетворения потребности и качеством людских ресурсов;

г) поток продукции - оценивается процентом удовлетворения потребности в импортируемой продукции, а также качественным составом этой продукции;

д) дипломатический поток - оценивается способностью обеспечить нормальное функционирование внешних и внутренних связей комплекса;

е) информационный поток - оценивается процентом

удовлетворения потребностей в информации; а также качественным составом информации.

2) выходные ИВЭ-потоки. Оцениваются степенью полезности для государства.

- а) имидж государства;*
- б) поток продукции;*
- в) финансовый поток;*
- г) людской поток;*
- д) информационный поток;*
- е) дипломатический поток.*

3.2.3. Формализация параметров среды и комплекса

Формализуются ИВЭ-потоки и те параметры объекта, которые определяют его состояние существенным образом. К существенным параметрам объекта относятся такие параметры, которые являются внутренним фактором развития объекта или характеризуют его полезные или вредные свойства: морфологические и качественные. Характерными параметрами объекта могут быть элементы любого уровня комплекса.

Пример 5. *Формализация параметров города при составлении экологической модели «Здоровье».*

I. Входные ИВЭ-потоки:

- а) сырье для предприятий - тыс.т/(сутки · кв.км), состав по вредным соединениям;*
- б) продукты для питания - т/(сутки · человек), качественный состав по потребностям; заражённость продуктов отходами города;*

в) финансовый - руб/(человек · год), директивы по распределению, доля на социально - экологические проблемы;

г) людской поток - человек/год; состав возрастной, качественный, профессиональный;

д) лекарственно-профилактический - процент удовлетворения потребностей, с разделением по видам: лечение, профилактика, очищение организмов;

е) питьевая вода - процент удовлетворения потребности, процентное содержание вредных примесей;

ж) информационный - число сообщений в год, с оценкой полноты и достоверности данных по экологии и по здоровью.

2. Выходные ИВЭ-потоки:

а) продукция предприятий города - руб/(человек · год), с распределением по качеству (по потребностям государства);

б) финансовый - доход руб/(человек · год); руб/(кв. км. · год);

в) людской поток - число умерших ранее среднего возраста по стране, приходящихся на 10000 чел; процент текучести жителей города;

г) отходы города - тонн/(кв.км · человек · сутки); с распределением по биологической активности.

3. Внутренние параметры города:

а) воспроизводство населения - (число новорождённых)/10000 чел.), (число новорождённых)/(число беременных женщин); ((число детей 1 года)/(число новорождённых);

б) заболеваемость людей - (процент заболеваемости по городу) / (процент забол сти за рубежом);

в) социальные условия - (доход одного жителя города)/(доход одного жителя в Москве); (число нуждающихся в жилье на 1000 чел. по городу)/(число нуждающихся в жилье на 1000 чел. в Москве); (число отдыхающих летом за городом)/(общее число жителей города); (затраты в руб. /человек · год) на восстановление здоровья,

г) экологическая и медицинская грамотность населения: число сообщений на эту тему в радио, в печати по городу;

д) затраты на ликвидацию экологической опасности - (руб.)/(год на 1 т отходов);

е) затраты на восстановление здоровья - (руб.)/(год · человек);

ж) источники отходов по вредности (доход городу)/(опасность для человека).

Комплекс "город" в свою очередь состоит из комплексов нижнего уровня: предприятий.

3.2.4. Анализ адаптации объекта по фазовым диаграммам

Объект и среда обладают множеством параметров, часть которых используется в ходе исследования. Используемые параметры образуют подмножество. Координаты объекта в этом подмножестве отражают состояние объекта и создают фазовое пространство соответствующего комплекса.

Анализ поведения объекта удобнее выполнить в фазовых плоскостях, входящих в фазовое пространство. На

фазовой плоскости фазовая точка характеризуется третьим параметром, по которому создаётся рельеф. То есть, фазовая плоскость превращается в рельефную поверхность. Так, фазовый портрет $i-j-m$ означает, что фазовая точка на фазовой плоскости имеет координаты (i, j) . Рельеф фазовой поверхности строится по m -параметру из используемого подмножества.

Анализ выполняется в следующей последовательности:

1. Выявление состояний объекта с разной степенью адаптированности к информационно-вещественно-энергетическому потоку среды:

1.1. Объект характеризуется по множеству точек:

$\Xi_i(t_1) - \Xi_i(t_2)$, где Ξ_i - значения i -го параметра ИВЭ-потока для времени t_1, t_2 .

1.2. Объект характеризуется по одной точке:

$\Xi_i(t_j) - \Xi_i(t_{j+1})$, где Ξ_i - значения i -го параметра ИВЭ-потока для времени t_j, t_{j+1} , ($j = 1, 2, 3 \dots n$).

2. Определение характера изменений параметров объекта на участках стабильной, структурной и катастрофической адаптации:

2.1. $\Xi_i(t_1) - \Xi_i(t_3) - P_j(t_2)$, где Ξ_i - значение параметра ИВЭ потока для времени t_1, t_3 ; P_j - значение параметра объекта в момент времени t_2 .

2.2. $\Xi_i(t_j) - \Xi_i(t_{j+2}) - P_n(t_{j+1})$, где Ξ_i - значение параметра ИВЭ потока для времени t_j, t_{j+2} ; P_n - значение параметра объекта в момент времени t_{j+1} .

3. Определение характера внутренней эволюции комплекса (с расширением или с концентрацией):

3.1. Найти управляющий параметр ИВЭ-потока, влияющий на эволюцию:

$D - V - (\Xi_m = \text{const})$, где D -удельное содержание элементов комплекса; V -размеры комплекса, Ξ_m -значение параметра ИВЭ-потока.

3.2. Роль ИВЭ-потока в эволюции объекта.

$D(t_2) - V(t_2) - \Xi_m(t_1)$, где D -удельное содержание элементов комплекса времени t_2 ; Ξ_m - значение m -параметра ИВЭ-потока в момент времени t_1 .

4. *Определение параметров среды, управляющих развитием объекта.*

4.1. $P_i - P_j$, где P_i - i -ый параметр среды; P_j - j -ый параметр объекта;

4.2. Роль ИВЭ-потока в воздействии управляющего параметра среды.

$P_i - P_j - \Xi_m$, где P_i -параметр среды; P_j - параметр объекта; Ξ_m -параметр ИВЭ-потока.

5. *Определение взаимосвязи между параметрами объекта:*

5.1. $P_i - P_j$, где P - параметр объекта;

5.2. Роль ИВЭ-потока в воздействии управляющего параметра объекта.

$P_i - P_j - \Xi_m$, где P - параметр объекта; Ξ_m -параметр ИВЭ-потока.

В ходе анализа по каждому пункту необходимо использовать принцип редукции. То есть на 1-ой фазовой плоскости выделять кластеры 1-го уровня. Затем на 2-й

фазовой плоскости такого же типа выделять кластеры 2-го уровня внутри отдельных кластеров 1-го уровня и т.д.

3.2.5. Интерпретация результатов анализа

На фазовой плоскости $\mathcal{E}_i(t_1) - \mathcal{E}_i(t_2)$ поле существования (ПС) комплекса может быть 2-х, принципиально различных типов. Если ёмкость комплекса не ограничена по суммарному воздействию ИВЭ-потока, то поле существования занимает всю фазовую плоскость (рис. 3.2). Если же существует ограничение по ёмкости комплекса, то ПС занимает половину фазовой плоскости (рис. 3.1). Причина ограничения по ёмкости в том, что приращение ёмкости (e) имеет постоянную величину, а поступление ИВЭ-потока непостоянно во времени, поэтому ИВЭ-наполнение комплекса в какой то момент времени превышает ёмкость комплекса и комплекс переходит в принципиально новое состояние: в субзакрытое состояние, когда ИВЭ-поток почти не проходит через комплекс, или проходит по центральному каналу, не теряясь в самом комплексе. То есть в субзакрытом состоянии комплекс не наполняется ИВЭ-продуктом. Поэтому:

$$\sum_{t=1}^2 e(t) = \sum_{t=1}^2 \mathcal{E}_i(t) = \text{const.} \quad (3.1)$$

где $e(t)$ -ёмкость комплекса в единицу времени по ИВЭ-продукту;

\mathcal{E}_i - ИВЭ-продукт, накапливаемый в комплексе; ИВЭ-информационно-вещественно-энергетическое воздействие среды на комплекс.

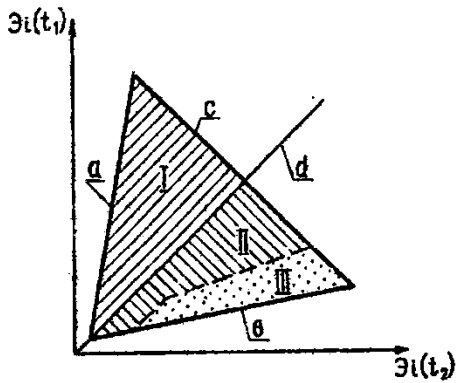


Рис.3.1. Комплекс с ограничением по ИВЭ-потоку. Области существования:
 I - стабильной адаптации;
 II- структурной адаптации;
 III-катастрофической адаптации.
 Граничные линии: унаследование:
 a - по \mathcal{E}_{\min} ; б-по \mathcal{E}_{\max} ;
 с-линия ограничения ИВЭ-потока $[\mathcal{E}_i(t_1) + \mathcal{E}_i(t_2)] \approx const$;
 d-линия постоянного ИВЭ-потока

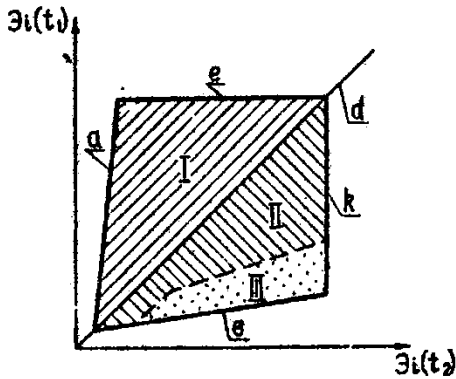


Рис.3.2. Комплекс не ограничен по ИВЭ-потоку. Граничные линии: e - $\mathcal{E}_i(t_1)_{\max}$;
 k - $\mathcal{E}_i(t_2)_{\max}$

Поле существования ограничено линиями a , b , c (см. рис. 3.1).

Линия " a " показывает унаследованность ИВЭ-потока по наименьшим значениям $\Xi_i(t_2)$; линия " b " - то же по наибольшим значениям $\Xi_i(t_2)$. Линия " c " - характеризует ограничение ёмкости комплекса по ИВЭ-продукту. Линия " d " - это линия равных значений ИВЭ-потока для времени t_1 и t_2 . Она ограничивает снизу область стабильной адаптации (I). Если ИВЭ-поток возрастает $\Xi_i(t_2) > \Xi_i(t_1)$, то наступает структурная адаптация (область II), характеризуемая вынужденной перестройкой внутренних связей комплекса. При очень быстром увеличении ИВЭ-потока: $\Xi_i(t_2) \gg \Xi_i(t_1)$ начинается катастрофическая адаптация (область III), когда комплекс разрушается. Однако при этом элементы комплекса сохраняют свою цельность.

Если прирост ёмкости комплекса (e) намного превышает приращение ИВЭ-продукта, то появляются линии " e " и " k ". Они ограничивают по $\Xi_i(t_1)_{\max}$ (линия e) и по $\Xi_i(t_2)_{\max}$ (линия k).

Фазовые портреты адаптации некоторых реальных объектов приведены на рис. 3.3. Это стабильная адаптация с ограничением по ёмкости комплекса для ИВЭ-продукта (рис. 3.3, a); стабильная и структурная адаптация с наличием унаследованного канала для ИВЭ-потока (рис. 3.3, b ; область " V "); стабильная и катастрофическая адаптация (рис. 3.3, z).

На фазовых портретах существуют более вероятные

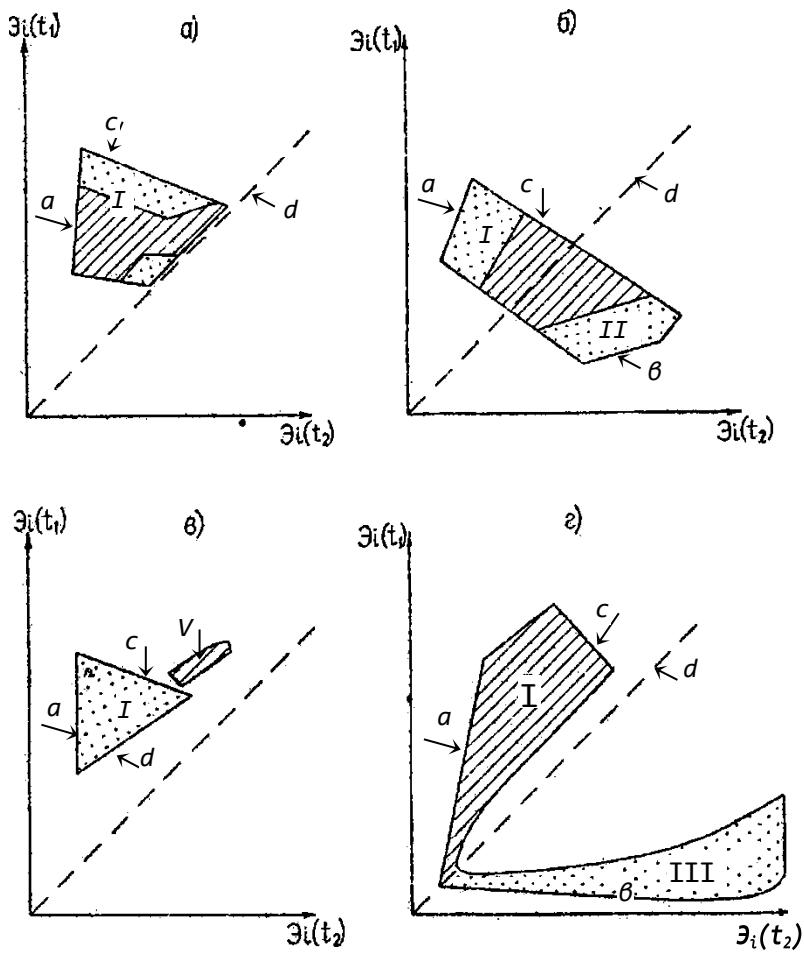


Рис.3.3 Реальные комплексы: а-стабильная адаптация с ограничением по ИВЭ-потоку; б-стабильная и структурная адаптация с ограничением по ИВЭ-потоку; в-стабильная адаптация с постоянным ИВЭ-потоком; г-со стабильной (I) и с катастрофической (III) адаптацией. Точками покрыты более вероятные состояния комплекса; штриховкой покрыты менее вероятные состояния комплекса.

состояния комплекса и менее вероятные состояния.

На фазовой плоскости $\Xi_i(t_1) - \Xi_i(t_3)$ параметр объекта $P_j(t_2)$ может меняться либо постепенно, либо скачком. Рассмотрим 3 основных варианта постепенного изменения $P_j(t_2)$. На рис.3.4, где показан фазовый портрет адаптации комплекса, изменения параметра объекта характеризуются градиентом ∇P_j .

В первом варианте значение параметра объекта определяется предшествующим ИВЭ-поток: с увеличением значения $\Xi_i(t_1)$ величина параметра уменьшается. Во втором варианте от параметра объекта зависит величина ИВЭ-потока последующего времени. В остальных вариантах существует общая связь всех трёх параметров $\Xi_i(t_1)$, $\Xi_i(t_3)$, $P_j(t_2)$.

В третьем варианте увеличение параметра объекта сопровождается ростом изменчивости ИВЭ-потока:

$$P_j(t_2) = \frac{\Xi_i(t_3) - \Xi_i(t_2)}{t_3 - t_2}$$

Это, с одной стороны, означает, что снижение ИВЭ-потока предшествующего этапа приводит к увеличению параметра объекта. С другой стороны, рост параметра объекта сопровождается усилением ИВЭ-потока последующего этапа. Поскольку в направлении градиента $\nabla P_j(t_2)$ происходит переход стабильная-структурная-катастрофическая адаптация, то несомненно, что рост $P_j(t_2)$ снижает прочность старых связей внутри объекта.

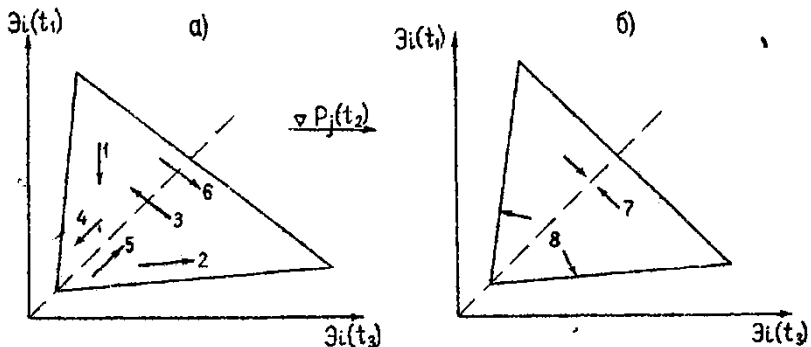


Рис. 3.4. Связь состояний объекта с вектором градиента его параметров ∇P : 1 - ИВЭ-поток уменьшает P_j ; 2 - P_j увеличивает ИВЭ-поток; 3 - рост P_j сопровождается увеличением устойчивости старых связей объекта; 4 - снижение P_j , приводит к росту ёмкости комплекса по ИВЭ продукту; 5 - ёмкость комплекса возрастает с увеличением P_j ; 6 - рост P_j ослабляет жёсткость структуры комплекса; 7 - устойчивость основных каналов ИВЭ-потока увеличивается с ростом P_j ; 8 - увеличение P_j сопровождается усилением унаследованности ИВЭ-потока по наименьшим и наибольшим значениям.

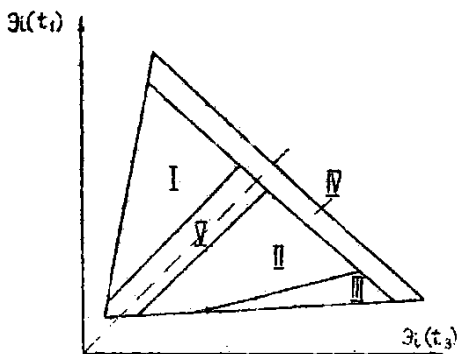


Рис. 3.5. Состояния объекта на фазовой плоскости ИВЭ-потока:
 I-стабильная адаптация;
 II-структурная адаптация;
 III-катастрофическая адаптация;
 IV-область наибольшей ёмкости по ИВЭ-продукту;
 V-область постоянной ИВЭ-проводимости.

В четвёртом варианте уменьшение значения параметра объекта сопровождается снижением ёмкости комплекса по ИВЭ-продукту.

В пятом варианте, наоборот, ёмкость комплекса по ИВЭ-продукту увеличивается с ростом значения параметра объекта. В шестом варианте рост значения параметра объекта контролирует увеличение стабильности старой структуры комплекса.

Варианты 7 и 8 являются более сложными по изменению параметра объекта. В седьмом варианте увеличение P_j сопровождается ростом устойчивости основных связей комплекса, транспортирующих ИВЭ-поток с постоянной интенсивностью (рис. 3.4).

В восьмом варианте существует прямая связь между значением параметра P_j и унаследованностью интенсивности ИВЭ-потока по наименьшим и наибольшим значениям $\mathcal{E}_i(t_3)$. Скачкообразное изменение параметра P_j может быть связано с различным состоянием комплекса (рис, 3.5):

- а) стабильной адаптации (область I);
- б) структурной адаптации (область II);
- в) катастрофической адаптации (область III);
- г) предельной ёмкости по ИВЭ-продукту (область IV);
- д) постоянной проводимости ИВЭ-потока (область V).

Поэтому аномально высокие или аномально низкие значения параметра P_j могут располагаться внутри указанных областей. Это будет означать, что параметр P_j контролируется параметром $\mathcal{E}_i(t_1)$ и в свою очередь определяет значение $\mathcal{E}_i(t_3)$. То есть, аномальное значение

по P_j определяет то или иное состояние комплекса, или же в той или иной степени управляет состоянием комплекса.

На диаграмме D-V (удельное содержание элементов комплекса - размеры комплекса) поле существования комплекса обычно размыто. То есть, отсутствует чёткая корреляция между этими параметрами комплекса. Это обусловлено тем, что на их взаимосвязь действуют и другие факторы. Поэтому необходимо анализировать граничные линии поля разрешённых состояний.

Граничные линии по предельным размерам комплекса показывают его состояния в наиболее благоприятных для роста условиях. То есть соотношение между размером и удельным содержанием элементов. Линия "а" ограничивает подмножество комплексов, развивающихся с расширением (рис.3.6, а). Линия "б" ограничивает подмножество комплексов, развивающихся со сжатием. Эти подмножества на диаграмме могут занимать отдельные области (рис. 3.6, б). Или же могут выделяться в виде кластера внутри поля существования всего множества комплексов.

Образование и успешное развитие комплекса происходит при выполнении пространственно-векторных ИВЭ-условий (информационно-вещественно-энергетических условий). Поэтому V-D взаимосвязь объясняется следующим.

Прямая зависимость между удельным содержанием элементов и размером комплекса означает, что, при благоприятных условиях, увеличение числа элементов в единице объёма комплекса вызывает рост комплекса. То есть величина D может расти. Но это, с некоторым запаз-

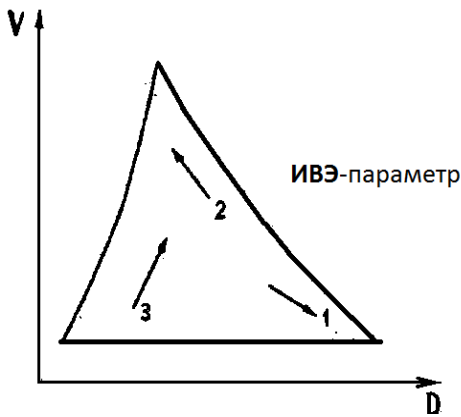
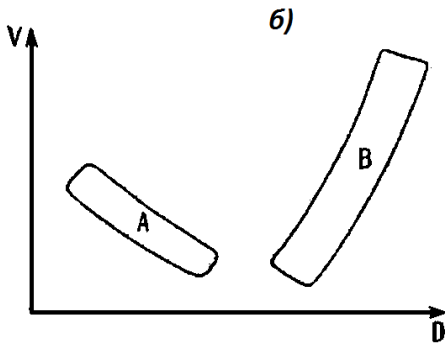
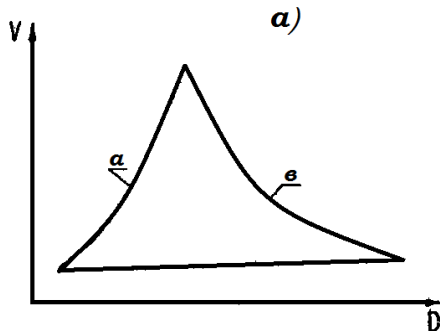


Рис. 3.6. Взаимосвязь между удельным содержанием элементов в комплексе (D) и размером комплекса (V): **а**-границные линии поля существования комплекса: линия **а**-развитие со сжатием, линия **б**-развитие комплекса с расширением; **б**-поля существования двух подмножеств комплексов: **А**-развивающихся со сжатием, **В**-развивающихся с расширением.

Рис. 3.7. Изменение комплекса под влиянием ИВЭ-потока: 1-комплекс сжимается; 2-комплекс расширяется, дефицит элементов; 3-комплекс расширяется, содержание элементов возрастает.

дыванием будет увеличивать объём комплекса.

Обратная зависимость между V и D указывает на существование сил, стягивающих элементы к центру комплекса. Сжатие происходит либо в процессе возникновения комплекса, либо при его изменении.

Для выяснения роли ИВЭ–потока в развитии комплекса, на V - D диаграмме каждую фазовую точку охарактеризуем значением параметра, указывающего воздействие внешней среды. То есть на фазовой плоскости построим рельеф состояния комплекса.

Возможны различные изменения градиенты ИВЭ–параметра (рис.3.7). В первом варианте размеры комплекса уменьшаются, содержание элементов возрастает. Увеличение содержания элементов может быть вызвано либо просто их стягиванием к центру комплекса, либо одновременным образованием новых элементов.

Во втором варианте комплекс расширяется. Новые элементы либо не возникают, либо рост объёма комплекса опережает увеличение числа элементов. В третьем варианте рост объёма комплекса сопровождается резким увеличением числа элементов.

Поиск взаимосвязи между параметрами среды и параметрами объекта, между двумя параметрами объекта производится на обычных диаграммах. То есть рассматривается состояние объекта на фазовой плоскости. Поиск взаимозависимых параметров ведётся простым перебором пар параметров, для которых выясняется степень взаимосвязи.

Связь может выражаться в виде корреляционной зависимости. Это наиболее простой случай для анализа. При более сложной зависимости фазовые точки образуют поле существования. В таких ситуациях необходимо:

а) выделить подмножества из множества состояний комплекса по одному или нескольким параметрам;

б) каждое подмножество анализировать на отдельной диаграмме;

в) на этой фазовой диаграмме фазовые точки характеризовать ИВЭ-параметром.

Поскольку ИВЭ-параметр фазовой точки находим как суммарное воздействие ИВЭ-потока, то направление градиента ИВЭ-параметра соответствует переходу от состояний комплекса более молодого возраста к более старым состояниям. Это в том случае, если отсчёт времени ведётся в условной системе: в единицах ИВЭ-продукта. С такой системой отсчёта времени следует согласиться, поскольку в условиях отсутствия ИВЭ-потока комплекс не развивается. И, следовательно, собственное время комплекса замедлено.

Фазовая диаграмма, где рельефно представлен ИВЭ-параметр, позволяет выяснить форму зависимости между двумя изучаемыми параметрами в связи с развитием комплекса. Если из рассматриваемого подмножества выделить подмножество с одинаковыми значениями данного ИВЭ-параметра, то внутри него зависимость между параметрами будет близка к корреляционной с большим коэффициентом корреляции.

3.3. Основные выводы по главе "Общие сведения о методике адаптивного анализа"

Анализ, основанный на идеологии адаптации, состоит из последовательных действий, отвечающих определённым требованиям:

1. Выделение объекта исследования. Объект должен обладать целостностью. Внутри объекта скорость обмена между его частями должна быть выше, чем между объектом и средой.

2. Оценка потоков из среды. Потоки должны играть существенную роль в развитии объекта. Выделяются входящие и выходящие потоки.

3. Формализация параметров среды комплекса. Те параметры среды, которые подозреваются в качестве управляющих параметров, должны оцениваться количественно. Можно качественную оценку перевести в количественную запись.

4. Анализ состояния объекта в фазовых пространствах. Объект анализируется в фазовых плоскостях, образующих фазовое пространство. Фазовая точка характеризуется значениями некоторого параметра объекта. Затем строится рельеф данного параметра на фазовой плоскости.

5. Анализ на фазовых плоскостях выполняется в следующей последовательности:

-выявляют кластеры для различной адаптированности объекта;

-изучают характер изменения объекта при различной адаптированности;

-определяют вид внутренней эволюции объекта (с расши-

рением или со сжатием);

- выявляют параметры среды, управляющие развитием объекта;

- выявляют параметры объекта, управляющие его развитием;

- определяют взаимосвязь между параметрами объекта .

6. Интерпретация результатов анализа. Делается генетическая интерпретация фазовых портретов и оценивается способность объекта к взаимодействию с потоками из среды .

Часть 2. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Глава 4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АДАПТИВНОМ АНАЛИЗЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

4.1. Цель исследований

При выполнении исследований угленосных отложений ставилось несколько целевых задач:

1. Узнать, происходила ли адаптация палеообъектов при формировании отложений угленосной толщи. А именно элементов ландшафта эпохи торфообразования к воздействию водной среды, наносов, палеотектоники, палеоклимата, биоценозов и подстилающей толщи.

2. Выявить новые взаимосвязи между параметрами угленосной толщи и угольного пласта для повышения достоверности прогнозирования качества, мощности и морфологии пласта.

3. Установить, выполняется ли закон теории адаптации о взаимосвязи размера и качества комплекса. То есть, существует ли взаимосвязь между площадью распространения и мощностью угольного пласта; между площадью угольного бассейна и коэффициентом угленосности по бассейну.

4.2. Используемая информация

Данная часть исследований базируется на информации, собранной автором в результате работы шахтным геологом в Восточном Донбассе в период с 1968 по 1982 год, и доцентом Сибирского металлургического института в Кузбассе в 1984–92

годах. На шахтах Кузбасса выполнялись договорные работы по прогнозированию геологических нарушений угольных пластов.

За это время лично автором задокументировано около 100 000 метров обнажений каменноугольной толщи, изучено 2000 шлифов и аншлифов угля и пород, составлено более 100 геолого-генетических и прогнозных карт для угольных шахт.

Была формализована и проанализирована информация о гранулометрических ритмах с общей мощностью 105 000 метров отложений карбона и перми.

По заказам 9 шахт изготовлена компьютерная программа GeoMaster, служащая для хранения данных, построения разрезов и расчёта прогнозных карт. Программа GeoMaster была написана программистами из Новосибирского Государственного Университета под руководством В.Гумирова. Алгоритмы программы основаны на результатах исследований автора по адаптивному анализу угленосной толщи.

Для обработки данных по угольным пластам и угленосной толще применялись фазовые диаграммы (см.п.1). Строились фазовые портреты адаптации объекта (ландшафта) к воздействию водной среды и приносимых наносов. А также создавались фазовые портреты развития объекта во времени.

Для анализа, кроме того, использовалась информация о 154 угольных бассейнах и угленосных районах СССР и зарубежных, стран из работ К.В.Миронова [138] и А.К.Матвеева [1989 г.]. Изучались геологоразведочные данные по угольным пластам Донецкого и Кузнецкого бассейнов.

В ходе анализа информации по угольным бассейнам строились диаграммы: площадь бассейна-коэффициент угленосности.

На диаграмме рассматривался третий параметр бассейна. То есть изучались фазовые портреты угольных бассейнов.

4.3. Методика анализа

В процессе подготовки и в ходе анализа сделана логическая увязка терминов теории адаптации с терминами угольной геологии (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Связь терминов теории адаптации и угольной геологии

теории адаптации	бассейна седиментации	литологической колонки
1. Комплекс (К)	Фациальная обстановка	Гранулометрический ритм (Г.Р.)
2. Энергия и вещество	Скорость водотоков и наносы	Динамичность осадконакопления для Г.Р.
3. Структура К	Рельеф (морфоструктура)	Удельная динамичность осадконакопления (У.Д.О.)
4. Стабильная адаптация К	Перенос наносов без изменения старой морфоструктуры	Унаследованность У.Д.О. в смежных ритмах
5. Структурная адаптация К	Преобразование морфоструктуры из-за роста скорости течения	Резкий рост У.Д.О. в верхнем ритме сравнительно с подстилающим
6. Катастрофическая адаптация К	Разрушение старой морфоструктуры	то же

В приводимой таблице наибольшее число вопросов вызовет соотнесение комплекса фациальной обстановке и гранулометрическому ритму. Причина этого в следующем:

1. В момент осадконакопления поверхность сменяющихся по латерали слоёв образует рельеф ландшафта. В палеоландшафтном аспекте сами эти слои представляют собой интег-

рированнов отображение множества синхронных палеорельефов, сменяющих друг друга во времени.

2. В фациальном аспекте синхронные слои соответствуют фациальной обстановке. То есть в палеоландшафтном аспекте фациальная обстановка соответствует множеству отображений сменившихся синхронных палеорельефов.

3. Синхронный палеорельеф является связным объектом в пределах изучаемой площади и соответствует понятию комплекс.

4. То есть каждый элемент фациальной обстановки и гранулометрического ритма соответствуют комплексу. А сама фациальная обстановка и гранулометрический ритм соответствуют развивающемуся комплексу.

В качестве комплекса был выбран гранулометрический ритм, отражающий фациальную обстановку и ограниченный реперными горизонтами: угольным пластом или слоем известняка. Использовались геологические материалы буровой и эксплуатационной разведки Восточного Донбасса и Кузбасса.

Мы понимаем, что исследуется не функционирующий комплекс, а его отражение, запечатлённое в осадочной толще. Именно поэтому перед нами не стояла задача анализа всех параметров объекта.

Изучалось изменение энерго- и массопроводимости для объекта - меняющегося палеоландшафта - в соответствии с поставленной целью. При этом мы исходили из следующих положений:

- 1) рельеф бассейна седиментации и энергия водной

среды определённым образом взаимосвязаны [Молдованов А.М., 1978];

2) гранулометрический ритм начинает формироваться на рельефе, оставшемся от предыдущего ритма [54].

Согласно теории адаптации, старая морфоструктура должна разрушаться на тех участках, где энергия нового ритма гораздо выше энергии старого ритма.

В оценке энергии водной палеосреды мы исходили из понятия "динамичность осадконакопления", которое было введено А.Г.Кобилевым и использовалось исследователями Новочеркасской школы угольщиков - В.С.Лазаревым, М.М.Лосем, М.С.Ковальской и др. "Это понятие отражает сумму кинетической энергии, затраченной на образование слоя или комплекса слоёв" [А.Г.Кобилев, М.М.Лось. Методика литолого-фациального прогноза условий разработки угольных пластов.-М.: Недра, 1976. -120 с.].

Однако, при расчёте динамичности осадконакопления, мы использовали более реальные отношения энергии водной среды, где отлагались глина, алеврит и песок - 1:10:100, в то время как авторы данного понятия применяли - 1:2:4.

Динамичность осадконакопления (Д) рассчитывалась исходя из того, что гидравлическая крупность, как и скорость осаждения, для глинистых, алевритовых и песчаных частиц соотносятся как 1:10:100 [Кюнён Ф.,1969]:

$$D = M_{г} + 5 \times M_{ар} + 10 \times M_{а} + 100 \times M_{п}, \quad (4.1)$$

где $M_{г}$, $M_{ар}$, $M_{а}$, $M_{п}$ - суммарные мощности в ритме для слоёв соответственно аргиллита, алевритистого аргил-

лита, алевролита и песчаника.

Для сопоставления динамичности осадконакопления ритмов разной мощности нами было введено новое понятие - удельная динамичность осадконакопления (Y):

$$Y = D / M_{\text{ис}} \quad (4.2)$$

где $M_{\text{ис}}$ - исходная мощность ритма в стадию диагенеза,

$$M_{\text{ис}} = 3 \times M_{\text{г}} + 2,5 \times M_{\text{аг}} + 1,9 \times M_{\text{а}} + 1,4 \times M_{\text{п}}. \quad (4.3)$$

где 3; 2,5; 1,9; 1,4 - коэффициенты уплотнения соответственно глины, алевролитистой глины, алевролита и песка [Зарицкий Н.В., 1966].

Для сравнения энергии формирования двух ритмов, смежных во времени, т.е. подстилающего и перекрывающего ритмов, использовалось понятие гидродинамической изменчивости (I):

$$I = Y_{\text{в}} / Y_{\text{н}} \quad (4.4)$$

где $Y_{\text{в}}$ - удельная динамичность осадконакопления верхнего, перекрывающего ритма;

$Y_{\text{н}}$ - то же для нижнего, подстилающего ритма.

4.4. Методика построения фазовых диаграмм

Для выяснения закономерностей временной изменчивости фациальной обстановки строились фазовые портреты развития объекта во времени (ПАВ). Пространственная изменчивость фациальной обстановки изучалась на фазовых портретах адаптации (ФПА).

Фазовый портрет развития объекта во времени строился следующим образом. По горизонтальной оси диаграммы откладывалось значение $Y_{\text{в}}$, а по вертикальной

оси - V_n . Точка на диаграмме показывает величину и соотношение удельной динамичности осадконакопления двух смежных ритмов.

На литологической колонке скважины последовательно снизу вверх выделялись пары ритмов. Верхний ритм предыдущей пары рассматривался в качестве нижнего ритма последующей пары:

$$V_{n(i+1)} = V_{v_i}, \quad (4.5)$$

где i - номера пар ритмов, снизу-вверх.

Фазовый портрет адаптации угольного пласта строился на диаграмме, где по горизонтальной оси откладывались значения V_v , вычисленные по ритму кровли, а по вертикальной оси - значения V_n для почвы пласта.

Формализованная геологическая информация анализировалась в следующем порядке:

1. По 230 ритмам выяснялись общие закономерности осадконакопления для 6 свит верхнего карбона.

2. По 92 ритмам изучалось суммарное влияние V_v и V_n на структурно-текстурные показатели отложений перекрывающего ритма, на строение и мощность угольного пласта, расположенного между ритмами.

3. По 945 ритмам, отдельно для 9 угольных пластов, рассматривалась адаптация торфяника: изменение строения, мощности и зольности в связи с различным соотношением удельной динамичности осадконакопления перекрывающего и подстилающего ритмов.

4. По 58 ритмам изучалось влияние V_n на V_v ритма регрессивного вида.

4.5. Основные выводы по главе "Общие сведения об адаптивном анализе угольных месторождений"

1. Существуют следующие особенности адаптивного анализа угольных месторождений:

а) среда изучается по ее отражению, запечатлённому в отложениях кровли и почвы угольного пласта;

б) энергетическое воздействие среды оценивается удельной динамичностью осадконакопления гранулометрического ритма, что тождественно усреднённой скорости водного потока в бассейне, где осаждались слои ритма.

в) связь торфяного пласта с энергетическим воздействием среды исследуется в фазовом пространстве удельной динамичности осадконакопления подстилающего и перекрывающего пласт ритмов;

2. Впервые вводятся такие понятия, как удельная динамичность осадконакопления (V) и гидродинамическая изменчивость (H).

Глава 5. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

5.1. Общие закономерности адаптации фациальной обстановки

Любая точка на ПАВ характеризует гидроэнергетическое состояние пары смежных во времени ритмов. Поэтому, говоря пара ритмов, мы будем иметь ввиду точку на диаграмме $V_{\text{в}} - V_{\text{н}}$.

Все пары ритмов 6 свит образуют поле разрешённых гидродинамических состояний (поле РС) с вероятностью 0,96. Это поле ограничено линиями (рис. 5.1):

$$0 \leq (V_{\text{в}}, V_{\text{н}}) \leq 71$$

$$V_{\text{в}} = 76 - 0,92 \times V_{\text{н}}, \text{ (линия С)}$$

$$V_{\text{в}} = 0,1 \times V_{\text{в}} - 3, \text{ (линия а)}$$

$$V_{\text{в}} = 20 + 20 \times V_{\text{н}}. \text{ (линия б)}$$

Была предложена следующая геолого-генетическая интерпретация этого явления.

Линия *а* - связана с унаследованностью гидродинамической активности: $V_{\text{в}} = f(V_{\text{н}})$, при $I < 1$.

Линия *б* - связана с унаследованностью гидродинамической активности при $I > 1$.

Линия *С* - результат миграции наносонесущих артерий.

По генезису верхнего ритма все пары ритмов были разделены на следующие виды:

- 1) регрессивный,
- 2) трансгрессивный,
- 3) трансгрессивно-регрессивный.

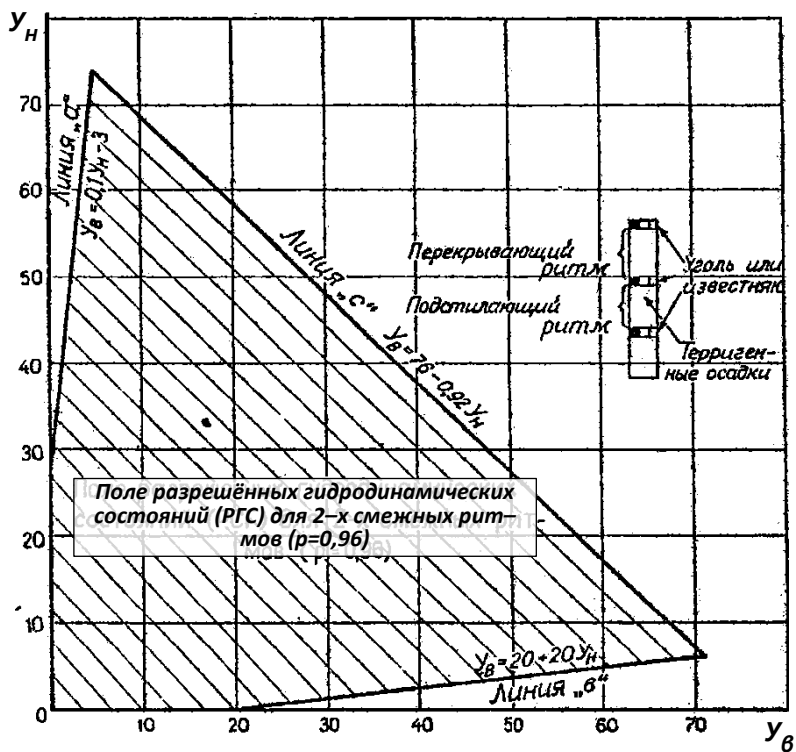


Рис.5.1. Фазовый портрет развития фациальной обстановки во времени. Удельная динамичность осадконакопления: u_b -перекрывающего, u_n -подстилающего ритмов.

5.2. Адаптация фациальной обстановки регрессивного типа

Регрессивные пары образуют три поля РГС: А, В, С (рис. 5.2). Поле А указывает на прямую зависимость удельной динамичности осадконакопления верхнего ритма от удельной динамичности осадконакопления нижнего ритма при $Y_{\text{н}} \geq Y_{\text{в}}$. Вероятно, это связано с унаследованностью $Y_{\text{в}}$ от $Y_{\text{н}}$ при формировании последовательных во времени ритмов. Унаследованность объясняется устойчивостью морфоструктуры объекта при малой изменчивости воздействия среды, т.е. при $I < 1$.

Поле В возникает тогда, когда унаследованное значение $Y_{\text{в}}$ больше $Y_{\text{н}}$ для некоторых пар ритмов из поля А. То есть, когда гидроэнергетическое воздействие среды возрастает в новом ритме по сравнению со старым. При этом пара с вероятностью 0,5 перемещается из поля А в поле В. Следовательно поле В – это результат структурной адаптации комплекса.

Поле С образуется, если наследованное значение $Y_{\text{в}} > Y_{\text{н}}$ для основной части ритмов из поля А. Пара перемещается из поля А в поле С – с вероятностью 0,75. Поле С является результатом структурно-катастрофической адаптации комплекса.

В палеоландшафтном аспекте поля В и С отвечают мигрирующим дельтовым протокам; поле А механической пойме.

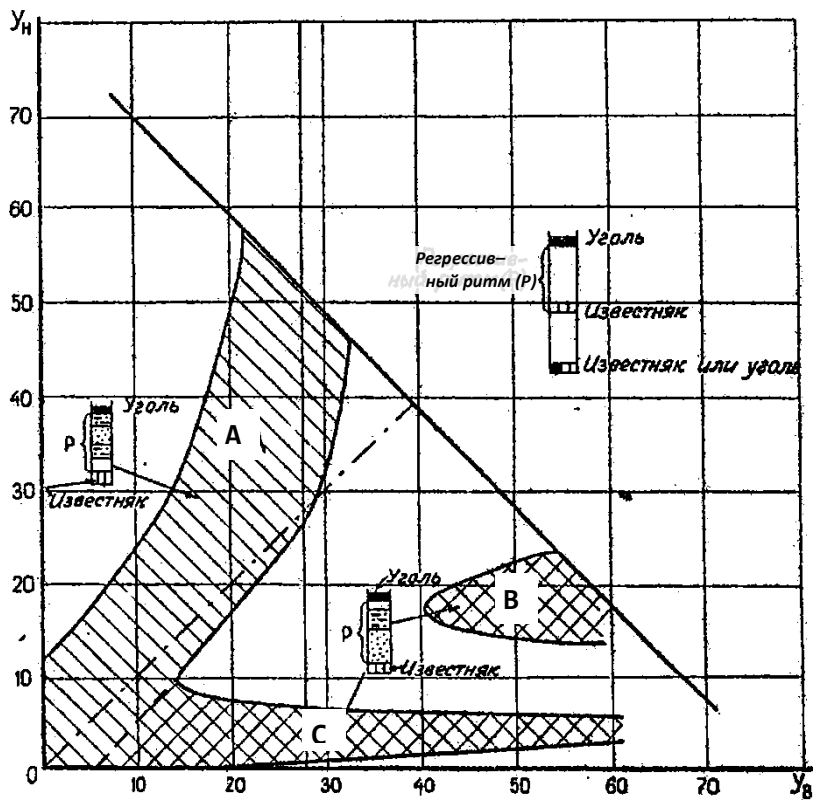


Рис.5.2. Фазовый портрет развития регрессивного ритма .

5.3. Адаптация фациальной обстановки трансгрессивного типа

Пары с ритмом трансгрессивного вида образуют два поля (рис. 5.3). Поле D указывает на прямую зависимость $V_{\text{в}}$ от $V_{\text{н}}$ при $V_{\text{в}} < V_{\text{н}}$. Когда в поле D унаследованная величина гидроэнергетического воздействия начинает превышать его значение для нижнего ритма ($V_{\text{в}} > V_{\text{н}}$), то происходит структурная адаптация объекта и пары смещаются в поле E. Вероятность такого события 0,75.

Очевидно, что поле E соответствует переместившимся на пойму аллювиально-дельтовым протокам. Поле D образуют те пары, верхний ритм которых соответствует отложениям поймы и механической поймы.

5.4. Адаптация фациальной обстановки трансгрессивно-регрессивного типа

Пары с ритмом трансгрессивно-регрессивного вида заполняют все поля РГС (см. рис. 5.1). Для таких пар анализировалось влияние $V_{\text{в}}$ и $V_{\text{н}}$ на мощность угольного пласта, разделяющего нижний и верхний ритмы. Из рисунка 5.4 видно, что вероятность встречи угольных пластов рабочей мощности возрастает в направлении снижения $V_{\text{н}}$ при одновременном увеличении $V_{\text{в}}$. То есть, чем меньше гидродинамическая активность ритма почвы, тем выше вероятность возникновения мощного угольного пласта, а также выше вероятность большей гидродинамической активности ритма кровли.

Это объясняется следующим. Над ритмом с низкой

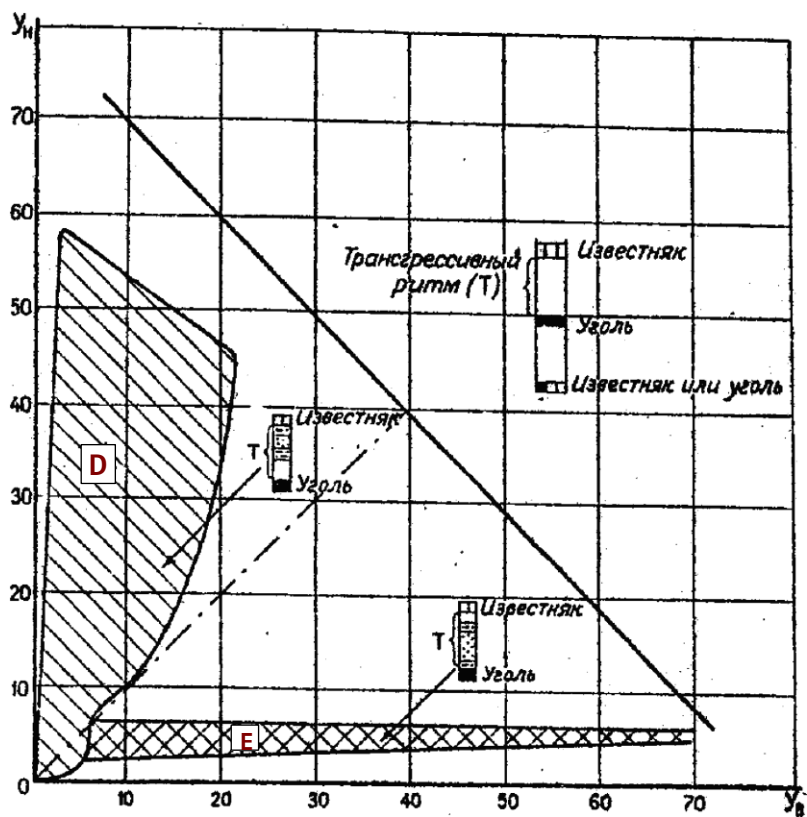


Рис. 5.3. Фазовый портрет развития трансгрессивного ритма.

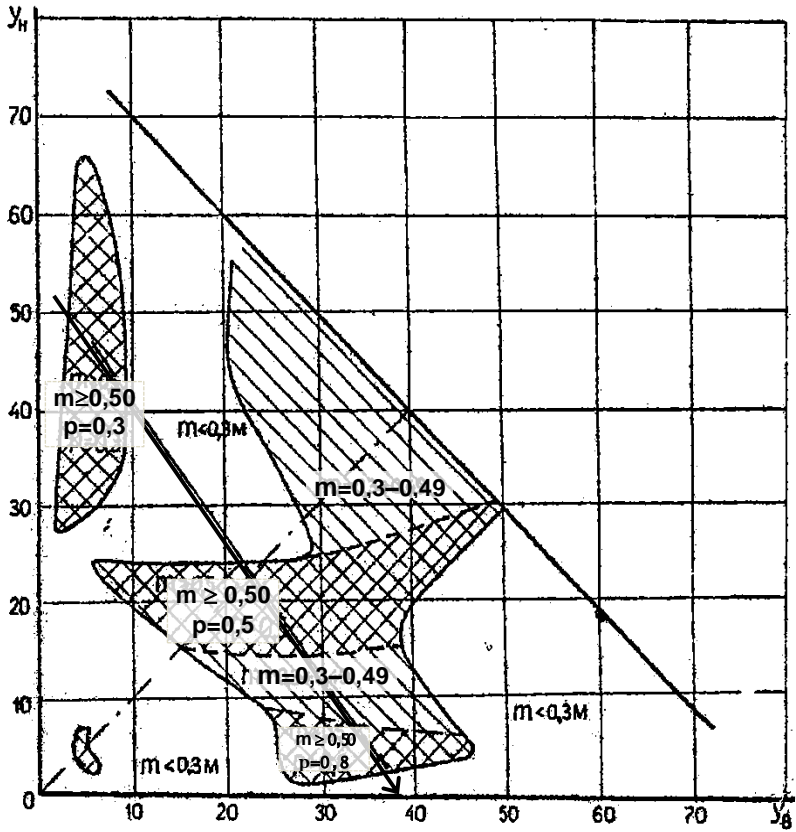


Рис. 5.4. Фазовый портрет развития ритма трансгрессивно-регрессивного вида; m - мощность угольного пласта, разделяющего верхний и нижний ритмы; p - вероятность встречи угольного пласта с указанной мощностью.

энергией формирования осадков раньше прекращали деятельность внутриболотные водотоки. Поэтому здесь раньше начиналось торфонакопление. А мощность торфяника была выше, чем на соседних участках.

При захоронении торфяника более быстрые водотоки проникали на участки с большей мощностью торфяной залежи. Это следствие интенсивного уплотнения более мощного торфяника [55].

Отсутствие на диаграмме чётких признаков структурной адаптации указывает на нарушение унаследованности динамичности осадконакопления в смежных ритмах. Причиной этого является уменьшение высотной контрастности морфоструктуры подстилающего ритма в результате его выравнивания перекрывающим торфяником. Обращает внимание отсутствие угольных пластов с мощностью более 0,5 м для пар ритмов, когда один из них имеет высокую удельную динамичность осадконакопления. Для почвы это $U_n > 65$, для ритма кровли - $U_B > 50$. Это следствие интенсивной деятельности водотоков внутри торфяника. В первом случае в начальную стадию торфонакопления, во втором - в конечную стадию.

5.5. Основные выводы по главе "Адаптивный анализ осадочных отложений"

1. Все фазовые точки на фазовой плоскости энергетики нижнего и верхнего гранулометрического ритмов образуют поле разрешённых гидродинамических состояний (поле РГС), занимающее треугольную половину квадрата фазовой плос-

кости.

2. Поле РГС ограничено тремя линиями: *a, b, c*. Линии *a, b* связаны с унаследованностью усреднённой скорости водного потока из времени формирования нижнего ритма во время образования верхнего ритма. Линия "с" – это результат миграции наноснесущих артерий, когда существует запрет на высокую скорость накопления отложений в условиях погружения дна бассейна с конечной скоростью.

3. По происхождению верхнего ритма выделены пары ритмов регрессивного, трансгрессивного и смешанного видов. Ритмы регрессивного вида возникли в условиях стабильной, структурной и катастрофической адаптации. Стабильной адаптации соответствуют отложения механической поймы, структурной и катастрофической адаптации – отложения мигрирующих протоков.

4. Ритмы трансгрессивного вида возникли в условиях стабильной и катастрофической адаптации. Отсутствие структурной адаптации указывает на слабую миграцию русел. Это вызвано сильной уплотняемостью захороняемого торфа под весом русловых песков, что фиксировало местоположение русла.

6. Вероятность встречи угольного пласта с рабочей мощностью тем выше, чем меньше энергетика подстилающего пласт ритма.

Глава 6. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ УГЛЕННОЙ ТОЛЩИ

6.1. Адаптация торфяной залежи средней мощности

Отдельно анализировалась информация о парах ритмов, разделённых угольными пластами рабочей мощности. Вероятность встречи таких пар равна 0,05. Они образуют два поля РГС (рис. 6.1). За пределами этих полей, внутри общего поля РГС, вероятность встречи угольных пластов с рабочей мощностью снижается до 0,001 – 0,04.

Распределение пар по мощности угольного пласта подтверждает установленную связь между мощностью угольного пласта и удельной динамичностью осадконакопления перекрывающего и подстилающего ритмов (см. рис. 5.4). Линии изомощности угольного пласта рабочей мощности субпараллельны линии С, ограничивающей общее поле РГС (рис. 6.2).

Однако, если изменчивость энергетического воздействия превышает единицу ($I > 1$), то изолинии мощности угольного пласта смещаются на 17 единиц в сторону низких значений V_B . Это вызвано высоким гидравлическим сопротивлением поверхности торфяного болота из-за интенсивности роста растений. Поэтому здесь произошла структурная адаптация объекта, выразившаяся в возникновении русловых водотоков с высокой скоростью течения. Вероятность попадания разведочной скважиной в русловые отложения, имеющие узкую лентовидную форму, очень низка и равна 0,005.

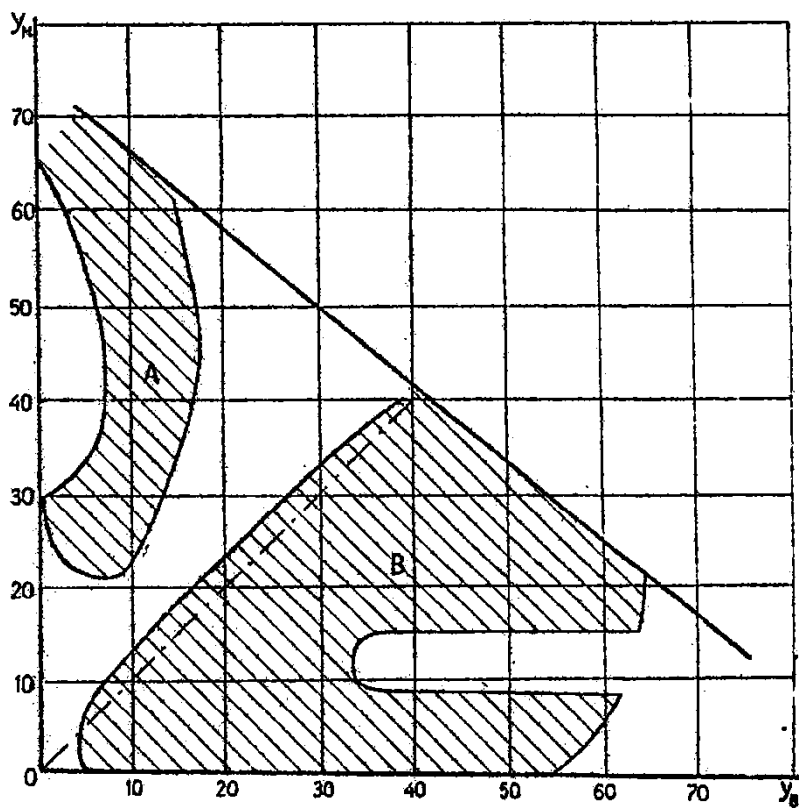


Рис.6.1. Фазовый портрет развития ритмов, разделённых угольными пластами рабочей мощности

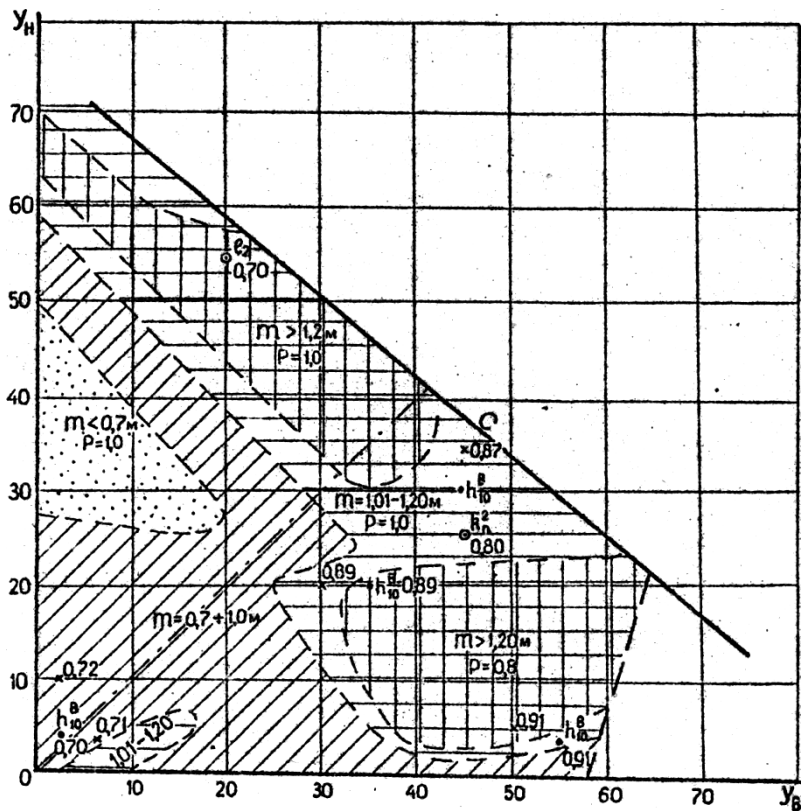


Рис.6.2. Фазовый портрет развития угольных пластов рабочей мощности, разделяющих смежные ритмы.

А в междурусловой части отлагались тонкие пойменные отложения, дающие низкую удельную динамичность осадконакопления $У_B$.

При высокой изменчивости энергетического воздействия ($I \geq 20$) вероятность встречи угольных пластов с мощностью более 1 м уменьшается до 0,001. Это результат высокой гидродинамической активности бассейна седиментации, обусловившей кратковременность торфонакопления.

Особенности структурной адаптации объекта изучались на фазовом портрете, где рассматривалось распространение русловых отложений в угольном пласте и в породах кровли (рис. 6.3).

Ранее выполненные исследования позволили установить, что отложения русловых замещений в пласте синхронны угольным слоям [54, 55]. От 2 до 5 русловых замещений образуют лентовидную зону. Эти зоны, каждая из которых состоит из нескольких русловых замещений, располагаются через 100–400 м, субпараллельны и пересекают месторождение.

К зонам русловых замещений приурочены лентовидные в плане песчаные тела кровли. Лентовидные песчаники непосредственной кровли угольного пласта в 5–10 м выше пласта соединяются, образуя пласт песчаника. При эксплуатационной разведке выявлено, что песчаники по латерали переходят в слои аргиллитов и алевролитов. То есть русловые песчаники сменяются отложениями поймы или механической поймы [54].

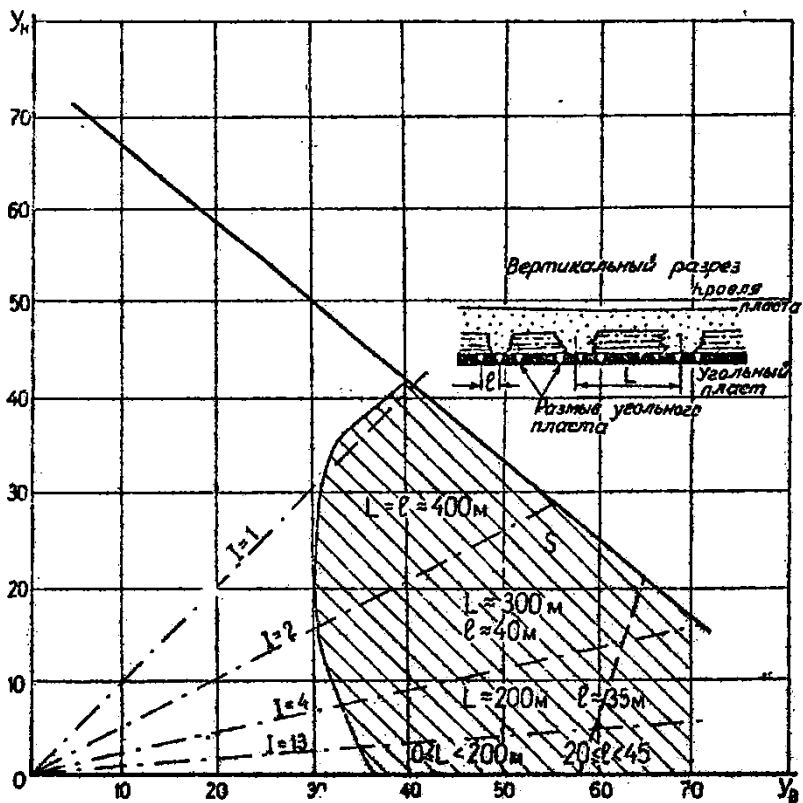


Рис. 6.3. Фазовый портрет развития угольных пластов рабочей мощности: с ростом изменчивости энергетического воздействия $I=U_B/U_H$, происходит уменьшение расстояния между руслами разрывов.

6.2. Структурная адаптация торфяной залежи

Нами установлено, что особенности структурной адаптации определяются изменчивостью энергетического воздействия среды на комплекс – фаціальную обстановку (см.рис. 6.3). Русловые замещения, отражающие структурную адаптацию, развиты на тех угольных пластах, где энергетическая изменчивость больше единицы ($I > 1$) и удельная динамичность осадконакопления верхнего ритма более 30 ($U_B > 30$). Пары ритмов, удовлетворяющие этим условиям, образуют на фазовом портрете поле существования S.

По мере роста I от 1 до 600 среднее расстояние между зонами замещения уменьшаются с 400м до 0. А между русловыми замещениями расстояние снижается до 20м.

Форма поля S объясняется наличием двух видов сопротивления торфяника к проникновению водотоков:

1. Сопротивление торфяного слоя. Вызвано шероховатостью поверхности торфяника. Поэтому замещения возникали при $U_B > 30$.

2. Сопротивление морфоструктуры бассейна седиментации. В первом приближении обратно пропорционально величине I . Явилось причиной увеличения плотности русловых замещений по мере роста изменчивости (I).

Геолого-генетическую сущность взаимосвязи сопротивления морфоструктуры с гидродинамической изменчивостью, дополняет результат анализа структурно-текстурных особенностей отложений верхнего ритма (рис. 6.4).

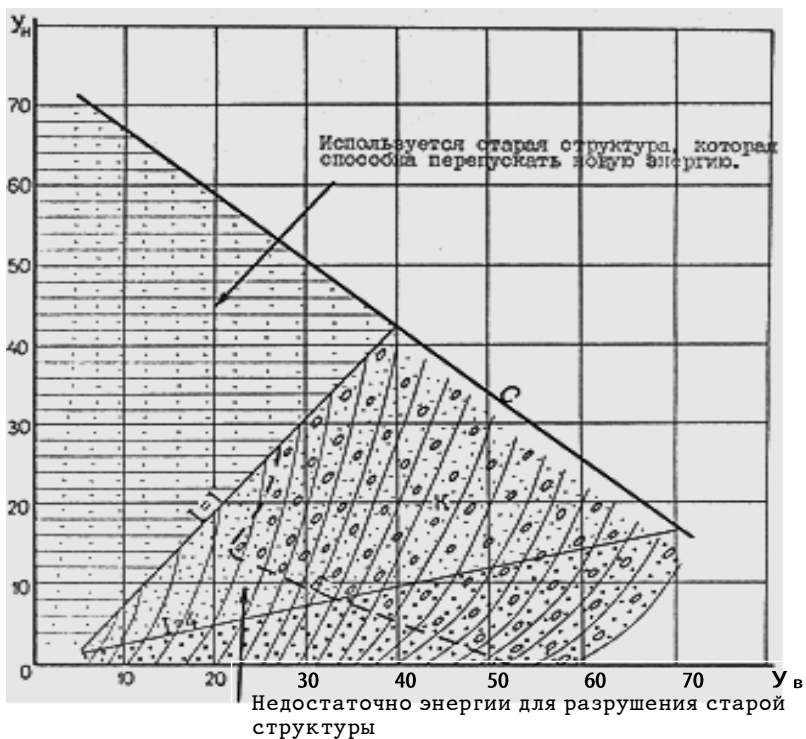







Рис.6.4. Изменение структуры и текстуры песчаника перекрывающего ритма в зависимости от энергетической изменчивости:

-  слоистость горизонтальная, волнистая,
-  слоистость косая, линзовидно-косая,
-  песчаник мелкозернистый,
-  песчаник среднезернистый,
-  слабоокатанные обломки алевролита или аргиллита в основании песчаника.

6.3. Адаптация палеоландшафта эпохи захоронения торфяной залежи

Нами установлено, что текстура песчаников верхнего ритма определяется гидродинамической изменчивостью (I). При $I < 1$, то есть когда энергия формирования верхнего ритма меньше энергии формирования ритма почвы, преобладает горизонтальная и волнистая слоистость ($p=0,9$). А при $I > 1$, когда $V_B > V_H$, преобладает косая и линзовидно-косая слоистость (вероятность $0,7-0,8$).

С увеличением изменчивости, одновременно с турбулентностью потока, возрастала и крупность переносимых частиц. Так, при $I < 4$ песчаник тонкозернистый ($p=0,91$). При $I > 4$ песчаник средне- и крупнозернистый ($p=1,0$).

Поскольку увеличение крупности частиц осадков верхнего ритма прямо пропорционально изменчивости, то упрощённо можно написать:

$$v = k_1 \times I \quad (6.1)$$

где v - средняя скорость течения;

I - изменчивость гидродинамической активности;

k_1 - коэффициент пропорциональности.

Но скорость потока определяется глубиной (h) и уклоном (I) [Лучшева А.А., 1976]:

$$v = (h^{x+0.5} \times I^{0.5}) / n, \quad (6.2)$$

где x - показатель степени, зависит от глубины;

h - коэффициент шероховатости дна.

Числитель ф. 6.1 представляет собой функцию кинетической энергии водного потока. Поэтому будет

верным следующее преобразование ф. 6.1:

$$v = k_2 \times V/\Pi \quad (6.3)$$

где V - кинетическая энергия водной среды;

Π - сопротивление морфоструктуры бассейна седиментации;

k_2 - коэффициент пропорциональности.

Учитывая формулу 6.1:

$$k_1 \times И = k_2 \times V/\Pi,$$

$$И = k_2 \times V/k_1 \times \Pi,$$

$$V_B / V_H = k_2 \times V/k_1 \times \Pi. \quad (6.4)$$

Из последней формулы следует, что удельная гидродинамическая активность ритма отражает как кинетическую энергию водного потока, сформировавшего отложения ритма, так и сопротивление морфоструктуры более поздним водотокам.

6.4. Структурная адаптация палеоландшафта эпохи захоронения торфяной залежи

В основании песчаника верхнего ритма встречаются угловатые и слабоокатанные обломки подстилающего аргиллита, алевролита и угля. Такие пары образуют поле K ($p=0,7$), ограниченное линиями I , C , E . Линия E субпараллельна линии C , ограничивающей основное поле PGC . Следовательно, эрозия начинается в зоне миграции потоков при достаточно высоких скоростях течения.

Отсюда можно дать геолого-генетическую интерпретацию линии C как граничной линии между устойчивым состоянием морфоструктуры (слева от линии C) и неустойчивым. Под устойчивостью морфоструктуры мы

понимаем способность элементов палеоландшафта к присущей им функциональной деятельности.

Причина потери устойчивости, с изменением функций у элемента палеоландшафта, заключается в критическом увеличении высотной контрастности рельефа из-за резкой дифференциации участков интенсивного осадконакопления. Это вызывало миграцию аллювиально-дельтовых проток на другие участки. Миграция сопровождалась боковой и донной эрозией.

6.5. Основные выводы по главе "Адаптивный анализ угленосной толщи"

1. Мощность угольного пласта, разделяющего пару ритмов, связана с удельной динамичностью осадконакопления данных ритмов.

2. Увеличение мощности угольного пласта сопровождается ростом энергетики формирования обеих ритмов. Однако влияние энергетики перекрывающего ритма выражено сильнее. Причина этого в высокой уплотняемости захороняемого торфяника, что приводило к переуглублению русла и к увеличению скорости потока [54].

3. Структурная адаптация ландшафта торфяного болота происходила на участках с низкой энергетикой подстилающего ритма и вызывала сильную энергетику перекрывающего ритма. В результате структурной адаптации в торфянике возникали проточные русла, где отлагались песок и глина. Такая связь позволяет прогнозировать размывы угля по отложениям боковых пород с использованием фазовых портре-

тов угольного пласта.

4. Текстура отложений кровли зависит от гидродинамической изменчивости (I) и меняется от горизонтально- до косослоистой по мере увеличения значения I . В этом же направлении наблюдается увеличение крупности зерна осадков от глин до крупнозернистых песков и даже до конгломератов.

Глава 7. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

7.1. Изменение торфяника под воздействием водной среды

Для решения практической задачи, как на стадии предварительной разведки выявить перспективные участки, все множество пар ритмов по 6 угольным пластам случайным образом делилось на 2 подмножества: обучающее и контрольное. С помощью обучающего подмножества на фазовом портрете адаптации угольного пласта ограничивались участки, характеризующие различные зоны пласта. Такие зоны выделялись по мощности, по зольности угля, по строению пласта. Затем по контрольному подмножеству выяснялась достоверность выделенных полей.

Краткая характеристика гранулометрических ритмов приведена в таблице 7.1.

Таблица 7.1.

Достоверность прогнозирования параметров угольного пласта на фазовых портретах

Угольный пласт между ритмами		Маркирующий горизонт		Достоверность прогноза
Индекс пласта	Мощность, м	Внизу пары	вверху пары	
h_{10}^B	0,40-1,49	h_{10}^B или h_6^B	H_6^3 или h_{10}^1	0,75
i_3^H	0,10-2,05	I_4	i_3^B	0,70
i_3^B	0,10-0,88	i_3^H	i_3^{1H}	Не прогнозировалось

Продолжение таблицы 7.1.

Угольный пласт между ритмами		Маркирующий горизонт		Достоверность прогноза
Индекс пласта	Мощность, м	Внизу пары	вверху пары	
k_2^H	0.1-0.98	k_2	K_2	Не прогнозировалось 0,62 0,63 0.81
k_4^2	0,32-1,0	k_6	k_6^2 или k_5^H	
k_5^{1B}	0,60-1,47	k_5^B	k_5^2 или k_5^H	
l_2	0.39-1.03	L_2 или l_1	l_2^1	

Поля разрешённых гидродинамических состояний приведены на рис. 7.1.

Рассмотрим особенности ФПА для некоторых угольных пластов.

7.2. Адаптация торфяной залежи пласта h_{10}^B

Угольный пласт h_{10}^B . Пары ритмов с вероятностью 0,92 образуют поля РГС, ограниченное линиями a, b, c, d;

$$a: \quad Y_B = 0,33$$

$$b: \quad Y_B = 20 Y_H - 20$$

$$c: \quad Y_B = 97 - 2,77 Y_H$$

$$d: \quad Y_B = 60 + 0,6 Y_H$$

На диаграмме слева направо наблюдается закономерное увеличение мощности чистых угольных пачек от 0,7 0,9 м. Одновременно уменьшается мощность породного прослоя от 0,2 м до 0,03 м. При $Y_B > 60$ и $Y_H < 8$, мощность чистых угольных пачек скачком уменьшается на

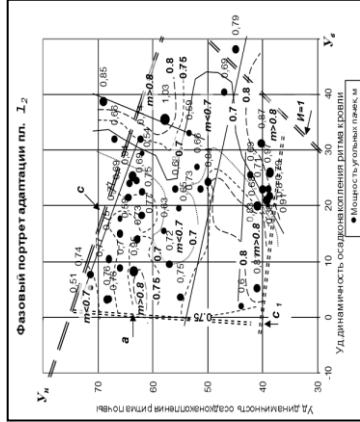
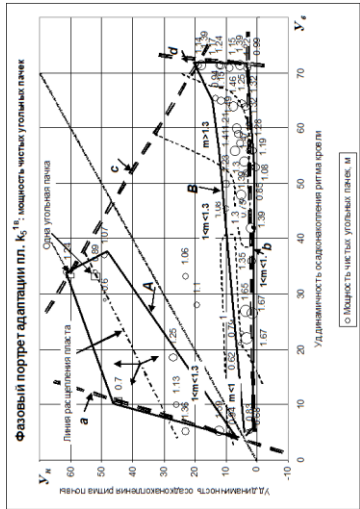
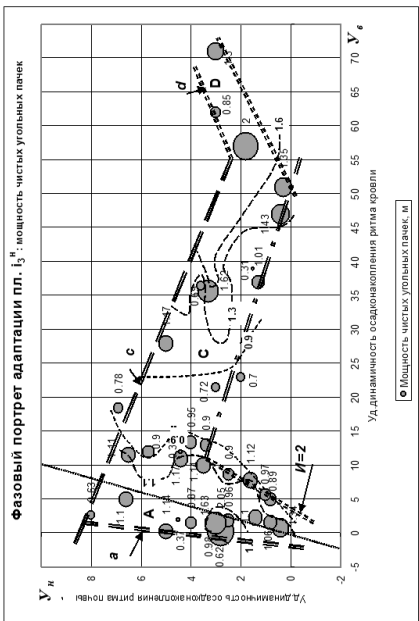
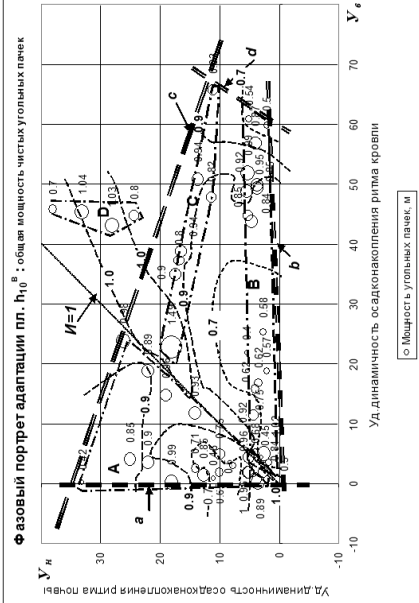


Рис. 7.1. Поля разрешенных гидродинамических состояний угольных пластов

0,37 м в связи с фациальным замещением угля отложениями кровли.

Обучающее подмножество позволило выделить 6 полей существования по изменению мощности чистых угольных пачек. Контрольное подмножество показало сходимость 76% с выделенными в кластерах значениями.

Данный пример характерен с точки зрения чёткого обособления кластеров по гидродинамическому развитию верхнего ритма (согласно рис.5.1):

- 1) наследованного развития (вдоль линии a);
- 2) развития с разрушением морфоструктуры нижнего ритма (вдоль линии b);
- 3) миграционного развития водотоков (вдоль линии c).

Кроме выделенного поля РГС, 8% пар ритмов образуют кластер устойчивого унаследованного развития основного аллювиального дельтового русла при $U_H > 23$, $V_B = 46$.

Анализ ФПА показывает, что верхний ритм пары, следовательно, и фациальная обстановка, может оказаться в одном из трёх устойчивых состояний:

- 1) состояние с низкой удельной динамичностью осадконакопления ($V_B < 5$), характерно для $I < 1$;
- 2) состояние с высокой удельной динамичностью, при $I > 1$, V_B до 67;
- 3) состояние с унаследованной динамичностью, при $V_B = 12 \div 25$, и $V_B = 46$.

Вероятность перехода из первого состояния во второе и третье равно 0,67. Переход во второе состояние происходит на участках со слабовыраженной

морфоструктурой нижнего ритма, т.е. при $У_H < 15$. Переход в третье состояние - на участках с хорошо выраженной унаследованной морфоструктурой, при $У_H > 18$.

Переход осуществляется из-за высокой скорости нанос содержащих потоков, поступающих по унаследованным депрессиям (мощность угольного пласта на этих участках повышена на 0,2 м). Потоки могли поступать и случайным образом на обширные понижения торфяной залежи.

7.3. Адаптация торфяной залежи пласта i_3^H

Угольный пласт i_3^H . Пары ритмов этого пласта с вероятностью 0,92 образуют поле РГС, ограниченное координатными осями и линией c :

$$c: \quad У_B = 72 - 8 У_H$$

Переход пар ритмов из участка унаследованного развития на участок миграции, т.е. смещение точек вправо на ФПА, происходило при $И > 1,8$ с вероятностью 0,5-0,75. Вероятность перехода возрастает с уменьшением значения $У_H$. Переход в состояние с высоким значением $У_B$ связан с увеличением средней мощности угольного пласта на 0,14 м. То есть, водотоки проникали над депрессиями ложа торфяника. И наиболее быстрые потоки проникали на торфяник на тех участках, где морфоструктура нижнего ритма была слабо выражена.

По обучающему подмножеству на диаграмме были выделены зоны с различной мощностью угольного пласта: 0,6-0,99м; 1,0-1,29м; $\geq 1,30$ м.

По данным контрольного подмножества установлена

достоверность прогнозирования мощности пласта при использовании ФПА. Она равна 0,69.

Приведённый пример иллюстрирует миграцию водотоков при малых значениях удельной динамичности осадконакопления нижнего ритма, когда $V_H < 9$.

7.4. Адаптация торфяной залежи пласта i_3^B

Угольный пласт i_3^B . Пары ритмов с вероятностью 0,9 образуют поле РГС, ограниченное осью абсцисс и линиями a, c, d :

$$a: \quad V_B = 0,1 V_H - 3$$

$$c: \quad V_B = 80 - 1,1 V_H$$

$$d: \quad V_B = 50$$

Поле РГС делится на участки:

1) унаследованного развития, вдоль линии a . При $V_H < 20$ мощность угольного пласта $m = 0,53$, зольность $A^c = 20\%$. При $V_H > 20$ углистый сланец вместо угля;

2) с разрушением морфоструктуры нижнего ритма - вдоль оси абсцисс, $V_H < 6$, $m = 0,58$ м, $A^c \geq 30\%$.

3) миграционного развития - вдоль линии c , $m = 0,47 - 0,59$, $A^c \geq 30\%$, при $V_H > 15$. При $V_H < 15$ зольность $A^c = 10 - 15\%$.

Смещение пар ритмов в зону миграционного развития при $I > 1$ и $V_H < 35$ - это пример структурной адаптации фациальной обстановки. Переход происходит на участках с повышенной мощностью угольного пласта на 0,06 м и зольности на 20-30%.

При $V_H > 35$ переход характеризует унаследованность

активных русел, не прекращавших свою деятельность и в период торфонакопления.

Здесь видна взаимосвязь между динамикой нижнего и верхнего ритмов с одной стороны, и качественной характеристикой угольного пласта с другой. Контрольное подмножество здесь не выделялось.

7.5. Адаптация торфяной залежи пласта k_2^H

Угольный пласт k_2^H . Пары ритмов с вероятностью 0,91 образуют поле РГС, ограниченное координатными осями и линией c :

$$c: \quad V_B = 42 - 1,4 V_H$$

Поле РГС делится на кластеры:

1) соответствующий унаследованному развитию (вдоль оси V_B), при $V_B > 5$ и при $V_H < 10$ с вероятностью 0,67, $m \geq 0,60$ м. При $V_H > 20$ с вероятностью 1,0, $m < 0,60$;

2) вдоль оси V_B , при $V_H < 10$, $m = 0,63$. Соответствует структурной адаптации фациальной обстановки. $V_B > 25$.

Переход пар ритмов на участок миграционного развития ($V_B = V_H = 20$) сопровождается уменьшением мощности угольного пласта. Это, вместе с понижением мощности при $V_H > 20$, указывает на широкое развитие внутриболотных водотоков и водоёмов, где накапливались терригенные отложения.

По данным обучающего подмножества были выделены две зоны внутри РГС:

1) с мощностью угольного пласта 0,12-0,6 м,

2) с мощностью угольного пласта 0,6-1,14 м.

Контрольное подмножество показало достоверность выделения зон, равную 0,69.

7.6. Адаптация торфяной залежи пласта k_4^2

Угольный пласт k_4^2 . Пары ритмов с вероятностью 0,97 образуют поле РГС, ограниченное линиями a, b, c, c_1, d .

$$a : \quad Y_B = Y_H - 20$$

$$b : \quad Y_B = 4 Y_H$$

$$c : \quad Y_B = 130 - 2 Y_H$$

$$c_1 : \quad Y_B = 62 - 2 Y_H$$

$$d : \quad Y_B = 60 - 0,2 Y_H$$

Поле существования РГС представляет собой фрагмент участка миграционного развития. Внутри участка выделяется наложенная зона развития с разрушением морфоструктуры нижнего ритма. Внутри этой зоны расположено 69% всех пар ритмов.

Участок унаследованного развития выражен менее чётко.

В поле РГС мощность чистых угольных пачек меняется от 0,20 до 1,01 м. Тринадцать пар ритмов, содержащие угольный пласт мощностью менее 0,58 м или с породным прослоем более 3,0 м образуют на ФПА 3 линейные зоны. Одна из них параллельна линии "а", две другие - линии "б". На плане угольного пласта эти пары располагаются на участке расщепления и фациального выклинивания пласта.

В пределах участка миграционного развития, при переходе из зоны унаследованного развития в зону развития с разрушением морфоструктуры, мощность чистых

угольных пачек уменьшается на 8 см. А зольность пласта возрастает на 9%.

На основании данных обучающего подмножества были выделены на ФПА зоны:

- 1) с мощностью чистых угольных пачек менее 0,58 м.
- 2) с мощностью чистых угольных пачек более 0,6 м.

Контрольное подмножество показало достоверность прогнозирования 0,62.

7.7. Адаптация торфяной залежи пласта k_5^{1B}

Угольный пласт k_5^{1B} . Пары ритмов с вероятностью 0,98 образуют поле РГС. ограниченное осью Y_B и линиями a , c , d :

$$a: \quad Y_B = 0,4 Y_H$$

$$c: \quad Y_B = 92 - 1,1 Y_H$$

$$d: \quad Y_B = 71$$

Большая часть ритмов (75,5%) входят в участок развития с разрушением морфоструктуры нижнего ритма, частично наложенного на участок миграционного развития. Здесь достаточно чётко прослеживается общее увеличение мощности чистых угольных пачек от 0,8 до 1,6м по мере роста значения Y_B .

По обучающему подмножеству были выделены зоны с различной мощностью чистых угольных пачек:

- 1) мощность угольных пачек менее 1,0 м;
- 2) мощность от 1,01 до 1,29 м;
- 3) мощность от 1,30 до 1,70 м.

Контрольное подмножество показало достоверность

выделения зон, равную 0,68.

7.8. Адаптация торфяной залежи пласта l_2

Угольный пласт l_2 . Пары ритмов с вероятностью 0,98 образуют поле РС, представляющее собой наложенные фрагменты участков миграционного и унаследованного развития. Поле ограничено линиями $a, c, c_1, И=1$:

$$a: \quad Y_B = 0,06 Y_H - 1,25$$

$$c: \quad Y_B = 162 - 2,5 Y_H$$

$$c_1 \quad Y_B = 172 - 4,1 Y_H$$

На ФПА видно увеличение мощности угольного пласта вдоль линии равной энергии. По обучающему подмножеству на диаграмме были выделены зоны с мощностью более 0,8 м и с мощностью $m < 0,79$ м.

Контрольное подмножество показало достоверность выделения зон, равную 0.81.

На фазовых портретах пластов выяснялись условия, при которых происходит структурная адаптация фациальной обстановки, формирующей верхний ритм. Было установлено, что вероятность структурной адаптации возрастает с увеличением изменчивости удельной динамичности. Однако, связь слабая, что является следствием влияния на адаптацию абсолютного значения удельной динамичности осадконакопления для верхнего ритма.

7.9. Самоорганизация осадконакопления

Из приведённых диаграмм ФПА видно, что в общем случае поле разрешённых гидродинамических состояний пар



гранулометрических ритмов ограничено линиями a , b , c , d , I (см.рис.7.2). Выполненный анализ позволяет их интерпретировать следующим образом.

Линия a - ограничивает поле РГС по наименьшим значениям водной энергии верхнего ритма (V_{Bmin}) для всех значений динамики нижнего ритма (V_{Hi}). Эта линия соответствует наименьшей скорости течения потоков, сформировавших верхний ритм. Незначительное увеличение динамики верхнего ритма (V_B) по мере роста динамики нижнего ритма (V_H) показывает унаследуемость энергетических показателей во времени. То есть, на тех элементах морфоструктуры, которые сформировались при определённом значении водной энергии нижнего ритма, энергия водной среды верхнего ритма не может быть меньше какого-то критического значения.

Линия b - ограничивает поле РГС по наименьшим значениям водной энергии, сформировавшей нижний ритм (V_{Hmin}), для всех значений динамики верхнего ритма (V_{Bi}). Определяется наибольшей скоростью течения водных потоков, сформировавших верхний ритм. Характеризуется быстрым увеличением удельной динамичности осадконакопления верхнего ритма по мере незначительного роста удельной динамичности нижнего ритма.

Эта линия показывает, что, для каждого малого значения удельной динамичности нижнего ритма, удельная динамичность верхнего ритма не может превышать какого-то наибольшего значения. Линия "b" ограничивает поле РГС по предельной изменчивости морфоструктуры

нижнего ритма в ходе структурной адаптации рельефа при формировании верхнего ритма.

Линия "с" - ограничивает поле РГС по максимальным значениям удельной динамичности осадконакопления верхнего ритма для средних по величине и наибольших значений удельной динамичности нижнего ритма. Характеризуется увеличением удельной динамичности верхнего ритма по мере снижения удельной динамичности осадконакопления нижнего ритма.

Эта линия показывает, что унаследованный рельеф почвы пласта, при формировании кровли, разрушается после достижения критической высотной контрастности. И водотоки, формирующие кровлю, перемещаются на новые участки, где ранее активный сток не проявлялся. В палеоландшафтном аспекте это линия миграции аллювиально-дельтовых рукавов и их подводных продолжений - бороздин.

Линия "d" - ограничивает поле РГС по наибольшим значениям удельной динамичности осадконакопления кровли для малых значений удельной динамичности почвы (V_{Hmin}). Определяется продолжительностью функционирования наиболее интенсивных течений на участках разрушения остаточной морфоструктуры нижнего ритма, при формировании верхнего ритма. Характеризует степень устойчивости элементов новой морфоструктуры.

Линия "Г" - это линия равенства удельной динамичности осадконакопления верхнего ритма и удельной динамичности нижнего ритма. Остаточная морфоструктура

нижнего ритма функционирует при формировании верхнего ритма.

Таким образом, удельная динамичность осадконакопления верхнего ритма меньше, чем удельная динамичность нижнего ритма на тех участках, где выраженность морфоструктуры почвы выше. Это связано с сопротивлением морфоструктуры нижнего ритма водной среде, формирующей верхний ритм.

И, наоборот, на участках с низкой удельной динамичностью осадконакопления нижнего ритма сопротивление морфоструктуры почвы снижается. Это приводит к разрушению этой морфоструктуры и к возникновению новой при формировании верхнего ритма. Поэтому здесь происходит структурная адаптация фациальной обстановки.

Существуют геологические процессы, которые уменьшают выраженность остаточной морфоструктуры нижнего ритма, следовательно снижающие ее сопротивление. Это - торфонакопление, а также морская абразия. Они приводят к увеличению гидродинамической активности при возникновении верхнего ритма и пара ритмов смещается в зону миграционного развития.

Исходя из изложенного, можно предложить обобщённую модель комплекса "фациальная обстановка".

Фациальная обстановка представляет собой неравновесную систему, имеющую неоднородную структуру. В комплекс из внешней среды поступают энергия и вещество, часть которых комплекс перепускает через себя.

Оставшуюся часть использует для строительства своих элементов или для их сохранения. Тем самым либо создаётся новая морфоструктура, либо унаследуется старая.

Перенос энергии и вещества происходит ритмами, поэтому возникают гранулометрические ритмы. Эти ритмы отражают интенсивность вещественно-энергетического воздействия среды. В каждом новом ритме элемент морфоструктуры стремится перепустить сквозь себя энергию и вещество в меньшем количестве, чем затрачено на образование этого элемента. Это связано с сопротивлением морфоструктуры водным потокам.

На участках бассейна седиментации, где энергия возникновения элементов мала, структурное сопротивление водным потокам небольшое. Здесь происходит частичное разрушение старой морфоструктуры и образуется новая структура, которая может перепускать через себя потоки большей интенсивности. То есть, на таких участках происходит структурная адаптация комплекса.

Если на поверхности морфоструктуры нижнего ритма происходит торфонакопление или абразия, то выраженность, точнее высотная контрастность рельефа, уменьшалась, что способствовало проникновению в бассейн более интенсивных водотоков.

7.10. Основные выводы по главе "Адаптивный анализ угольных пластов"

1. Параметры угольного пласта и водно-энергетические условия формирования кровли и почвы пласта взаимосвяза-

ны.

2. Это позволяют прогнозировать с достоверностью от 0,62 до 0,81 такие параметры пласта, как его мощность, зольность и морфологию.

3. Фазовый портрет каждого угольного пласта имеет свои отличительные черты, характеризующие фациальную обстановку эпохи торфообразования.

Глава 8. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ УГЛЕННОСТИ И ПЛОЩАДЬЮ УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА

8.1. Методика построения диаграмм коэффициент торфоносности – площадь бассейна седиментации

Угольные пласты изучаемых бассейнов и месторождений сложены угольным веществом разной степени углефикации. Поскольку по мере углефикации мощность пласта в ряду торф поверхностный-антрацит уменьшается в 16 раз, то при сравнении коэффициентов угленосности различных бассейнов могут быть допущены ошибки.

Для исключения таких ошибок коэффициенты угленосности были преобразованы в коэффициенты торфоносности по следующей формуле:

$$K_m = \frac{K_y \cdot k \cdot 100}{(100 - K_y) + K_y \cdot k} \% \quad (8.1)$$

где K_m , K_y , k - соответственно коэффициенты торфоносности, угленосности и уменьшения мощности пласта в ряду зрелый торф-уголь. Для бурых углей $k=2,2$; для каменных углей $k=4,5$; для антрацитов $k=6,5$ [Волков В.Н.].

На горизонтальной оси диаграммы для каждого угольного бассейна отмечалось значение коэффициента торфоносности, а на вертикальной оси - значение его площади. В отмеченных точках восстанавливались перпендикуляры к осям. На пересечении перпендикуляров в плоскости диаграммы отмечалась точка, соответствующая данному бассейну.

Таким образом, каждая точка на диаграмме - это угольный бассейн с координатами по оси площади и по оси коэффициента торфоносности. Здесь для краткости назовём качеством величину коэффициента торфоносности, а количеством назовём площадь бассейна (рис.8.1).

8.2. Взаимосвязь между площадью бассейна и торфоносностью

Взаимосвязь количества и качества оценивалась для линейных участков верхних граничных линий по формуле:

$$C = \frac{B_2 \cdot B_1}{B_2} \cdot \frac{K_{T2} - K_{T1}}{K_{T2}} \quad (8.2)$$

где **C** - связь между площадью бассейна (**B**) и коэффициентом торфоносности;

B₁, **B₂** - наименьшая и наибольшая площадь вдоль верхней граничной линии;

K_{T2}, **K_{T1}** - коэффициенты торфоносности соответственно для **B₂**, **B₁**.

В результате выполнения расчётов были получены следующие значения:

для угольных бассейнов каменноугольного возраста (-1,6);

для угольных бассейнов пермского возраста (-1,0);

для угольных бассейнов триас-юрского возраста (-0,75);

для угольных бассейнов мел-неогенового возраста (-0,7).

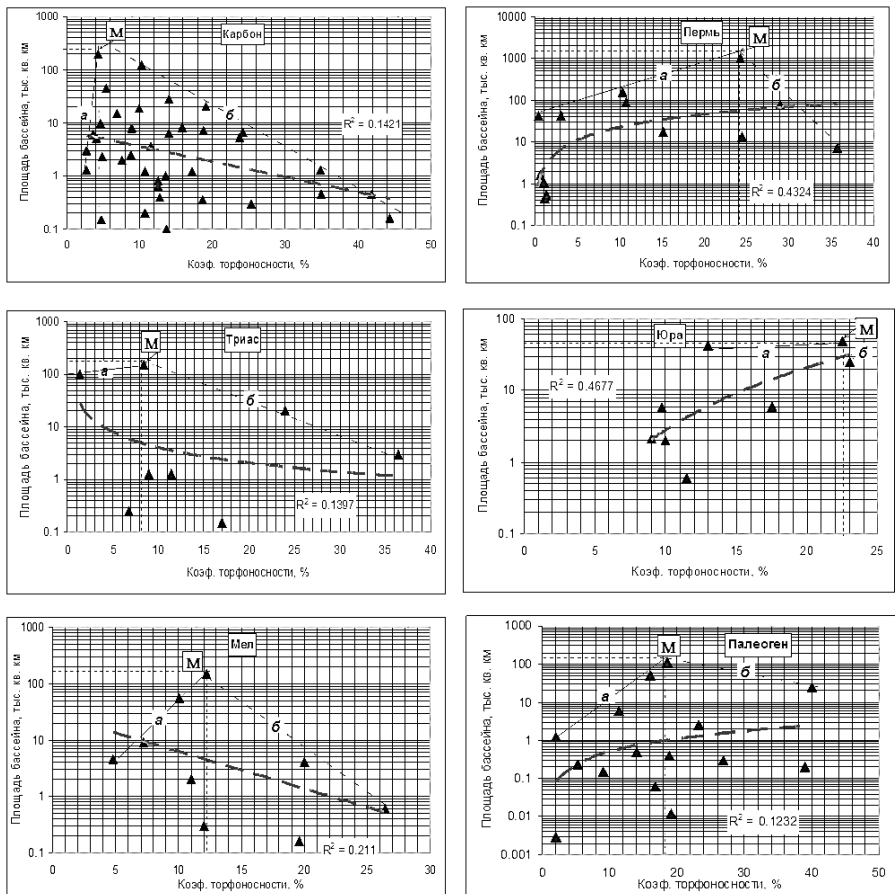


Рис.8.1. Поля существования угольных бассейнов и месторождений в системе "Количество - качество" каменноугольного, пермского, триас-юрского, палеоген-неогенового возраста .

Для угольных бассейнов каждого возраста определялись наибольшие площади по диаграмме, соответствующие коэффициенту торфоносности $K_m = 20\%$:

для бассейнов каменноугольного возраста 20 тыс. км²;

для бассейнов пермского возраста 50 тыс. км²;

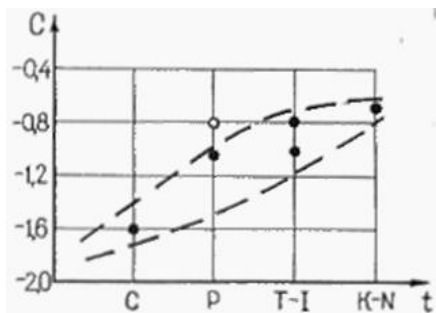
для бассейнов триас-юрского возраста 70 тыс. км²;

для бассейнов мел-неогенового возраста 100 тыс. км².

Следует согласиться, что коэффициент торфоносности соответствует усреднённой благоприятности климата и других факторов среды для процесса торфонакопления и захоронения залежи. Следовательно, при одинаковой благоприятности среды наблюдается увеличение площади углеобразования от древних к более молодым бассейнам.

8.3. Роль эволюции растений в расширении площади углеобразования от карбона к неогену

Существует связь между возрастом бассейна и значением "С", вычисленным по формуле 8.2. Причина такой связи (рис 8.2) заключается в эволюции растений. Так в карбоне растения были привязаны к участкам суши с высокой обводненностью. Угли были аллохтонные, продуктивность растений была низкой. Благодаря интенсивному переотложению растительных остатков мощные торфяники формировались на малых площадях. Поэтому значение С=-1,6. В перми, триасе и юре появились приспособленные к засушливым условиям виды растений.



Обозначения

- C-связь между площадью бассейна и торфоносностью
- t-возраст бассейна:
- C-карбон
- P-пермь
- T-триас
- I - Юра
- K-мел
- N-неоген

Рис. 8.2. Опережающий рост площади торфообразования относительно коэффициента торфоносности от карбона к неогену.

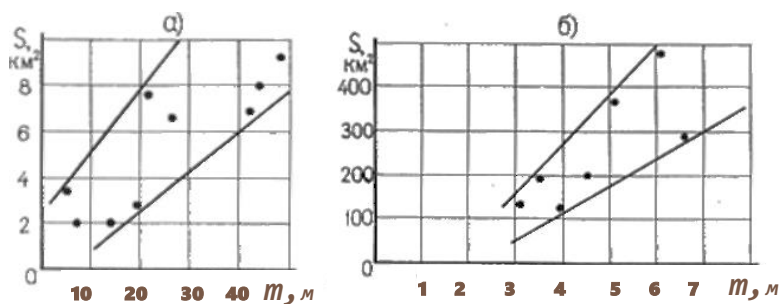


Рис. 8.3 Взаимосвязь между мощностью m угольных пластов и площадью их распространения:

а) Южноуральский бассейн,

б) Иркутский бассейн.

Данные по К.В.Миронову.

Торфообразование переместилось на участки с малой обводненностью. Мощные торфяники стали накапливаться на больших площадях ($C=-1,0$). В мелу-неогене покрытосеменные растения стали ещё более независимы от водоёмов и водотоков ($C=-0,7$).

Продуктивность биомассы от споровых растений к покрытосеменным возросла в 16 раз. Способность растений к расселению увеличилась при этом в пять раз.

8.4. Развитие бассейна углеобразования с расширением и со стягиванием биоценозов-торфообразователей

Выявленная обратная связь между коэффициентом торфоносности и площадью бассейна свидетельствует о преобладании сил, стягивающих растительные остатки к центру бассейна седиментации. Однако это может иметь и вероятностную природу: наиболее благоприятные условия, формирующие большой коэффициент торфоносности, существовали на небольших площадях.

Наиболее возможной является первая причина, связанная как с продуктивностью биомассы, так и с гидродинамической активностью в бассейне седиментации.

Внутри общего поля существования выделяются кластеры с более плотным расположением месторождений (см. рис. 8.1). В них появляется прямая зависимость между угленосностью и площадью бассейна.

Для граничных линий кластеров вычислялись тангенсы их наклона к горизонтальной оси "Коэффициент торфоносности". Прямая связь между качеством и количеством показыва-

ет способность растений к расселению, обратная - их способность восполнять на окраинах болота унос растительных остатков в центр зоны торфонакопления. То есть, чем больше тангенс для прямой связи, тем успешнее болотные растения захватывают прилегающие к торфянику участки, расширяя площадь залежи. И чем меньше угол наклона для линии с обратной связью, тем успешнее растения удерживаются на окраинах болота, несмотря на перенос их остатков в направлении к центру болота.

Отношение тангенса прямой связи к тангенсу обратной связи показывает способность болотных растений к выживанию в неблагоприятных условиях болотных окраин. Оказалось, что этот параметр возрастает от карбона к перми в два раза, от перми к триасу - в два раза. А для мела - неогена остаётся на том же уровне, что и для триаса.

Очевидно, что выживаемость болотных растений связана с ростом продуктивности биомассы в 16 раз от споровых к покрытосеменным.

Прямая зависимость характерна и для отдельных угольных пластов. Так, в Южно-Уральском и Иркутском бассейнах, с увеличением мощности угольного пласта, возрастает площадь распространения пласта (рис. 8.3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что адаптивный подход применим при анализе угленакопления и может дополнять существующие методы прогнозирования качества и количества запасов угля на разных стадиях разведки и поисковых работ.

8.5. Основные выводы по главе "Взаимосвязь между коэффициентом угленосности и площадью угольного бассейна"

1. Для угольного бассейна и угольного пласта выполняется закон взаимосвязи размера и элементной плотности комплекса, выраженной в виде связи между площадью бассейна (пласта) и коэффициентом угленосности (мощностью пласта).

2. Связь между размером и элементной плотностью может быть либо прямой, либо обратной. Форма связи зависит от соотношения аллохтонии и автохтонии. При преобладании автохтонии связь прямая, а при превышении аллохтонии связь обратная.

3. Наличие такой связи позволяет прогнозировать запасы по угленосному району и пласту на основании материалов единичных разрезов.

Часть 3. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Глава 9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ

9.1. Цель исследований и использованная информация

В ходе исследований по проблеме адаптации рудных месторождений мы в первую очередь хотели ответить на вопрос: адаптируется ли рудное месторождение к воздействию внешней среды? И если да, то какие законы адаптации комплексов при этом соблюдаются.

Нас главным образом интересовал закон о взаимосвязи элементной плотности и размеров комплекса. Применительно к рудным месторождениям – это взаимосвязь между количеством руды и ее химическим составом. Существование такой связи и выяснение ее характера могли дать новые способы прогнозирования масштабов и перспективности оруденения на стадии поисковой разведки.

Однако в ходе исследований появились новые вопросы, дополняющие целевую задачу. Это следующие вопросы:

1. Какие атомные параметры рудогенных элементов влияют на их миграцию в земной коре и на их концентрацию в рудных телах?

2. Каков механизм твердофазной диффузии в кристаллах?

3. Чем контролируются запасы руды в золоторудном месторождении?

4. Каков механизм миграции химических элементов в земной коре и почему они концентрируются в рудных телах и в минералах?

На последний вопрос существует множество ответов различных исследователей. Автор лишь дополнил общепринятые представления и несколько их расширил.

Нами анализировалась табличная информация по 900 рудным месторождениям из разных литературных источников, в том числе из монографии Перваго А.И., Калугина А.С., из информационной публикации Dan L.Mosier и др.

Кроме того, использовались табличные данные из отчетов по некоторым железорудным месторождениям.

9.2. Изученность проблемы взаимосвязи состава руды и запасов руды и металла

Общепринятым является мнение об увеличении запасов руды в месторождении при снижении бортового содержания полезного компонента. Это сопровождается уменьшением среднего содержания металла в руде. *То есть существует обратная связь между запасами руды и средним содержанием полезного компонента.*

Французские исследователи, занимающиеся данной проблемой, выявили обратную связь между запасами и средним содержанием металла в группе однотипных месторождений. Авторы связывают данное явление с тем, что вовлечение в подсчёт запасов более бедных руд приводит с одной стороны к увеличению запасов металла в месторождении, а с другой к снижению среднего содержания металла в руде. Это вполне согласуется с общепринятым мнением.

В то же время некоторые зарубежные исследователи и советские учёные *отмечают прямую связь между средним содержанием меди и запасами руды в группе меднопорфировых месторождений*. Это объясняется генетическими условиями, когда в более благоприятных условиях возникли более крупные месторождения с более богатой рудой.

Исследования в других генетических типах рудных месторождений дают отрицательный результат по проблеме взаимосвязи запасов руды и его химического состав.

По нашему мнению, отрицательный результат обусловлен несколькими причинами. Во-первых, генетически однотипные месторождения возникли и развивались в разных условиях, что исказило первичные взаимоотношения между запасами руды и содержанием в ней металла. Наиболее сильное влияние могла оказать степень эродированности месторождения. Во-вторых, исследования по данной проблеме сдерживались мнением об обратной взаимосвязи бортового содержания металла и запасов руды в месторождении.

Таким образом, исследователи отмечают два вида взаимосвязи между запасами руды (металла) в месторождении и средним содержанием металла в руде:

1) обратная взаимосвязь вызвана снижением бортового содержания с включением в подсчёт запасов более бедных руд (рис.9.1, б);

2) прямая взаимосвязь - обусловлена возникновением в более благоприятных условиях более крупных месторожде-

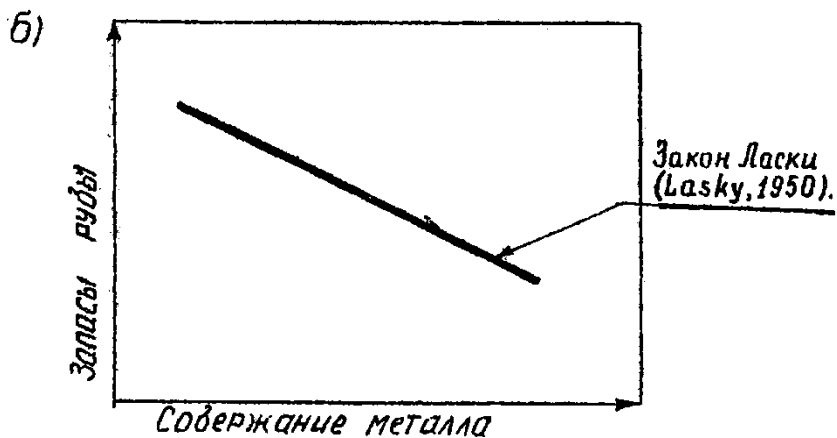
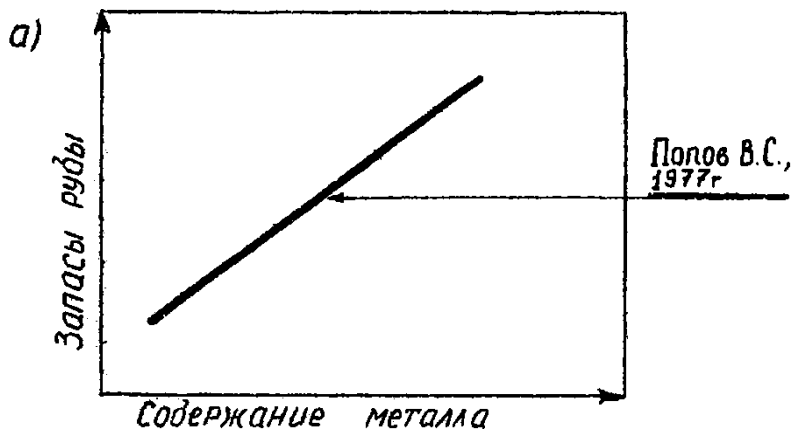


Рис. 9.1. Взаимосвязь между запасами руды (металла) в месторождении и содержанием металла в руде (Попов В.С. Геология и генезис медно- и молибден-порфировых месторождений. М: Наука, 1977. - 204 с.)

ний с большим содержанием металла (рис.9.1 , а).

В то же время есть ряд причин, которые заставляют взглянуть на данную проблему под другим углом зрения. Во-первых, среди геологов бытует мнение о том, что лучшее качество руд характерно для более мелких месторождений и рудных тел. Во-вторых, это мнение подтверждено процессами внутрирудной ремобилизации, приводящими к возникновению обогащённых металлом рудных столбов. В-третьих, рассмотрение рудных месторождений как комплексов с неизбежностью приводит к мысли о генетической причине взаимосвязи между качеством и количеством руды в месторождении.

Для выяснения закономерностей и причин взаимосвязи в первую очередь необходимо освободиться от "фонового шума" при рассмотрении фактических данных. То есть анализировать параметры лишь тех месторождений, которые возникли в сходных условиях. Это могут быть месторождения одного генетического типа, возникшие и сохранившиеся в наиболее благоприятных условиях. Такие месторождения назовём *тождественными месторождениями*.

9.3. Месторождение как комплекс

По определению, комплекс - это часть объекта, целостно реагирующая на внешнее воздействие (см. п. 2.1). Мы отметили, что комплексы одного вида возникают в благоприятных условиях при выполнении необходимых элементных, пространственных, энергетических и векторных условий (см.п. 2.2). Вследствие неоднородности внешней

среды, комплексы одного вида располагаются в относительно локальных зонах, образуя группы.

Покажем, что рудное месторождение можно рассматривать в качестве комплекса, а генетически однотипные месторождения одного региона – как группу комплексов одного вида.

В пространстве концентраций химических элементов каждое месторождение ведёт себя как целостный объект. То есть, содержание различных химических элементов изменяется сопряжённо при пострудном развитии месторождения [51, 65, 153, 171, 204, 222, 230]. Кроме того, вследствие внутрирудной миграции элементов, изменение состава руды в одной части месторождения влияет на химический состав в другой его части. Следовательно, месторождение обладает целостностью.

Понятие целостности можно распространить и на рудовмещающий породный массив, откуда может происходить мобилизация рудогенных элементов [17, 24, 149, 162, 180, 197, 213 и др.]. Однако породный массив отличается от рудного тела химическим составом и физическими свойствами, и обладает гораздо большими размерами. Поскольку скорость распространения информации и вещества в земной коре конечна, то, следовательно, породный массив характеризуется меньшей целостностью, чем месторождение.

Из сказанного следует, что месторождение полезного ископаемого можно рассматривать в качестве комплекса.

Генетически однотипные месторождения одного региона локализованы в пространстве и могут неустойчиво взаимо-

действовать [10]. То есть они образуют группу комплексов одного вида. Здесь наиболее ярко должны проявляться основные закономерности пострудного развития месторождений.

Возникновение и пострудное развитие месторождений одного генетического типа в разных регионах управляются идентичными природными законами. Именно поэтому возможны генетические классификации рудных месторождений. Это же позволяет совместно исследовать генетически однотипные месторождения, и выявлять главные природные факторы, формирующие рудное месторождение, не зависящие от генетического типа.

9.4. Оценка теплового воздействия внешней среды

Основным фактором развития комплекса является воздействие внешней среды. По отношению к рудному месторождению наиболее общим внешним фактором служит тепловое воздействие недр, поскольку:

- 1) физическое состояние вещества земной коры определяется соотношением температуры - давления;
- 2) химический состав горных пород в значительной степени зависит от температуры, давления;
- 3) скорость химических реакций, а следовательно и устойчивость минералов, регулируются температурой и давлением.

В формировании состава руды в месторождении несомненно роль геохимической обстановки. Однако химизм среды действует в пределах геохимических подтипов и типов руд-

ных месторождений, и поэтому не является главным фактором их пострудного развития.

Наряду с тепловым воздействием среды, в качестве наиболее общего фактора, очевидно, можно рассматривать и давление. Но, в отличие от теплового потока, суммирование во времени давления вызывает затруднение. В то же время интегральный эффект от теплового воздействия можно оценивать по сумме полученного месторождением тепла.

Исходя из этих соображений, в качестве претендента на роль внешнего фактора пострудного развития всех генетических типов рудных месторождений нами рассматривалось суммарное тепловое воздействие недр.

Тепловое воздействие недр на рудное месторождение складывается из следующих компонентов:

$$Q = \Phi + \sum_0^n M_i, \quad (9.1)$$

где Q - суммарный тепловой поток;

Φ - фоновый тепловой поток, зависящий от глубины залегания месторождения и от его возраста;

M_i - тепловой поток от магматического тела, внедрившегося в рудовмещающий массив.

Фоновый тепловой поток (Φ) нами учитывается косвенно, путем анализа информации по наиболее древним докембрийским месторождениям отдельно от палеозойских. В формуле (9.1) он был приравнен единице ($\Phi=1$).

В тепловой поток от магматических тел включалось тепловое воздействие:

а) материнского рудовмещающего магматического массива;

б) магматических тел (интрузивов, даек, силлов, эффузивов и др.), в разное время внедрившихся в рудовмещающую толщу;

в) эманация из глубинных интрузивов (для гидротермальных и пневматолитовых месторождений).

Суммарное количество тепла от каждого магматического тела оценивалось по балльной системе (табл. 9.1):

Таблица 9.1.

Условная градация величины теплового потока из магматических тел

№ п/п	Магматическое тело	Кол-во тепла, (балл)	Примечание
1	Рудовмещающий интрузив	1	Для магматических месторождений
2	Одно уникальное по составу магматическое тело, инъецированное в месторождение	1	
3	Эффузив в рудоносной толще	1	Для гидротермальных и пневматолитовых месторождений
4	Эффузив в надрудной толще	1	
5	Глубинный интрузив	0,5	
6	Неизвестный источник мигматизации рудовмещающей толщи	1	

M_i - количество тепла (в баллах) от i -го магматического тела.

В том случае, если в месторождении были выделены несколько отличных по составу син- и пострудных магматических тел, то величина теплового потока сквозь месторождение определялась по формуле:

$$Q = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n + 1 \quad (9.2)$$

где n - число магматических тел, уникальных по составу.

Для выяснения роли суммарного теплового потока сквозь месторождение в пострудном его развитии, нами анализировалась информация по железорудным месторождениям Сибири [91]. Основная информация была представлена в графической форме. Это позволило выявить некоторые закономерности, в первую очередь характер воздействия теплового потока на запасы месторождения и на средний химический состав руд.

9.5. Основные выводы по главе "Общие сведения и оценка воздействия среды"

1. Общеизвестны прямая и обратная связь между запасами руд в месторождении и их качеством. Автор, исходя из теории адаптации, полагает, что вид связи количество-качество руды зависит от генетических факторов.

2. Впервые предложено выделять из множества генетически однотипных месторождений подмножество тождественных месторождений для корректности анализа.

3. Тождественные месторождения - это месторождения, возникшие и сохранившиеся в более благоприятных условиях по сравнению с другими месторождениями данного типа. Они характеризуются наибольшими запасами руды при том или ином

содержании полезного компонента в руде.

4. Рудное месторождение является целостным объектом и нами рассматривается как комплекс, потому что скорость вещественно-энергетического обмена между его частями выше, чем скорость обмена между месторождением и внешней средой.

5. Рудное месторождение адаптируется к вещественно-энергетическому воздействию внешней среды, в том числе к температуре и к давлению. Из факторов внешней среды нами оценивается один фактор – тепловое воздействие среды по числу инъекций магмы. В то же время автор понимает, что магматическое тело является источником как теплового, так и вещественного потока, изменяющего рудное месторождение.

6. Автор осознает, что адаптивный анализ будет более успешным в том случае, если удастся предложить простой способ реконструкции температуры и давления либо в количественной, либо в качественной мере. Решению этой задачи посвящена четвертая часть данной работы.

Глава 10. ИЗМЕНЕНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗА СЧЁТ ПОСТРУДНОГО МАГМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

10.1. Влияние теплового потока на масштаб железооруднения

Воздействие суммарного теплового потока (Q) на запасы руды в месторождении (B) исследовалось на диаграмме Q - B (рис. 10.1). Все железорудные месторождения на диаграмме с вероятностью 0,99 образуют поле существования (кластер), сверху ограниченный кривой:

$$\text{при } Q \geq 2; B_{\max} = 12300 Q^{-1,8}, \text{ млн. т.} \quad (10.1)$$

где B_{\max} - наибольшие запасы в множестве железорудных месторождений;

Q - суммарное количество теплового потока сквозь железорудное месторождения.

Гидротермальные, пневматолитовые и контактово-метасоматические месторождения образуют кластер меньших размеров, с вероятностью 1,0 ограниченный сверху кривыми:

$$\text{при } Q \leq 3; \quad B_{\max} = 500 Q^{0,95}, \text{ млн. т.} \quad (10.2)$$

$$\text{при } 3 \leq Q \leq 5; \quad B_{\max} = 6150 Q^{-1,8}, \text{ млн. т.} \quad (10.3)$$

При $Q \geq 2$ железорудные месторождения на диаграмме Q - B образуют обособленные кластеры в зависимости от состава рудовмещающих осадочных или осадочно-вулканогенных пород. Этим же определяется степень уменьшения наибольших запасов (B_{\max}) руды в кластерах. Так, при росте величины Q на 2 балла, наибольшие запасы руды уменьшаются:

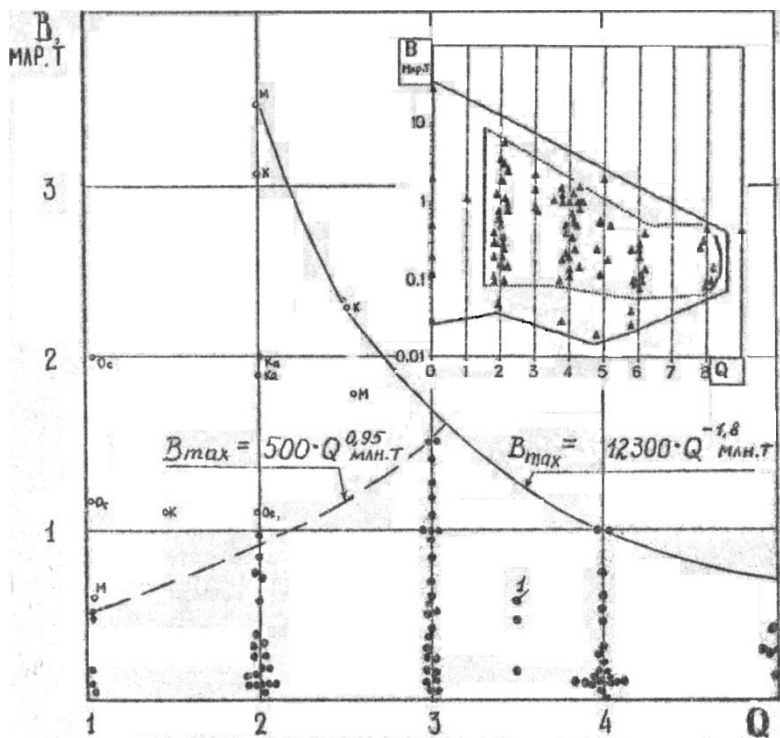


Рис. 10.1. Изменение запасов руды (B) в железорудных месторождениях в зависимости от величины суммарного теплового потока (Q). Месторождения: М - магматогенные, Ка - карбонатитовые, Ос - осадочные, К - железистых кварцитов, l - метасоматические.

- в 2 раза - для рудовмещающих пород: гнейсов + кварцитов;
- в 3 раза - для рудовмещающих пород: туфов + песчаников + известняков;
- в 4 раза - для рудовмещающих пород: известняков + доломитов.

Оказалось, что существует взаимосвязь между средним размером ребра в кристаллической решётке минералов рудовмещающих пород и степенью уменьшения наибольших запасов руды в кластерах (рис. 10.2). Она описывается уравнением:

$$Y = 2.5P - 4.8; \text{ при } 2,5 \leq P \leq 4 \text{ \AA}, \quad (10.4)$$

где Y - степень уменьшения наибольших запасов руды;
 P - средний размер ребра в кристаллической решётке минералов рудовмещающих пород, в \AA . (Для силикатов $P = 2.55 \text{\AA} \div 2.8 \text{\AA}$, для карбонатов $P = 3 \text{\AA} \div 4 \text{\AA}$ [Г.С.32I, С.340]).

Такая связь свидетельствует о влиянии на внутрирудную миграцию железа межатомного расстояния в нерудных минералах, наряду с другими факторами.

10.2. Влияние теплового потока на содержание железа в руде

Влияние суммарного теплового потока (Q) на среднее содержание железа в рудах (Fe) изучалось на диаграмме $Q-Fe$ (рис.10.3). Все железорудные месторождения Сибири, в зависимости от величины Q и среднего содержания железа, на диаграмме образуют один кластер. В общем, происходит

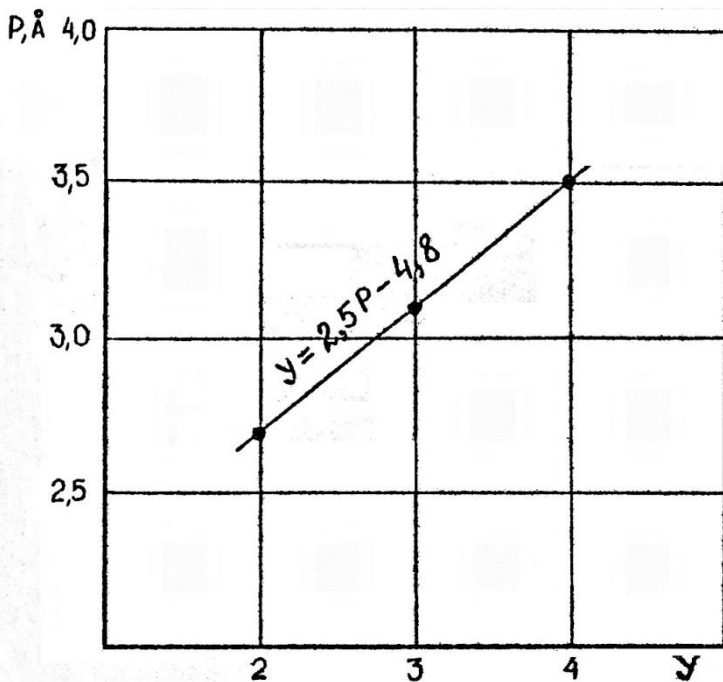


Рис. 10.2. Взаимосвязь между средним размером ребра (P) в кристаллической решётке минералов рудовмещающих пород и степенью уменьшения (Y) наибольших запасов руды в кластерах.

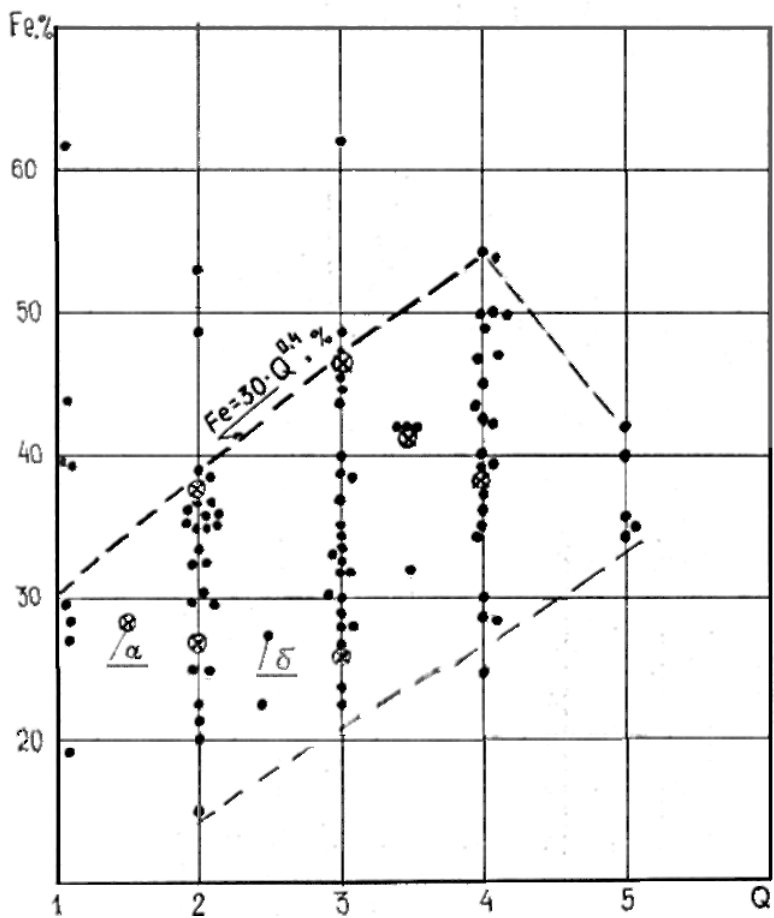


Рис. 10.3. Взаимосвязь между суммарным тепловым потоком (Q) и содержанием железа (Fe) в рудах: α) железные кварциты; δ) руды другого генезиса.

рост содержания железа по мере увеличения суммарного теплового потока.

Наибольшее значение среднего содержания железа соответствует следующей формуле:

$$Fe=30Q^{0,40},\%, \text{ при } 2 \leq Q \leq 4. \quad (10.5)$$

При $Q > 4$ наблюдается уменьшение наибольшего содержания железа, что обусловлено его интенсивным выносом при достижении высоких значений суммарным тепловым потоком. Это напоминает выщелачивание кварца на золоторудных месторождениях [51, с.171].

В зависимости от состава рудовмещающих отложений, месторождения на диаграмме формируют кластеры. В них достаточно чётко просматривается влияние суммарного теплового потока на среднее содержание железа в рудах. При $2 \leq Q \leq 4$ происходит рост содержания железа по мере увеличения суммарного теплового потока.

10.3. Влияние теплового потока на содержание в руде серы, фосфора, марганца и титана

Изменение среднего содержания серы в рудах (S) под воздействием суммарного теплового потока было выявлено на диаграмме Q-S. Все месторождения образуют один кластер, в котором наибольшее значение среднего содержания серы увеличивается по мере роста суммарного теплового потока. В кластере наблюдается разброс содержания серы в сторону ее больших значения. Это, вероятно, обусловлено разными источниками серы. Наиболее плотная нижняя часть кластера, содержащая 75% всех мес-

торождений, сверху ограничена кривой (рис.10.4, 10.6):

$$S=0,1Q^{1,7},\%, \quad \text{при } 1 \leq Q \leq 5. \quad (10.6)$$

В зависимости от состава рудовмещающих пород выделяются кластеры меньших размеров.

Изменение содержания фосфора (P) в общем, связано с тепловым потоком (Q). Однако, по мере увеличения суммарного теплового потока (при $3 \leq Q \leq 5$), наблюдается уменьшение наибольшего содержания фосфора (рис. 10.5).

Наиболее чётко обратная взаимосвязь прослеживается для месторождений мезозойского возраста (при $1 \leq Q \leq 4$). Кластер месторождений, локализованных в карбонатно-терригенных толщах и вулканитах, сверху также ограничен кривой обратной зависимости Q-P.

Месторождения кембрийского возраста характеризуются ростом содержания фосфора при средних значениях суммарного теплового потока (при $2 \leq Q \leq 4$) и снижением при дальнейшем увеличении теплового воздействия (при $Q > 4$).

На диаграмме Q-Mn (суммарный тепловой поток - содержание марганца) железорудные месторождения образуют кластер. Сверху кластер ограничен кривой с прямой зависимостью содержания марганца от величины теплового воздействия:

$$Mn=0,05Q^2,\%, \quad \text{при } 1 \leq Q \leq 5. \quad (10.7)$$

Наиболее чётко прямая зависимость Q-Mn выявляется при группировке месторождений в зависимости от состава рудовмещающей осадочно-вулканогенной толщи. Но лишь в том случае, если толща содержит карбонатные слои (рис. 10.6).

На диаграмме Q-Ti (суммарный тепловой поток - со-

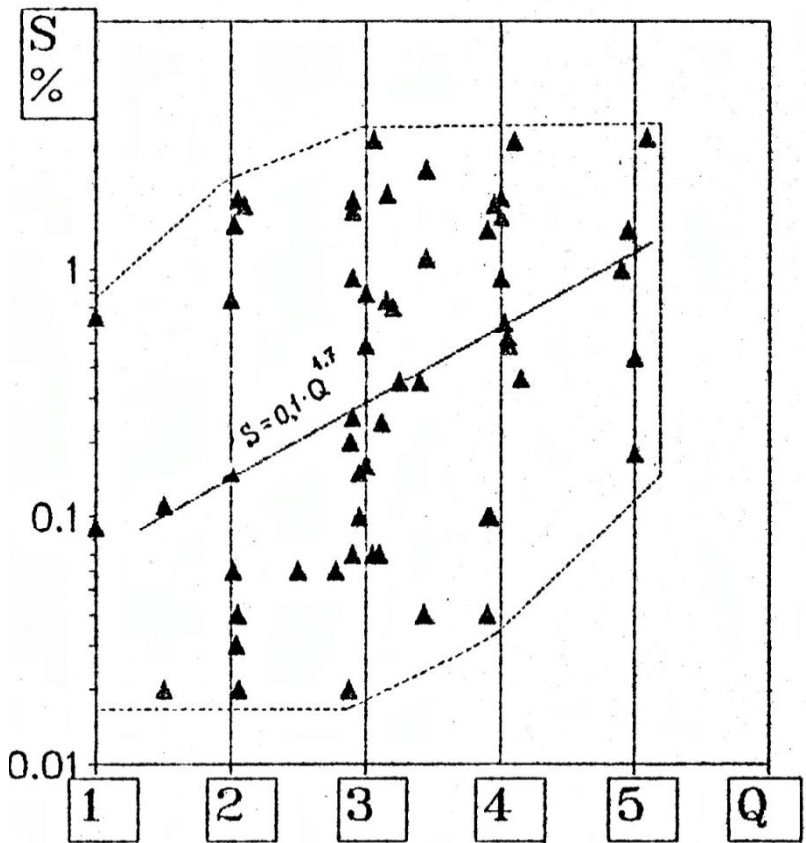


Рис.10.4. Изменение содержания серы в руде в зависимости от величины суммарного теплового потока (Q).

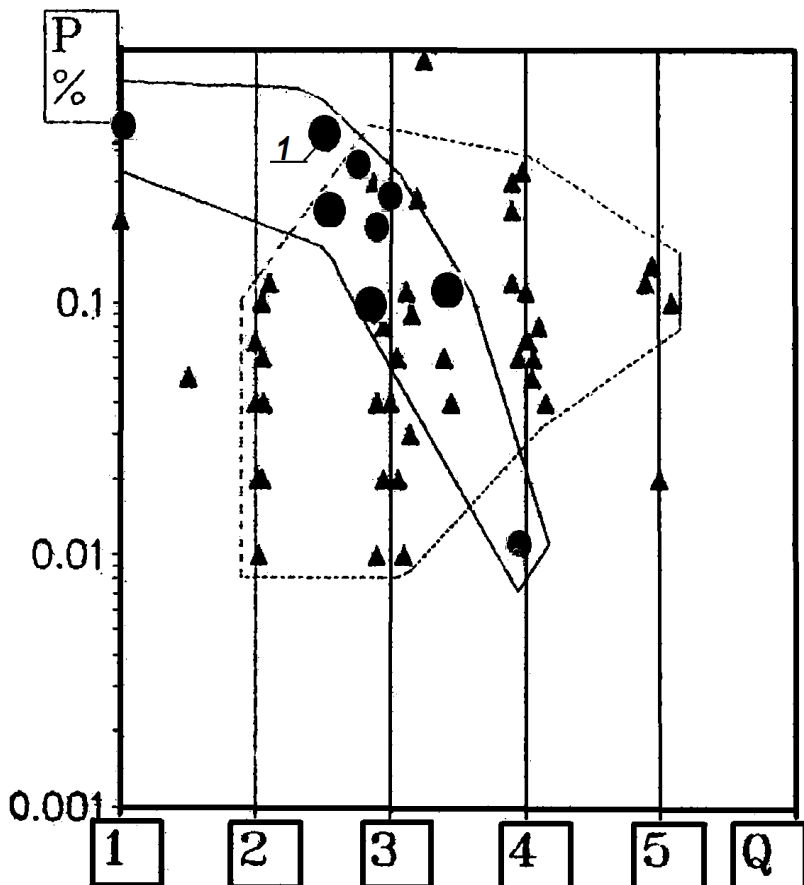


Рис.10.5. Диаграмма "Содержание фосфора - суммарный тепловой поток (Q)".
1 - месторождения мезозойского возраста

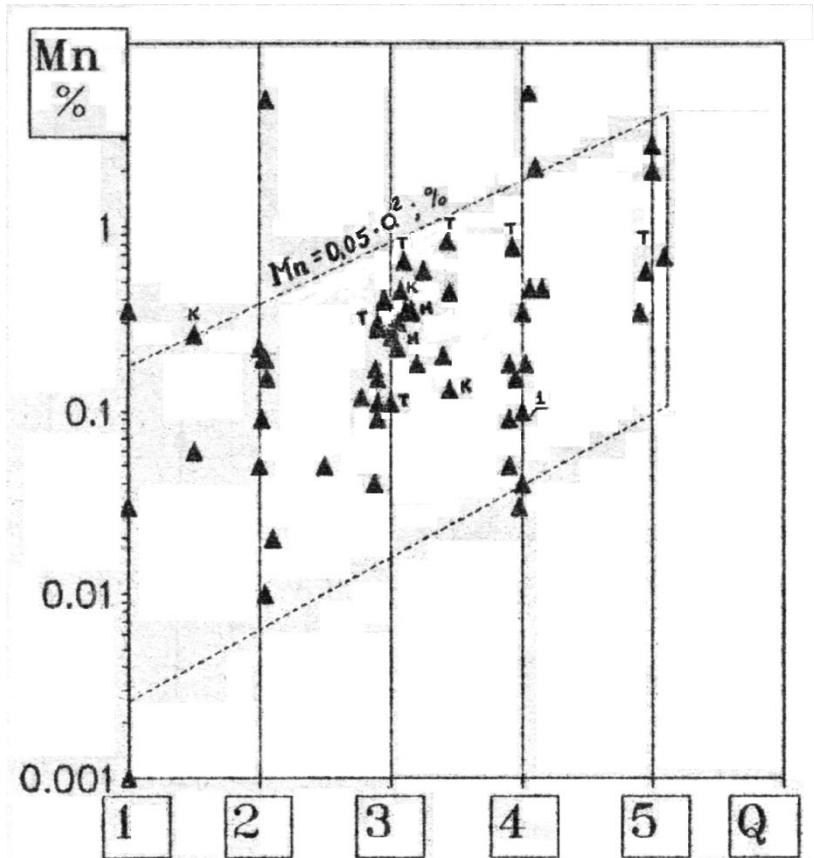


Рис.10.6. Изменение содержания марганца в руде в зависимости от величины суммарного теплового потока (Q). Месторождения: М-магматогенные, К-железистых кварцитов, Т - в терригенной толще, l - в известняково-доломитовой или известняково-терригенной толще

держание титана) месторождения образуют один кластер (рис. 10.7). Наибольшее содержание титана возрастает с увеличением теплового воздействия. Кластер сверху ограничен кривой:

$$Ti=0.15Q^{1.3},\%, \text{ при } 1 \leq Q \leq 4. \quad (10.8)$$

При дальнейшем увеличении теплового воздействия ($Q > 4$) содержание титана резко уменьшается.

10.4. Влияние теплового потока на содержание петрогенных элементов в руде

Для следующих петрогенных элементов (Si, Mg, Al, Ca) отсутствует связь между их содержанием и суммарным тепловым потоком. Это, вероятно, обусловлено тем, что они слагают минеральный каркас, при разрушении которого элементы освобождаются пропорционально их первоначальному содержанию.

Однако в том случае, если в руде присутствует в основном один петрогенный элемент, его изменение определяется величиной суммарного теплового потока. Например, в железистых кварцитах (рис. 10.8):

$$\text{при } Q=2 \rightarrow SiO_2 = 50\%,$$

$$Q=3 \rightarrow SiO_2 = 30\%,$$

$$Q=4 \rightarrow SiO_2 = 15\%.$$

10.5. Изменение месторождения под воздействием магматических инъекций

Выявленная нами связь между суммарным тепловым потоком с одной стороны, и запасами руд, содержанием не-

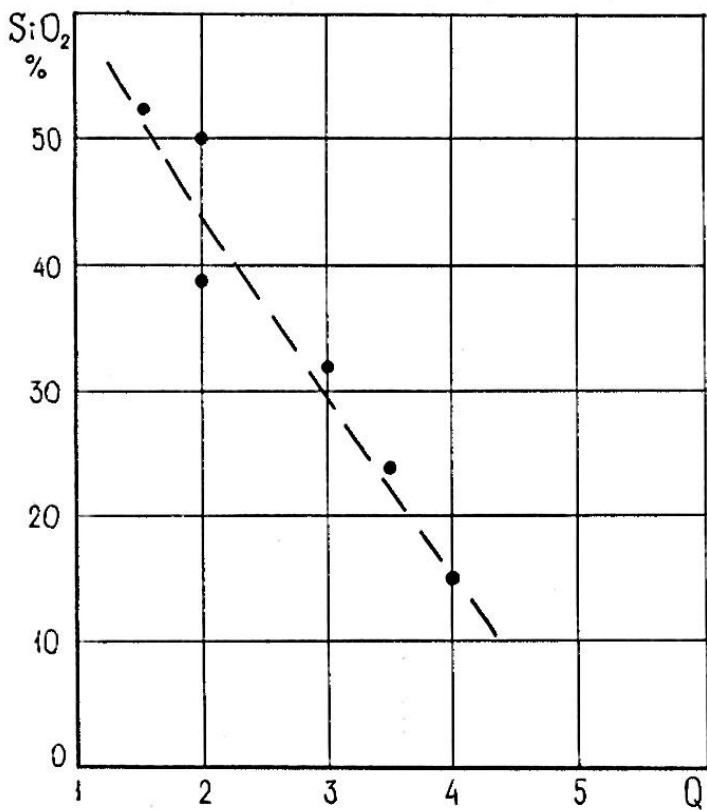


Рис.10.8. Изменение содержания кремнезёма в месторождениях железистых кварцитов под воздействием величины суммарного теплового потока (Q)

которых химических элементов с другой стороны, свидетельствует:

- 1) о пострудном изменении месторождения;
- 2) о несомненном влиянии на данный процесс суммарного магматического воздействия;
- 3) об образовании железорудными месторождениями относительно непрерывного ряда по закономерному изменению некоторых параметров (запасов руд, содержания железа, серы, фосфора, марганца и титана) в зависимости от величины магматического воздействия.

Основным действующим фактором пострудных магматических инъекций несомненно является тепловой поток (Q). Докажем это. С ростом величины Q происходит уменьшение величины месторождения (см. рис.10.1). Это сопровождается увеличением содержания железа (см. рис. 10.3). Исследователи некоторых железорудных месторождений отмечают пострудную ремобилизацию железа. Например, Таштагольское месторождение "...считается контактово-метасоматическим, относится к вулканогенно-осадочным, метаморфизированным при внедрении интрузий с улучшением качества руды, образованием скарнов и вторичных жильных рудных скоплений" [91, с.157]. Наиболее вероятная причина одновременного уменьшения величины месторождения и роста содержания железа - это конкреционно-метасоматический процесс, действовавший в пострудном этапе развития месторождения.

Движущей силой конкреционно-метасоматического процесса выступает тепловая энергия внедрившейся магмы. При сверхкритических значениях теплового воздействия проис-

ходит снижение содержания фосфора, титана, железа. Это сопровождается незначительным увеличением объёма месторождения (при $Q > 4$).

При констатации теплового воздействия возникает вопрос о влиянии вещества пострудной магмы на состав железных руд. Уменьшение объёма рудных тел в два раза сопровождается повышением содержания химических элементов в руде в меньшей степени:

железа - в 1,2 раза (в железистых кварцитах)

титана - в 1,47 раза (в железистых кварцитах)

марганца - в 1,33 раза (в железистых кварцитах).

Из этого следует, что нет необходимости для железорудных месторождений искать дополнительные источники обогащения руды элементами, кроме ранее возникших руд. Тем не менее эти элементы приносились пострудной магмой. Но их привнос из данного источника был во много раз меньше поступления за счёт ремобилизации из руд. Поэтому можно в данном случае пренебречь магматическим источником основных рудогенных элементов.

Если в качестве основного внешнего фактора пострудного изменения месторождения выступает суммарное тепловое воздействие среды, то основной внутренней управляющий параметр следует искать на атомарном уровне, и вот почему.

Мы ранее отметили корреляцию между размером ребра в кристаллической решётке минералов рудовмещающих пород и степенью уменьшения запасов руды (см. п. 10.1, рис. 10.2 и формулу (10.6)). Повышение содержания железа, титана и

марганца, при уменьшении объёма месторождения в 2 раза, коррелируется с атомным радиусом этих элементов (рис.10.9). Обратим внимание на сопряжённое изменение запасов руды и среднего содержания некоторых химических элементов в месторождении (рис. 10.10). Причина этого кроется в том, что при пострудном преобразовании месторождения запасы руды и содержание рудогенных элементов контролируются суммарной величиной теплового потока. Такая сопряжённость позволяет вести генетический анализ информации по запасам руды и содержанию рудогенных элементов, без оценки суммарного теплового потока.

10.6.Основные выводы по главе "Изменение железорудного месторождения за счёт пострудного магматического воздействия

1. В железорудных месторождениях существует взаимосвязь четырёх параметров: теплового потока, запасов руды, содержания рудогенных элементов, атомных параметров рудо- и петрогенных элементов.

2. Запасы железистых кварцитов возрастают при увеличении суммарного теплового потока от 1 до 2, а затем снижаются. Запасы руды в метасоматических месторождениях растут по мере увеличения суммарного теплового потока от 1 до 3, а затем резко уменьшаются.

3. Первоначальное увеличение запасов руды по мере роста теплового воздействия среды объясняется мобилизацией рудного вещества из рудогенного массива. Последующее снижение запасов руды при дальнейшем росте теплового

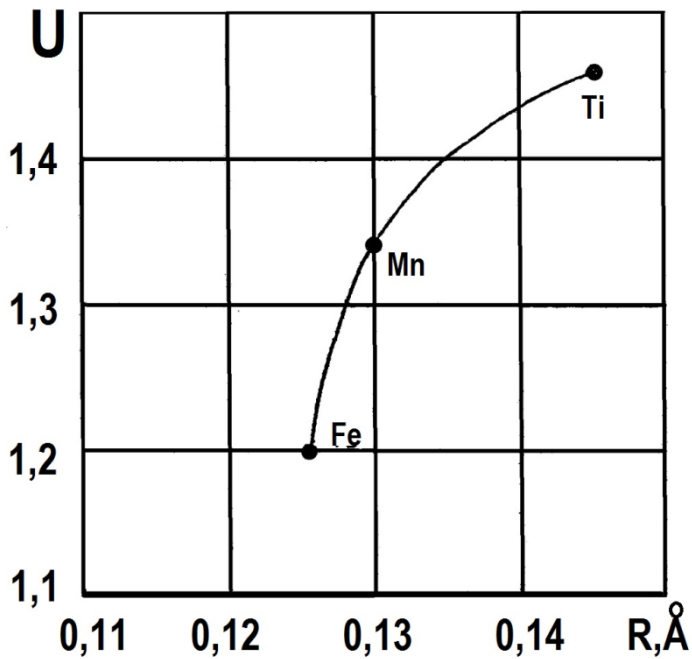


Рис. 10.9. Взаимосвязь между повышением содержания металлов в железистых кварцитах и их атомным радиусом в ходе уменьшения объема месторождения в 2 раза.

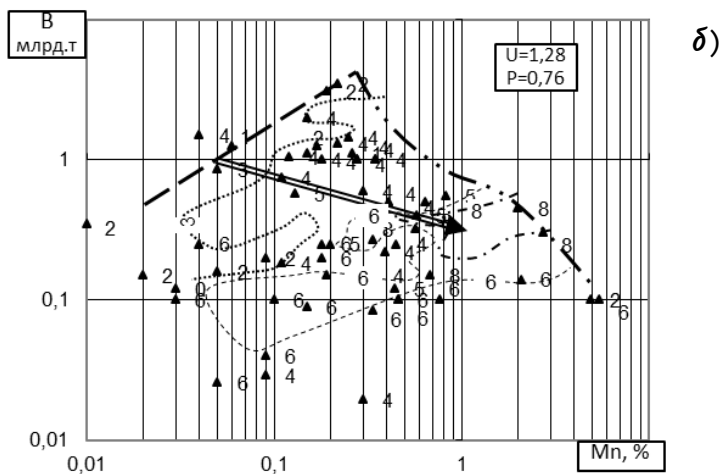
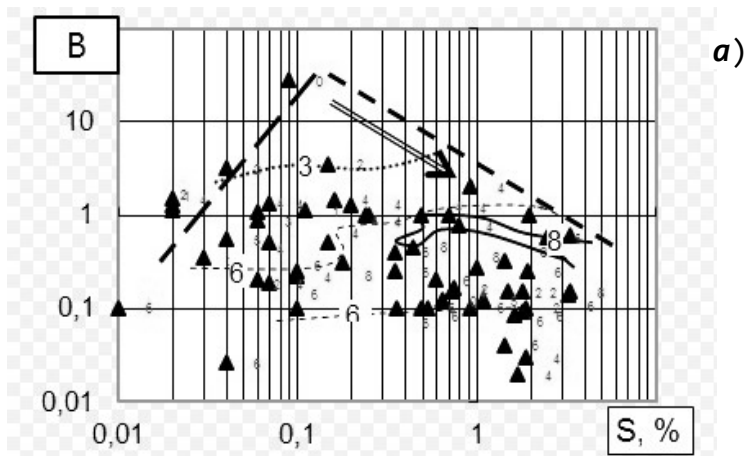


Рис.10.10. Сопряжённое изменение запасов руды (B), среднего содержания серы (S), марганца (Mn) в руде под воздействием суммарного теплового потока (показан изолиниями).

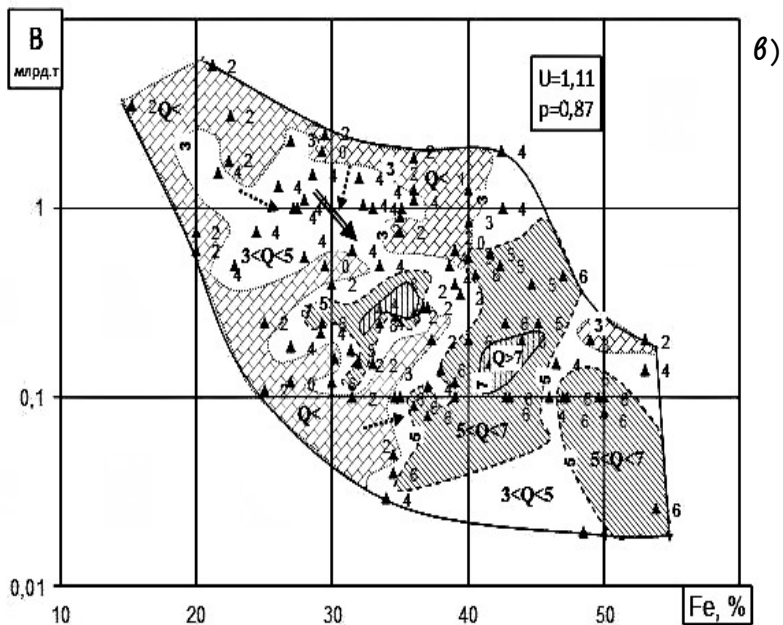


Рис.10.10(б).Сопряжённое изменение запасов руды (В) и среднего содержания железа в руде под воздействием суммарного теплового потока (Q), показанного изолиниями .

воздействия среды обусловлено разрушением окраин месторождения.

4. Чем меньше размер ребра в кристаллической решётке рудовмещающих пород, тем медленнее разрушается месторождение. Здесь очевидна роль твёрдофазной диффузии в миграции рудных элементов.

5. Содержание железа в руде возрастает при увеличении суммарного теплового потока от 2 до 4. А затем, при дальнейшем росте теплового воздействия, максимальное содержание железа снижается, а минимальное содержание продолжает увеличиваться.

6. Содержание серы и марганца возрастает по мере увеличения теплового воздействия среды. Это свидетельствует о мобилизации серы и марганца из гигантского резервуара и о высокой их подвижности.

7. Содержание фосфора в месторождениях мезозойского возраста уменьшается по мере роста суммарного теплового воздействия от 2 до 4.

8. Содержание титана возрастает по мере увеличения суммарного теплового потока от 1 до 4, а затем резко снижается.

9. Содержание кремнезёма снижается с ростом величины суммарного теплового потока.

10. Под действием теплового потока величина месторождения уменьшается, а содержание рудогенных элементов возрастает. Степень увеличения содержания титана, марганца и железа контролируется их атомным объёмом: содержание рудогенного элемента возрастает тем в большей степени, чем

крупнее его атом. Причина этого в большей скорости твердофазной диффузии у более крупных атомов. В этом заключается эффект величины атома в ходе его диффузии, впервые установленный автором (см. п.13.6).

Глава 11. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ АТОМА РУДОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА АДАПТАЦИЮ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

11.1. Роль атомных параметров элементов в формировании качества руды

Наибольшее содержание химического элемента в железной руде определяется формулой вида (см. п.п. 10.2, 10.3):

$$K = K_0 Q^x, \quad (11.1)$$

где K – содержание рудогенного элемента;

Q – количество теплового воздействия, баллы;

K_0 – содержание химического элемента в руде, не перенёшем воздействия магматического тепла (в осадочном месторождении);

x – показатель степени.

В результате выполненного анализа установлено, что показатель степени является функцией атомного радиуса (R) химического элемента, содержащегося в руде, и его электроотрицательности (F):

$$x = kF/R \quad (11.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависит от метода расчёта электроотрицательности элемента.

В зависимости от метода расчёта электроотрицательности коэффициент корреляции между показателем степени (x) и отношением F/R меняется от 0,5 до 0,7. Наибольшее значение достигается при учёте валентности соединений элемента (табл. 11.1).

Значения электроотрицательности (F) взяты по Полингу (для графы 4), по Поваренных (для графы 6), из

"Справочника" [188], и вычислены по следующей формуле:

$$F = \frac{V}{4R}, \quad (11.3)$$

где F - величина электроотрицательности;

V - валентность химического элемента;

R - атомный радиус элемента.

Таким образом, содержание химического элемента в руде описывается уравнением следующего вида:

$$LgK = LgK_0 + kF/R \cdot LgQ, \quad (11.4)$$

где LgK - логарифм наибольшего содержания рудогенного элемента;

LgK_0 - логарифм содержания элемента в руде, не перенёшем воздействия магматического тепла;

Таблица 11.1

Взаимосвязь показателя степени (x)
с отношением F/R (см. формулы 11.1, 11.2)

Химический элемент	x	Радиус R	Отношение F/R и коэф. корреляц. r							
			F/R	r	F/R	r	F/R	r	F/R	r
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mn	2	1.3	1.23	0.5	9.2	0.6	0.59	0.7	0.61	0.5
Fe	0.4	1.26	1.27		7.1		0.39		1.42	
S	1.7	1.04	2.4		11.5		0.53		2.5	
Ti	1.3	1.45	1.06		6.4		0.36		1.03	
Ca	0.84	1.97	0.51		3		0.13		0.51	
Si	1.4	1.34	1.42		8.4		0.56		1.42	

Q - количество тепла;

- F - электроотрицательность элемента;
R - радиус атома элемента;
k - коэффициент, зависящий от метода расчёта электроотрицательности.

Формула (11.2) эмпирическая и включает в себя как скорость миграции химического элемента, так и устойчивость его минералов. Очевидно, что вероятность нахождения элемента в связанном состоянии возрастает с увеличением электроотрицательности его иона. Из формулы (11.4) следует, что электроотрицательность и атомный радиус влияют на качество руды по разному. И вероятность нахождения элемента в связанном состоянии возрастает с уменьшением его атомного радиуса. Поэтому, с ростом F и со снижением величины R, увеличивается и содержание (K) элемента в руде.

Согласно уравнению Стокса-Эйнштейна коэффициент диффузии возрастает с увеличением температуры и с уменьшением радиуса диффундирующей частицы. Однако формула (11.4) позволяет говорить о снижении скорости диффузии атома по мере уменьшения его размера.

11.2. Сопряжённое изменение запасов и качества руд цветных металлов

Для 23 геолого-промышленных типов зарубежных рудных месторождений изучалась сопряжённость запасов руды и содержания рудогенных элементов. Была проанализирована необходимая информация по 572 месторождениям.

Информация была представлена на диаграммах *запасы*

руды-содержание рудогенного элемента, по типам месторождений.

Меднопорфировые месторождения с вероятностью 0,98 образуют кластер, который сверху ограничен двумя линиями (а и б) (рис. 11.1):

- а) прямой зависимости запасов руды от содержания меди;
- б) обратной зависимости.

Анализ, выполненный отдельно для Северо-Американского и для других районов, показал, что положение линии "а" зависит от степени промышленной освоенности региона. В более освоенном Северо-Американском регионе линия "а" смещается влево, в сторону более бедных руд.

В зависимости от состава рудогенной толщи месторождения образуют кластеры меньших размеров. В них достаточно чётко прослеживается как прямая зависимость (в монцонитах, диоритах, грано-диоритах), так и обратная зависимость (в монцонитах, грано-диоритах). В общем, по меднопорфировым месторождениям уменьшение объёма месторождения в 2 раза приводит к росту содержания меди в рудах в 1,28 раза.

Осадочные месторождения меди с вероятностью 0,72 образуют кластер **А**. В нем чётко прослеживается прямая связь между содержанием меди и величиной месторождения. Если в кластер **Б** включить все месторождения, то прослеживается обратная связь. Уменьшение объёма месторождения в 2 раза приводит к росту содержания меди в рудах в 1,5 раза (рис. 11.2).

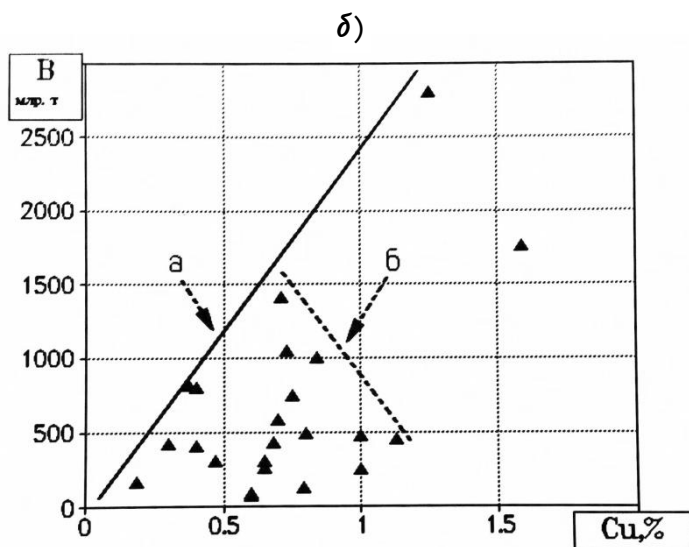
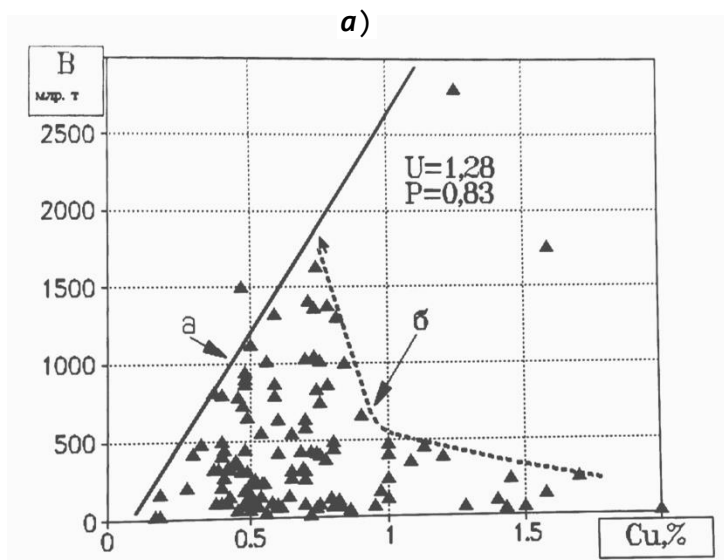


Рис11.1. Сопряжённое изменение запасов руды (В) и содержания меди в меднопорфировых месторождениях: а-все месторождения; б-в монзонитах.

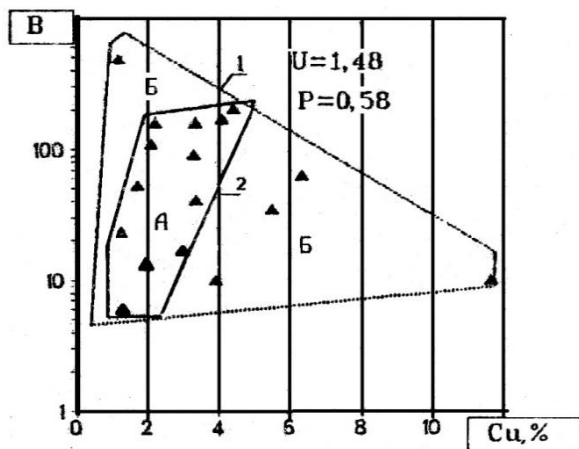


Рис. 11.2. Диаграмма "Запасы руды-содержание меди" в осадочных месторождениях. 1-граница кластера Б, 2-граница кластера А.

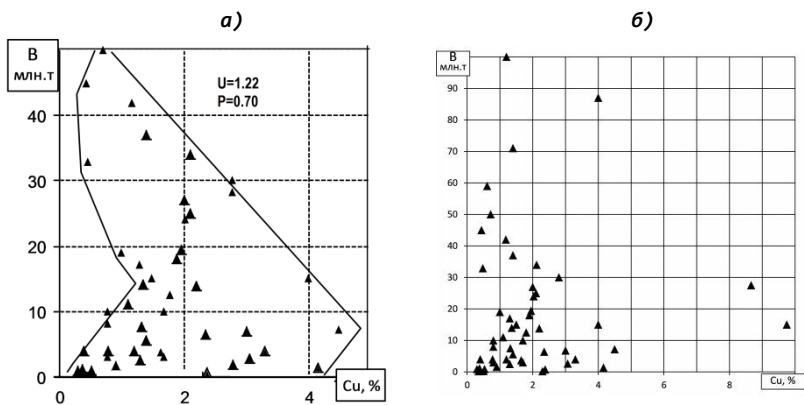


Рис. 11.3. Диаграмма "Запасы руды-содержание меди" в колчеданных месторождениях палеозойского возраста, а-мелкие, б-с крупными месторождениями.

Колчеданные месторождения меди палеозойского возраста с вероятностью 0,93 образуют кластер z -образной формы. В связи со сложной морфологией кластера степень роста содержания меди невозможно определить точно (рис. 11.3).

Колчеданные месторождения меди докембрийского возраста с вероятностью 0,90 образуют кластер, сверху ограниченный кривой обратной зависимости. При уменьшении размера месторождения в 2 раза содержание меди возрастает в 1,47 раза (рис. 11.4).

Скарновые месторождения меди образуют 2 кластера. В кластере А (при $Cu < 1,2\%$) достаточно чётко прослеживается обратная зависимость между содержанием меди и запасами руды. Уменьшение объёма месторождения в 2 раза приводит к росту содержания меди также в 2 раза. В кластере Б чётко видна прямая связь между содержанием меди и запасами руды (рис. 11.5).

Медноникелевые жильные месторождения образуют 2 кластера с обратной зависимостью между содержанием меди и запасами руды (рис. 11.6). В кластере А (при $Cu < 2,5\%$) с уменьшением объёма рудных тел в 2 раза содержание меди возрастает в 1,3 раза. В кластере Б уменьшение объёма жил в 1,15 раза сопровождается ростом содержания меди в 1,55 раза. Причина, вероятно, заключается в том, что в ходе конкреционно-метасоматического процесса отдельные жилы теряют часть металла (кластер А). В то же время на месторождениях, сложенных множеством жил, конкреционно - метасоматический процесс сопровождается увеличением со-

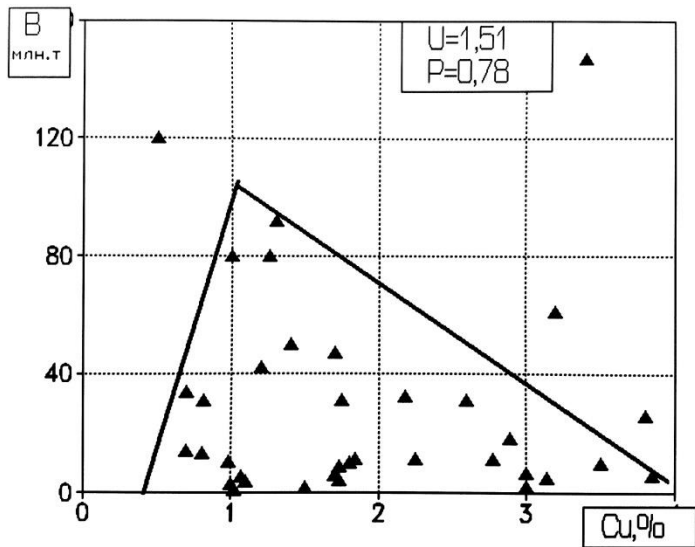


Рис.11.4.Сопряженное изменение запасов руды (В) и содержания меди в колчеданных месторождениях докембрийского возраста .

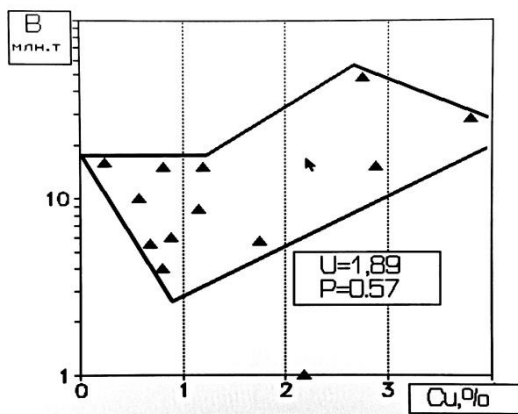


Рис.11.5.Сопряженное изменение запасов руды (В) и содержания меди в скарновых месторождениях меди .

держания меди. Другими словами, на более крупных месторождениях рост теплового потока приводил к поступлению из нижних этажей новых порций рудогенных элементов.

Колчеданные месторождения свинца палеозойского возраста с вероятностью 0,92 образуют 2 кластера (рис.11.7). Кластер А (содержание $Pb < 5\%$) сверху ограничен линией обратной связи между содержанием свинца и запасами руды. Уменьшение объёма рудных тел в 2 раза сопровождается ростом содержания свинца в 1,80 раза. В кластере Б, куда входят 40% всех месторождений, снижение объёма месторождения в 2 раза приводит к росту содержания свинца в 1,87-1,90 раза.

Колчеданные месторождения свинца докембрийского возраста с вероятностью 0,89 входят в кластер, перекрывающий кластер Б из предыдущей диаграммы (рис. 11.8). Уменьшение объёма месторождения в 2 раза приводит к росту содержания свинца в 1,7-2,6 раза (в среднем в 2,16 раза). Такой значительный рост содержания свинца обусловлен поступлением извне новых порций рудогенных растворов в результате конкреционно-метасоматического процесса.

Колчеданные месторождения цинка палеозойского возраста образуют 2 кластера (рис.11.9). В кластере А, где точки расположены достаточно плотно, снижение объёма месторождения в 2 раза вызывает рост содержания цинка в 1,6 раза. В кластере Б, включающем в себя и кластер А, при уменьшении объёма месторождения в 2 раза содержание цинка возрастает в 1,58 раза.

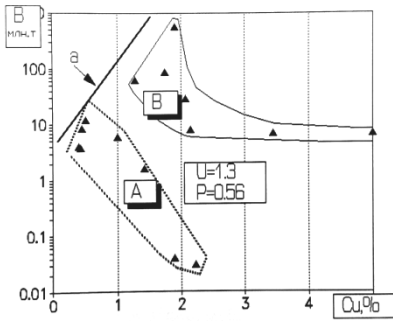


Рис.11.5.Сопряженное изменение запасов руды (В) и содержания меди в медно-никелевых месторождениях: *a*-линия прямой связи; **A, B**-кластеры.

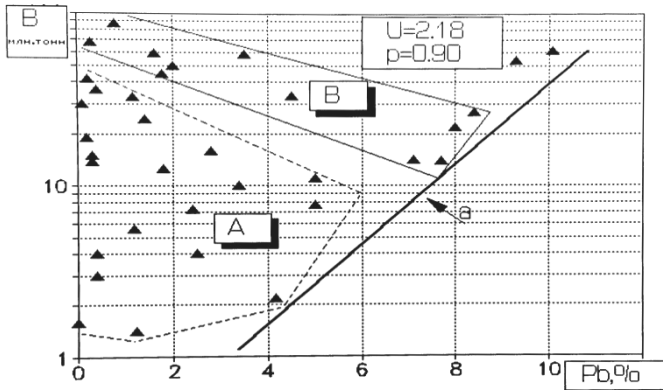


Рис.11.7.Сопряженное изменение запасов руды (В) и содержания свинца в колчеданных месторождениях палеозойского возраста .

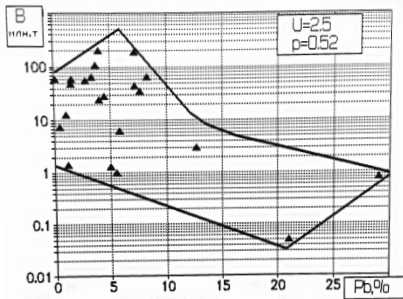


Рис.11.8. Диаграмма "Запасы руды (В) - содержание свинца в колчеданных месторождениях докембрийского возраста .

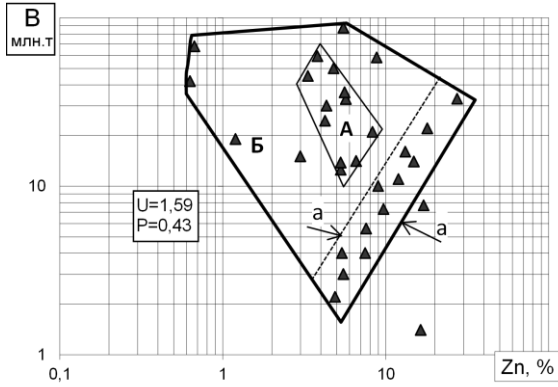


Рис.11.9. Диаграмма "Запасы руды (В) - содержание цинка" в колчеданных месторождениях палеозойского возраста

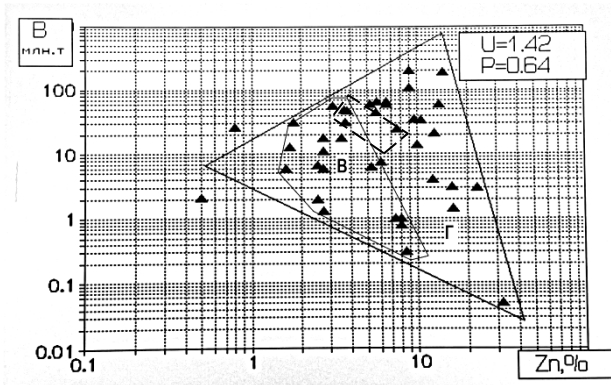


Рис.11.10. Диаграмма "Запасы руды (В) - содержание цинка" в колчеданных месторождениях докембрийского возраста

Обращает на себя внимание тот факт, что кластер А из месторождений палеозойского возраста занимает свободное поле внутри кластера Г для месторождений докембрийского возраста (рис. 11.10).

Колчеданные месторождения цинка докембрийского возраста образуют кластеры В и Г. При уменьшении запасов месторождения в 2 раза содержание цинка возрастает в 1,42 раза.

Субгеосинклинальные месторождения свинца и цинка. На диаграмме запасы руды-содержание свинца месторождения образуют кластер, где с вероятностью 0,9 прослеживается обратная связь между запасами руды и содержанием свинца (рис. 11.11). При уменьшении размеров месторождения в 2 раза содержание свинца возрастает в 2,56 раза. Это свидетельствует о поступлении металла в месторождение в ходе конкреционно-метасоматического процесса.

На диаграмме запасы руды-содержание цинка месторождения образуют кластер с обратной связью между параметрами (рис.11.12). Снижение запасов в 2 раза вызывает увеличение содержание цинка в 2,28 раза.

Жильные месторождения свинца и цинка. На диаграмме запасы руды-содержание свинца месторождения образуют 2 кластера. Вдоль линии "а" (рис. 11.13), соединяющей кластеры, уменьшение месторождения в 2 раза вызывает рост содержания свинца в 2,22 раза.

На диаграмме запасы руды-содержание цинка кластер В входит в кластер Г. В последнем, с уменьшением месторождения, возрастает и содержание цинка (от 5% до 9%).

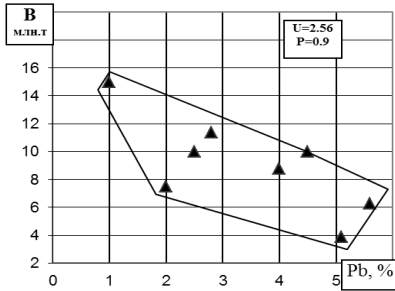


Рис.11.11. Диаграмма "Запасы руды (В) – содержание свинца" в субгеосинклинальных месторождениях.

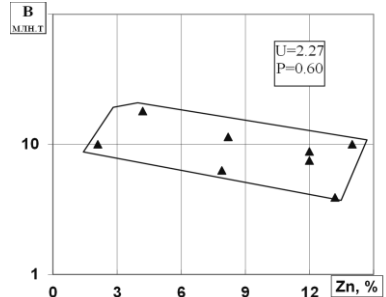


Рис.11.12. Диаграмма "Запасы руды (В) – содержание цинка" в субгеосинклинальных месторождениях.

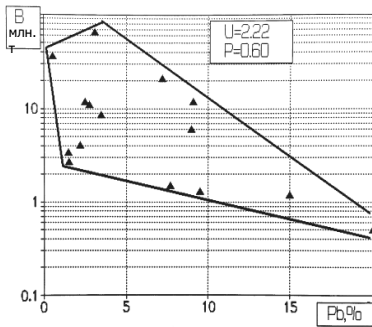


Рис.11.13. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание свинца" в жильных месторождениях.

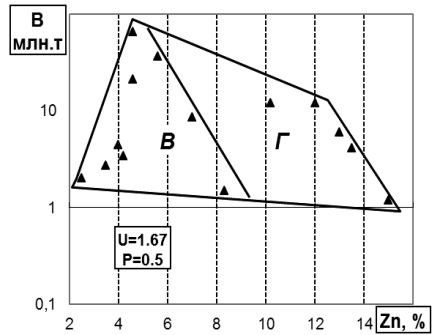


Рис.11.14. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание цинка" в жильных месторождениях.

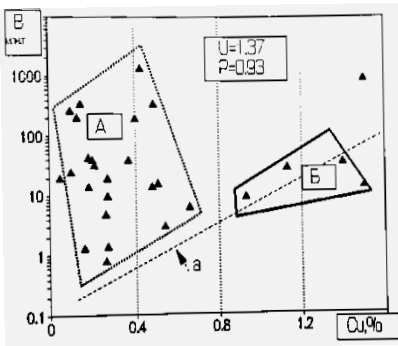


Рис.11.15. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание меди" в сульфидных никелевых месторождениях.

В кластере **В** прослеживается обратная связь: снижение объёма месторождения в 2 раза приводит к росту содержания цинка в 1,67 раза (рис.11.14).

Месторождения сульфидных никелевых руд. На диаграмме запасы руды-содержание меди, в кластере А прослеживается обратная зависимость: уменьшение величины месторождения в 2 раза сопровождается увеличением содержания меди в 1,37 раза. Для кластера Б характерна прямая зависимость между параметрами (рис.11.15).

На диаграмме запасы руды-содержание никеля все месторождения образуют кластер В, включающий кластеры А и Б. Здесь невозможно определить взаимосвязь между параметрами в связи со значительным разбросом точек и их неравномерным расположением (рис. 11. 16).

Месторождения силикатных никелевых руд кор выветривания. На диаграмме запасы руды-содержание никеля месторождения с вероятностью 0,97 образуют кластер. Вдоль линии "а" уменьшение запасов руды в 2 раза вызывает рост содержания никеля в 1,15 раз (рис.11. 17).

На диаграмме запасы руды-содержание кобальта месторождения разбросаны относительно равномерно, поэтому заметная связь между параметрами отсутствует (рис.11.18).

Силикатные и сульфидные месторождения олова с вероятностью 0,65 образуют кластер А с достаточно чёткой обратной связью между параметрами. При уменьшении запасов месторождения в 2 раза содержание олова возрастает в 1,82 раза (рис. 11.19).

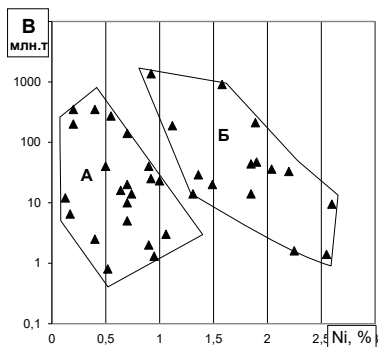


Рис.11.16. Диаграмма "Запасы руды (B)-
содержание никеля" в сульфидных
никелевых рудах.

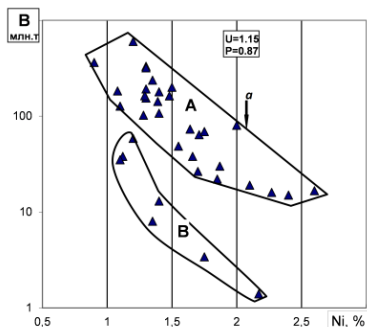


Рис. 11.17. Диаграмма "Запасы руды (B) -
содержание никеля" в месторождениях
силикатных кор выветривания.

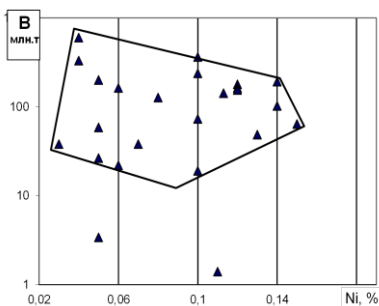


Рис.11.18.Диаграмма "Запасы руды (B)-
содержание кобальта" в месторождениях
силикатных кор выветривания.

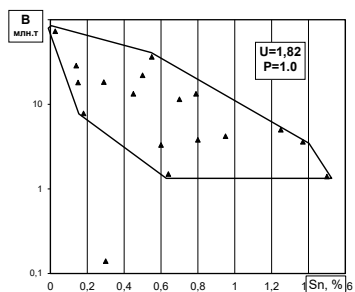


Рис.11.19.Диаграмма "Запасы руды (B)-
содержание олова" в силикатных и
сульфидных месторождениях.

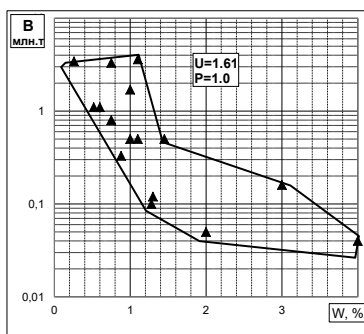


Рис.11.20. Диаграмма "Запасы руды (B)-
содержание вольфрама" в жильных
месторождениях.

Жильные месторождения вольфрама образуют кластер А, который входит в кластер В. При уменьшении объёма месторождения в 2 раза содержание вольфрама возрастает в 1,61 раза (рис. 11.20).

Скарновые месторождения вольфрама образуют кластеры А и Б, которые сверху ограничены линиями "а" и "б", с достаточно чёткой прямой связью между параметрами (рис. 11.21).

Штокверковые месторождения молибдена образуют кластеры А и Б (рис. 11.22). Кластер А, образованный меднопорфировыми месторождениями, сверху ограничен линией "а" с обратной зависимостью между параметрами. Уменьшение объёма месторождения в 2 раза приводит к увеличению содержания молибдена в 1,5 раза.

Кластер Б, сформированный штокверковыми месторождениями, сверху ограничен линией "б" с прямой зависимостью между параметрами.

Жильные месторождения молибдена с вероятностью 0,8 образуют кластер А, сверху ограниченный линией "а" с обратной зависимостью между параметрами. При уменьшении месторождения в 2 раза содержание молибдена возрастает в 1,42 раза (рис. 11.23).

Месторождения ртути и месторождения сурьмы не образуют достаточно компактных кластеров с заметной связью между параметрами.

Золоторудные месторождения характеризуются ростом содержания золота по мере уменьшения запасов руд:

для наибольших запасов 900 млн.т содержание золо-

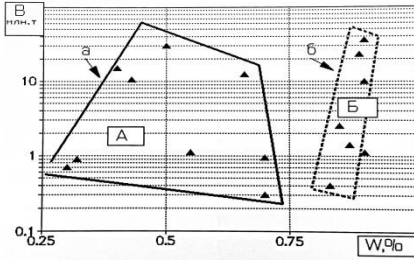


Рис.11.21. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание вольфрама" в скарновых месторождениях.

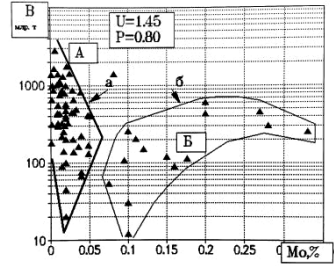


Рис.11.22. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание молибдена" в меднопорфировых (А) и штокверковых месторождениях.

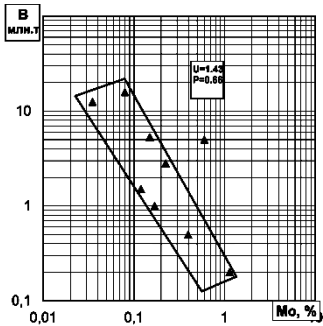


Рис.11.23. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание молибдена" в жильных месторождениях.

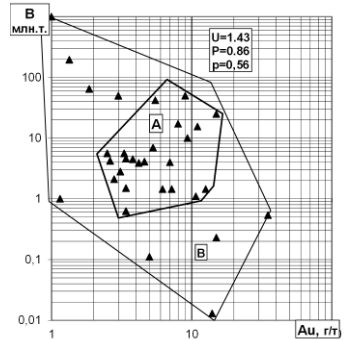


Рис.11.24. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание золота" в золоторудных месторождениях.

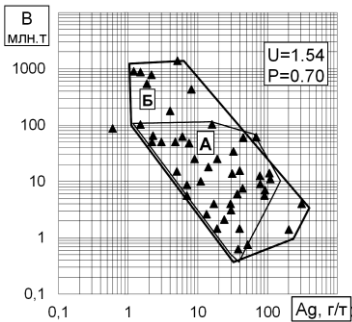


Рис.11.25. Диаграмма "Запасы руды (В)-содержание серебра" в рудных месторождениях разного типа.

та 0,5 г/т;

для наибольших запасов 60 млн.т содержание золота 1,0 г/т;

для наибольших запасов 10 млн.т содержание золота 5,0 г/т.

На диаграмме запасы руды-содержание золота в кластерах А и Б было установлено, что при уменьшении наибольших запасов в 2 раза содержание золота возрастает в 1,43 раза (рис. 11.24).

На диаграмме запасы руды-содержание серебра месторождения образуют кластеры А и Б. Уменьшение размера месторождения в 2 раза приводит к росту содержания серебра в 1,54 раз (рис. 11.25).

11.3. Решающая роль атомного объёма элемента в формировании состава и запасов руда

Полученные при анализе диаграмм результаты сведены в табл.11.2

Достоверность (р) степени увеличения (U) наибольшего содержания рудогенного элемента, вызванного уменьшением месторождения, оценивалась по следующей формуле:

$$P=P_1 \cdot P_2 \cdot \quad (11.5)$$

где p_1 - достоверность за счёт разброса месторождений на диаграмме;

p_2 - достоверность из-за неравномерной скученности месторождений на диаграмме.

Таблица 11.2

Степень увеличения (U) содержания металла
в результате уменьшения запасов руды

Геолого- промышленный тип месторождения	Сте- пень умень- шения (R_{max}) запасов	Хими- чес - кий эле - мент	Увели- чение (U) сод. эле- мента	Досто- вер- ность R для U	Атом- ный радиус (R) эле- мента, пт
1	2	3	4	5	6
1. Низкотемпературные месторождения					
Осадочные	2	Си	1,48	0,58	0,128
Субгеосинклинальные	2	Pb	2,56	0,80	0,174
Субгеосинклинальные	2	Zn	2,27	0,89	0,139
Силикатные, коры выветривания	2	Ni	1,15	0,87	0,124
2. Средне-, высокотемпературные месторождения					
Жильные	2	Mo	1,43	0,66	0,139
Жильные	2	Cu	1,30	0,56	0,128
Жильные	2	Zn	1,67	0,50	0,139
Жильные	2	Pb	2,22	0,60	0,174
Жильные	2	W	1,61	1,00	0,140
Меднопорфировые	2	Cu	1,28	0,83	0,128
Меднопорфировые	2	Mo	1,45	0,80	0,139
Сульфидные	2	Cu	1,37	0,93	0,128
Сульфидные	2	Sn	1,82	1,00	0,158
Колчеданные, палеозой	2	Pb	2,18	0,90	0,174
Колчеданные, палеозой	2	Zn	1,59	0,43	0,139
Колчеданные, палеозой	2	Cu	1,22	0,70	0,128
Колчеданные, докембрий	2	Pb	2,50	0,52	0,174
Колчеданные, докембрий	2	Zn	1,42	0,64	0,139
Колчеданные, докембрий	2	Cu	1,51	0,78	0,128

Продолжение табл. 11.2

1	2	3	4	5	6
Скарновые	2	Си	1,89	0,57	0,128
Золоторудные	2	Au	1,39	0,86	0,144
Золоторудные	2	Au	1,56	0,56	0,144
Золоторудные	2	Ag	1,54	0,70	0,144
Железорудные, крупные (В > 400 млн.т)	2	Mn	1,96	0,50	0,130
Железорудные, мелкие	2	Mn	1,28	0,76	0,130
Железорудные	2	Fe	1,11	0,87	0,126

Достоверность, обусловленная разбросом месторождений на диаграмме, вычислялась по формуле:

$$p_1 = N_2 / (N_1 + n), \quad (11.6)$$

где n - число месторождений правее полосы "а" на диаграмме;

N_1 - число месторождений в полосе "а" с чёткой обратной зависимостью параметров;

N_2 - число месторождений вдоль правой окраины полосы "а".

Достоверность из-за неравномерной скученности месторождений определялась по формуле:

$$p_2 = (L - \ell) / L, \quad (11.7)$$

где L - общая длина полосы "а";

ℓ - длина части полосы "а", равномерно заполненная месторождениями.

Условный коэффициент достоверности (p) позволяет выбирать для дальнейшей обработки наиболее достоверные результаты анализа. Эти результаты подтверждают сопряженное изменение величины месторождения и содержания рудогенных элементов.

Сопряжённость этих параметров свидетельствует о наличии объективной закономерности, управляемой внешними и внутренними факторами. В гл.10 был выявлен главный внешний управляющий фактор - суммарное тепловое воздействие среды на месторождение. Кроме того, в п.11.1 отмечалось воздействие главного внутреннего фактора - величины атома рудогенного элемента.

Поэтому рассмотрим взаимосвязь степени увеличения содержания рудогенных элементов (U) с атомным радиусом этих элементов.

11.4. Фракционирование элементов в зоне рудогенеза по величине их атома

Для оценки роли внутренних факторов в увеличении содержания металла при уменьшении запасов в два раза, строились различные диаграммы. В качестве одного из параметров диаграммы использовалась степень увеличения содержания металла (U) (см.табл.11.2), а другого - электроотрицательность иона, атомный вес, атомный радиус металла. На диаграмму выносились лишь те значения U, условная достоверность которых превышает 0,6 ($p > 0,6$). Оказалось, что степень увеличения содержания металла коррелируется лишь с атомным радиусом (атомным объёмом) металла, а с другими атомными параметрами металла не увязывается. Это подтверждает выводы, сделанные в п.11.1 о влиянии атомного радиуса элемента на скорость его диффузии.

По точкам, соответствующим геолого-промышленным типам месторождений, на диаграмме U-R (степень увеличения

содержания металла - атомный радиус металла) были построены две кривые:

- 1) для низкотемпературных месторождений (рис. 11.26);
- 2) для средне-, высокотемпературных месторождений (рис. 11.27).

Из анализа формы кривых следует:

1. Со снижением величины атома происходит уменьшение величины U . То есть, при уменьшении объёма месторождения вдвое, содержание металла с малым атомным радиусом растёт медленнее, чем содержание металла с большим атомным радиусом;

2. Кривая для низкотемпературных месторождений проходит выше кривой для средне-, высокотемпературных месторождений. Следовательно, при уменьшении объёма месторождения в 2 раза, содержание металла в низкотемпературных месторождениях возрастает в большей степени, чем в средне-, высокотемпературных месторождениях.

Последний вывод свидетельствует о том, что рост температуры ведёт к большим потерям рудогенного элемента из месторождения. Причина этого в увеличении скорости диффузии элементов по мере роста температуры. По этой же причине наблюдается резкое уменьшение содержания железа, марганца и титана при высоких значениях теплового воздействия на месторождение (см. п.п. 10.2, 10.3).

Следовательно, при уменьшении объёма месторождения, часть запасов рудогенного элемента из него выносится. Более интенсивно выносится металл с меньшим атомным

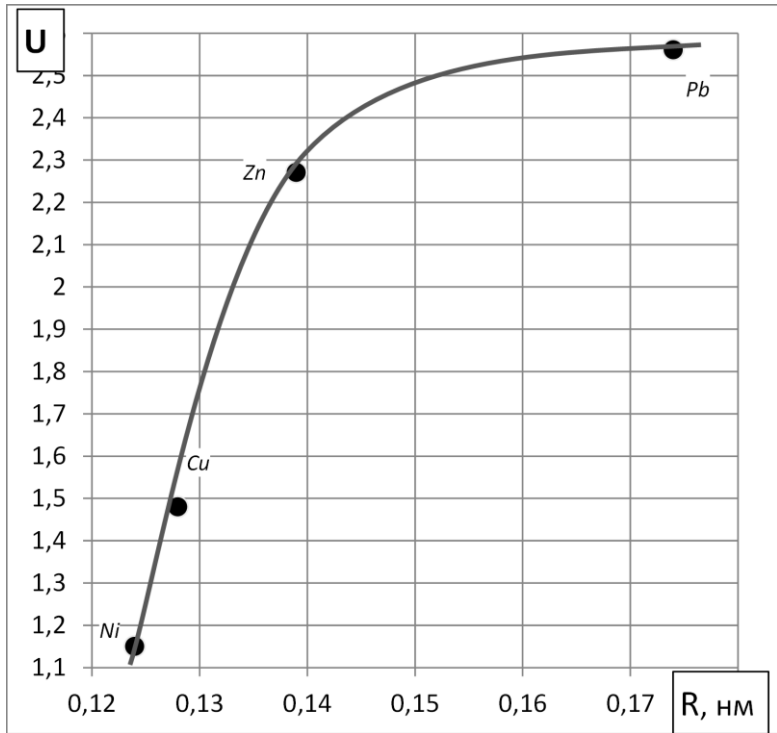


Рис. 11.26. Взаимосвязь между степенью увеличения (U) содержания элементов и их атомным радиусом при уменьшении в 2 раза объёма низкотемпературных месторождений

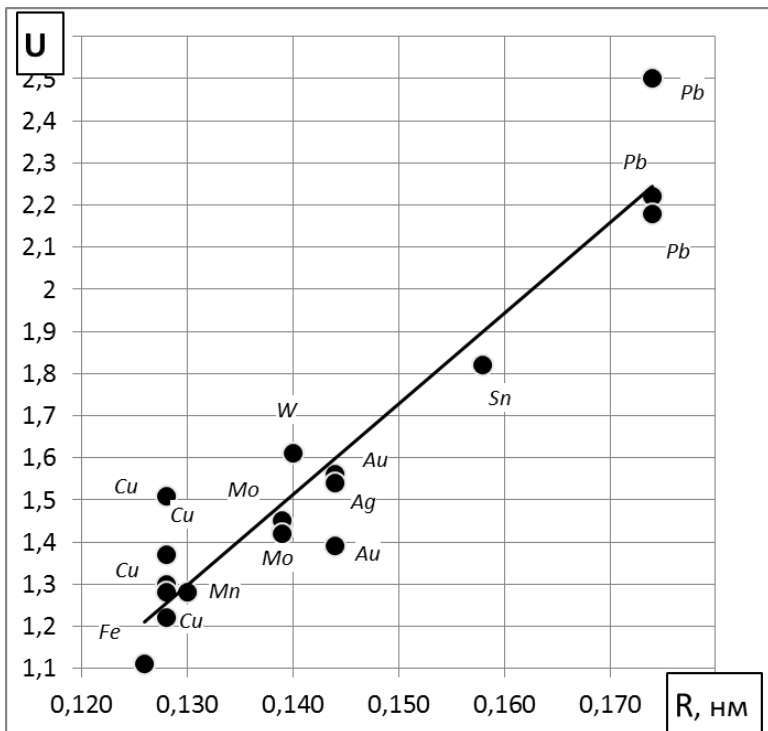


Рис. 11.27. Взаимосвязь между степенью увеличения (U) содержания элементов и их атомным радиусом при уменьшении в 2 раза объёма средне-, высокотемпературных месторождений

объёмом. Очевидно, что существует динамическое равновесие между привнесом металла в месторождение и его выносом. В том случае, если привнос превышает вынос, величина U из табл.11.2 больше 2. Это характерно для рудогенных элементов с большим атомным радиусом: для свинца ($R=1,74\text{Å}$) и цинка ($R=1,39\text{Å}$) в низкотемпературных месторождениях и для свинца в средне-, высокотемпературных месторождениях. Из таблицы и диаграмм следует, что, в общем случае, в ходе пострудного развития месторождения вынос металла из него превышает поступление.

Для понимания этого необходимо остановиться на условиях возникновения рудного месторождения.

Оруденение обычно приурочено к проницаемой зоне в земной коре, обусловленной либо трещинообразованием, либо увеличением пористости вследствие пневмо-гидротермальной переработки массива [27, 29, 78, 79, 97, 117, 121, 126, 146, 147, 162, 168, 173 и др.]. В общем случае трещинообразование предвещает метасоматическую переработку массива, затем идёт волна кислотного опережения, увеличивающая эффективную пористость толщи.

После этого начинается поступление рудогенных элементов из различных источников: из мантийных или коровых. Нередко даже по изотопному составу элементов трудно определить направление их миграции, поскольку коровый источник может содержать ранее рассеянный металл из мантийного источника [13, 65, 81, 197], а магма в ходе движения вверх может обогащаться рудогенными элементами корового происхождения [17].

Мобилизация рудогенных элементов из горных пород состоит из двух этапов: активизация и собственно мобилизация [187]. В ходе активизации рудогенный элемент поступает на поверхность минерала, содержащего его в рассеянной форме. Данный минерал в ходе перекристаллизации очищается от примесного рудогенного элемента [239]. Этап активизации следует рассматривать как этап диффузии элемента в твёрдой фазе. Этап собственно мобилизации заключается в переносе рудогенного элемента по микрокапиллярам в виде различных комплексных соединений [156]. Затем начинается основная фаза миграции по трещинам. Мобилизация элементов из горных пород возможна:

1) на структурном этаже, где происходит рудообразование;

2) на верхних структурных этажах с последующей транспортировкой вниз;

3) на нижних структурных этажах с последующей вертикальной транспортировкой вверх.

В первом случае происходит латеральная миграция рудогенных элементов, во-втором - последовательная вертикально-латеральная миграция, в третьем - латерально-вертикальная миграция. Источником энергии активизации, собственно мобилизации и миграции является тепло, поступающее по глубинным разломам и при остывании магматических тел, а также тектонические движения [158, 196, 222 и др.].

Оруденение локализуется либо у механических барьеров из малопроницаемых пород, либо в термо-, баро-, гео-

химических барьерах. Очевидно, что оруденелые породы на последующих стадиях рудообразования могли играть роль механических барьеров, поскольку оруденение сопровождается резким снижением эффективной пористости массива [238]. Пострудное развитие месторождения, таким образом, длительное время протекало внутри "ловушки" со стенками и "покрышкой" из малопроницаемых пород.

Детальное исследование рудных месторождений показывает неоднократное внутрирудное трещинообразование [237]. Это, вероятно, обусловлено длительным развитием глубинных разломов, контролирующих рудные районы. При этом неоднократно возрастала трещинная проницаемость внутри месторождения и активизировался "вакуумный насос" из-за пульсационного раскрытия трещинных полостей. Термин "вакуумный насос" впервые ввёл В.Ф.Барабанов. Одновременно усиливался прогрев месторождения за счёт поступающих снизу высокотемпературных флюидов. "Вакуумный насос" обеспечивал латеральную и вертикальную миграцию флюидов; рост температуры ускорял химические реакции и активизировал рудогенные элементы; поступление высокотемпературных флюидов усиливало миграцию рудогенных элементов с нижних горизонтов оруденелых пород в верхние.

Все это сопровождалось уменьшением объёма рудных тел. Такой механизм в общем отвечает конкреционно-метасоматическому процессу (Барабанов В.Ф., 1965 г.). Конкреционно-метасоматический процесс обусловлен миграцией химических элементов по микрокапиллярам вследствие пульсационного уменьшения порового давления в зоне рудообра-

зования при раскрытии старых трещин и возникновении новых.

Однако В.Ф.Барабанов рассматривает дорудный и рудогенный этапы формирования залежи, а также приуменьшает роль высокотемпературных флюидов, поступающих в месторождение из мантийных источников. Мы считаем, что облик месторождения во многом обязан пострудному этапу его развития, и что вертикальная, направленная вверх миграция флюидов при этом играла весьма значительную роль. Тектоно-магматическая активизация сопровождалась трещинообразованием. Каждая стадия внутрирудного трещинообразования, по мнению автора, увеличивала проницаемость рудовмещающей толщи и вела к массовому рудообразованию в верхних горизонтах месторождения на термобарьере. Поэтому в верхних этажах эффективная пористость снижалась быстрее, чем в нижних. То есть рудообразование на завершающем этапе каждой стадии происходило в "ловушке" с малопроницаемой "покрышкой". Понятно, что в этих условиях из месторождения быстрее могли удаляться более подвижные рудогенные элементы. Выполненный нами анализ результатов опытов В.А.Жарикова и др. показывает, что с уменьшением атомного радиуса металла скорость фильтрации его соединений возрастает. Очевидно, из месторождения сквозь малопроницаемую "покрышку" быстрее выносились мелкие атомы. Это согласуется с результатами наших исследований (см. рис. 11.26, 11.27).

Однако ещё необходимо учитывать формулу (11.8), от-

ражающую зависимость скорости диффузии от температуры и от атомного объёма.

Рудное месторождение является открытой системой, обменивающейся со средой энергией и веществом (рис. 11.28).

В общем случае сквозь стягивающуюся границу (Γ) месторождения металл извне движется к центральным рудоконтролирующим трещинам. Внутри месторождения металл из зоны ремобилизации поступает в зону "обогащения". По центральной трещиноватой зоне и сквозь экран часть запасов рудогенного элемента выносятся за пределы месторождения. Рассматривая тепловой поток Q и температуру T как тождественные параметры, в соответствии с формулой (11.4) (см. п.11.1) определим скорость накопления (D) рудогенного элемента:

$$D = k_1 \cdot T^{1/R}, \quad (11.8)$$

где T - температура рудного тела;

R - радиус атома рудогенного элемента;

k_1 - коэффициент, зависящий от градиента концентрации и других факторов. Примем $k_1 = \text{const}$.

Количество металла (B), прошедшего за время t через площадь S , равно:

$$B = D \cdot S \cdot t,$$

откуда:

$$t = B / (DS).$$

Предположим, что несколько рудных месторождений, идентичных по размерам и содержанию металла, состоят из разных рудогенных элементов, отличающихся по атомному

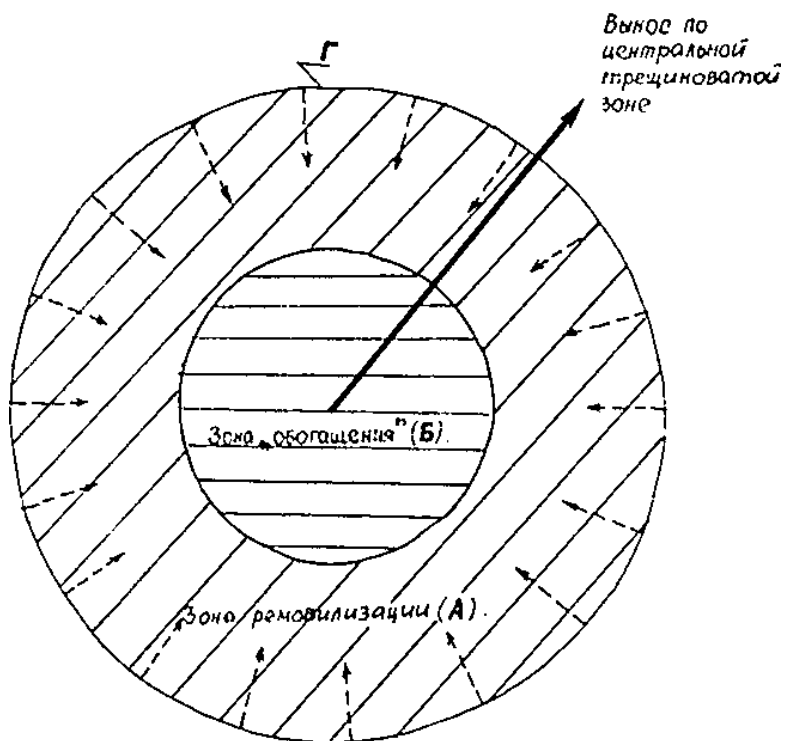


Рис.11.28. Уменьшение объёма месторождения в результате внутрирудной ремобилизации металла. Γ - стягивающаяся граница месторождения.

радиусу. В ходе конкреционно-метасоматического процесса объём месторождения начнёт уменьшаться, если поступление элемента из среды будет стремиться к нулю. Время, необходимое для уменьшения объёма месторождения в 2 раза, будет равно:

$$t_1 = \frac{B}{2D_1 S_1} = \frac{B}{2k_1 S_1 T_1^{1/R}}, \quad (11.9)$$

где B - общие запасы металла в месторождении;

T_1 - температура рудного тела в зоне ремобилизации;

D_1 - скорость накопления металла;

S_1 - площадь поверхности, сквозь которую проходит ремобилизуемый элемент.

Одновременно будет происходить миграция рудогенного элемента за пределы месторождения по центральным трещинам и сквозь экран. Количество выносимого из месторождения металла (Π) будет равно:

$$\Pi = k_2 t_2 D_2 S_2 = t_1 k_2 k_1 T_2^{1/R} S_2,$$

где Π - количество теряемого металла;

T_2 - температура рудного тела в зоне центральных рудоконтролирующих трещин;

D_2 - скорость накопления металла в центральной зоне;

S_2 - площадь поверхности, сквозь которую выносится элемент.

Подставив значение t_1 из формулы (11.9), получим:

$$\Pi = k_2 k_1 T_2^{1/R} S_2, \quad (11.10)$$

Предположим, что температура (T_1 , T_2) и атомный

радиус переменны, а другие параметры постоянны:

$$\Pi = k \cdot T_2^{1/R} / T_1^{1/R}, \quad (11.11)$$

где k - коэффициент пропорциональности;

Π - потери металла;

T_2, T_1 - температура рудного тела соответственно в зоне обогащения и в зоне ремобилизации.

Из формулы (11.11) следует, что, с увеличением температуры T_2 в зоне обогащения, потери металла возрастают при $R = \text{const}$, и $T_1 = \text{const}$. Это соответствует фактам (см. рис. 11.26, 11.27).

Рассмотрим влияние радиуса атома на количество теряемого металла, если другие параметры постоянны. Про- дифференцируем формулу (11.11):

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{T_1^{1/R} (k T_2^{1/R}) - k T_2^{1/R} (T_1^{1/R})}{(T_1^{1/R})^2}, \\ d\Pi &= \frac{T_1^{1/R} k T_2^{1/R} \ln T_2 (-dR/R^2) - (k T_2^{1/R}) T_1^{1/R} \ln T_2 (-dR/R^2)}{(T_1^{1/R})^2}, \\ d\Pi &= \frac{k T_2^{1/R} (\ln T_1 - \ln T_2) dR}{R^2 T_1^{1/R}}. \end{aligned} \quad (11.12)$$

Согласно формуле (11.12), при $T_2 > T_1$, с увеличением радиуса атома рудогенного элемента потери его запасов снижаются:

$$d\Pi < 0 \text{ при } T_2 > T_1 \text{ и } dR > 0.$$

Таким образом, радиус атома металла может влиять на

потери запасов металла тремя способами:

1) при активизации рудогенных элементов - через большую скорость твёрдофазной диффузии более крупных атомов;

2) при локализации оруденения - через меньшую интенсивность фильтрации более крупных атомов сквозь мало-проницаемый экран;

3) в ходе ремобилизации рудогенных элементов - через малое различие скорости миграции атомов разной величины при низких температурах (в ходе ремобилизации) и большее различие скорости миграции тех же атомов при высоких температурах (в зоне локализации оруденения). Это вызвано тем, что, при увеличении температуры, скорость диффузии крупных атомов возрастает быстрее, чем более мелких (см. формулу (10.9)).

Вероятно, влияние величины атома рудогенного элемента на пострудное развитие месторождения в значительной мере вызвано ситовым эффектом. Исследователи следующим образом объясняют действие ситового эффекта на коэффициент диффузии ионов металла в гидрометаллургии: "Ситовый эффект заключается в том, что ионы, размеры которых превышают размер ячейки каркаса смолы, не могут проникать в ионит" [30, с.169]. "Особенно резкое уменьшение коэффициента диффузии ... вблизи границы ситового эффекта, поскольку часть пор уже оказалась недоступной для проникновения в них иона" [30, с.183].

То есть, для того, чтобы проявлялся ситовый эффект, породная толща должна действовать подобно иониту. Понят-

но, что это возможно лишь в том случае, если большая часть ценных компонентов мигрирует по микрокапиллярам, ширина которых чуть превышает диаметр атома или иона металла. Малые размеры капилляров должны препятствовать проникновению в них комплексных соединений этих элементов.

Выполненный нами анализ допускает такую возможность на этапе активизации рудогенных элементов и на этапе их миграции сквозь малопроницаемый экран при локализации оруденения. Если в первом случае преобладает диффузия рудогенных элементов сквозь каркас минералов, то во втором случае вероятна их миграция по микрокапиллярам с диаметром, чуть превышающим диаметр атома мигрирующего элемента. Отметим, что процесс ремобилизации металлов в неясной форме включает оба перечисленных этапа.

Очевидно, что по рудоконтролирующим трещинам миграция рудогенных элементов осуществляется во флюидах в составе комплексных соединений.

Однако последовательность осаждения рудогенных элементов из флюидов в рудоконтролирующие трещины также управляется их атомным объёмом. Нами была проанализирована последовательность минералообразования в трещинах для различных месторождений, достаточно детально изученных исследователями [51, 85, 131, 166, 243]. В результате такого анализа установлено, что в зоне рудообразования сначала накапливаются элементы с мелкими атомами, а позже величина их атомов постепенно увеличивается.

Основная масса каждого рудогенного элемента

поступает строго в соответствии с его атомным объёмом. Нами, по материалам Ильенок С.С. [85] и Покровской И.В., Ковриго О.А. [166], установлено, что в полиметаллических месторождениях Рудного Алтая стадия накопления золота и серебра попадает на прямую, соединяющую атомные радиусы основных металлов каждой стадии.

Следовательно, ещё на стадии мобилизации рудогенные элементы подвергаются фракционированию в соответствии с величиной их атомного объёма.

Влияние ситового эффекта на инфильтрационный метасоматоз отмечал В.И.Лебедев (1971). Известно, что фильтрационный эффект, открытый Коржинским при изучении инфильтрационного метасоматоза, объяснялся исследователями по-разному. В.И.Лебедевым было высказано мнение о влиянии на динамическую подвижность химических компонентов ситового эффекта через ионно-атомный радиус элементов. Он считает, что при прохождении раствора через тонкопористые фильтры происходит дифференциация ионов по их относительному размеру.

Выполненные нами исследования указывают на более широкое проявление ситового эффекта, чем считалось ранее применительно к геохимическим процессам. Фракционирование рудогенных элементов происходило по их атомному объёму как в ходе рудообразования, так и пострудного развития месторождения.

Более того, существует связь атомного радиуса элементов с коэффициентом их концентрации в основных породах относительно ультраосновных. Основные породы

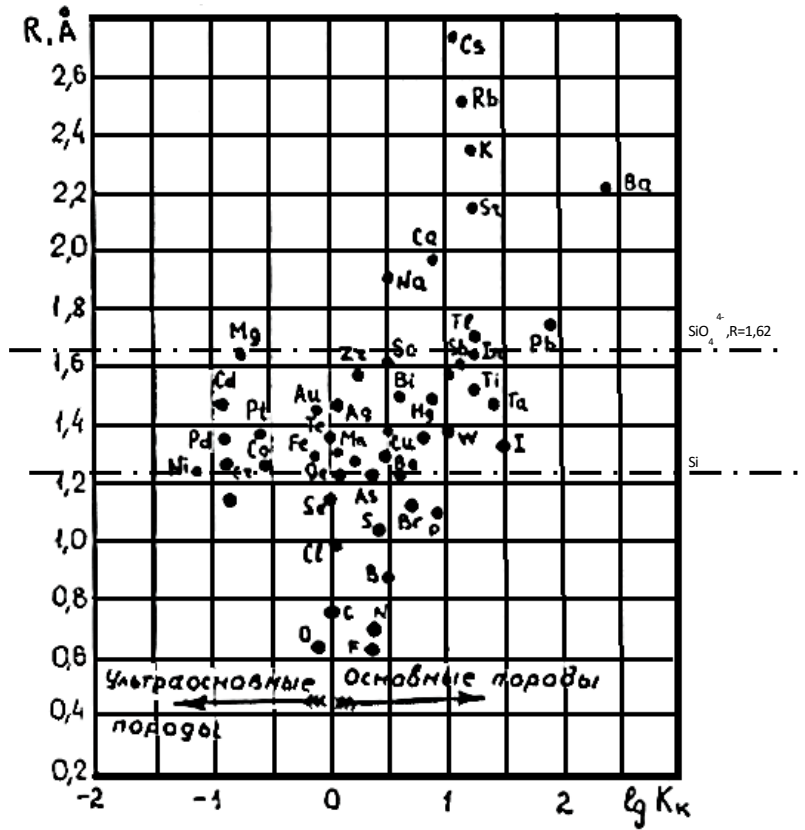


Рис.11.29. Диаграмма атомный радиус элемента - коэффициент концентрации элемента (K_k).

обеднены химическими элементами с более мелкими атомами и обогащены элементами с более крупными атомами (рис.11.29). Точно так же коэффициент концентрации элементов с крупными атомами выше в средних породах относительно основных, и в кислых относительно средних.

11.5. Прогнозная оценка запасов руды по ее химическому составу

В ходе пострудного этапа развития месторождения химические элементы с разным атомным объёмом мигрируют с различной скоростью. Более высокая скорость у мелких атомов, а низкая у крупных атомов. Это обусловлено влиянием ситового эффекта.

Поэтому, при уменьшении объёма месторождения в ходе конкреционно-метасоматического процесса, содержание химического элемента с малым атомным радиусом изменяется в большей степени, чем содержание элемента с более крупным атомом. Это приводит к тому, что отношение содержания различных элементов в изменённых месторождениях становится тем выше, чем больше различие их атомных радиусов. В этом можно убедиться, обратив внимание на формулу (11.11) (см. п. 11.4), где потери запасов рудогенного элемента находятся в обратной зависимости от квадрата его атомного радиуса.

Все это является причиной того, что в рудных месторождениях одного типа, но в различной степени изменённых, существует взаимосвязь между химическим составом и запасами руд. Такая сопряжённость состава и запасов руд

позволяет прогнозировать масштаб месторождения по качеству руды. Вследствие большего отличия содержания тех химических элементов, величина атомов которых отличается сильнее, достоверность прогнозирования по ним выше (табл. 11.3, рис. 11.30).

Таблица 11.3

Вероятность (P) объединения железорудных месторождений в кластеры по отличию величины атомов на диаграммах

Диаграмма	Разность атомных радиусов элементов	Вероятность (p)	Число кластеров
1	2	3	4
Ti- Mn	0,11	0,75÷0,82	6
Ti- Mn*	0,11	0,80÷0,83	3
Ti- Mg	0,17	0,80÷ 0,95	4
Ca	0,35	0,90	2
P - Si	0	0,70 ÷ 0,80	2
P - Fe	0,08	0,78 ÷ 0,81	2

* Лишь метасоматические месторождения.

Из таблицы видно, что железорудные месторождения образуют несколько кластеров по масштабу оруденения. Например, на диаграмме Ti-Mn имеются 3 кластера с запасами более 600 млн.т и 3 с запасами менее 600 млн.т. Если на той же диаграмме анализируются метасоматические месторождения, то число кластеров уменьшается до 3. Из этого следует, что на диаграмме обособляются месторождения как по их генезису, так и по степени их пострудного изменения.

Месторождения различных генетических типов выносились на диаграммы среднего содержания рудогенных элементов в руде. Было установлено, что, в зависимости

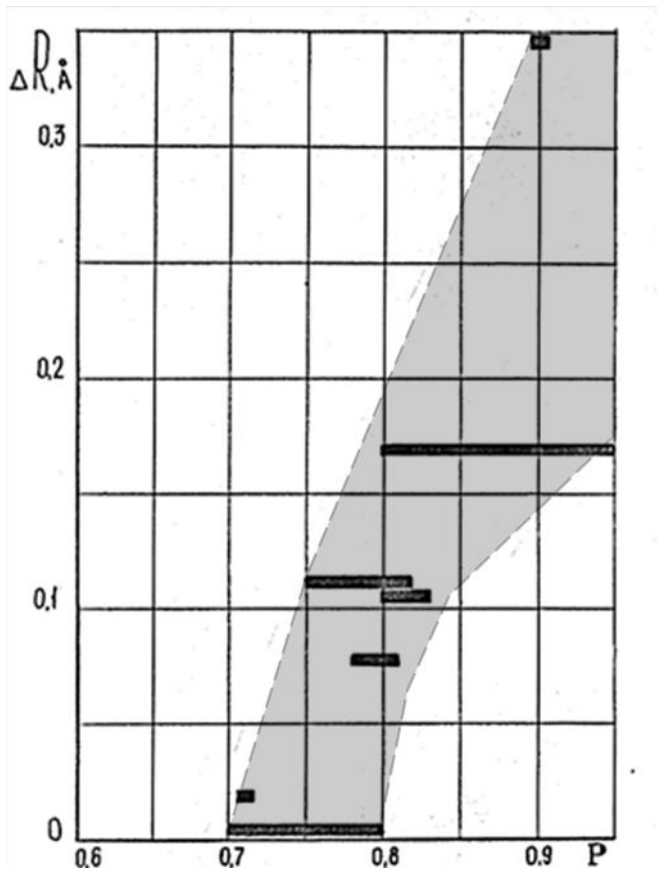


Рис.11.30. Вероятность (P) объединения железорудных месторождений в кластеры по их величине, на диаграммах состава руды в зависимости от разности атомных радиусов (ΔR) рудогенных элементов.

от количества запасов руды, месторождения образуют кластеры (табл. 11.4, рис. 11.31).

Таблица 11.4

Вероятность (P) объединения месторождений цветных металлов в кластеры по их величине на диаграммах состава руды

Тип месторождений	Диаграмма	Разность атомных радиусов	Вероятность (P)	Число кластеров
Меднопорфировый	Cu - Mo	0,11	0,78-0,82	2
Колчеданный	Cu - Zn	0,11	0,71-0,86	3
Колчеданный	Cu - Pb	0,46	0,75-1,00	3
Колчеданный	Pb - Zn	0,35	0,86-0,91	4
Сульфидные	Ni - Cu	0,04	0,67-1,00	4
Силикатные, кор выветривания	Ni - Co	0,01	0,91-0,93	2

Более двух кластеров на диаграмме указывает на возможность выделения нескольких генетических подтипов месторождений. Однако, и при наличии лишь двух кластеров, внутри генетического типа могут быть подтипы.

Объединение месторождений цветных металлов в кластеры по количеству запасов может служить основанием для прогнозной оценки масштаба оруденения по среднему составу руды. Тем самым, существующие методы прогнозирования месторождений дополнены ещё одним способом прогнозной оценки запасов руд по их химическому составу. Областью применения нового способа может быть этап поисковой или предварительной разведки рудного месторождения. Основанием для использования предлагаемого способа является

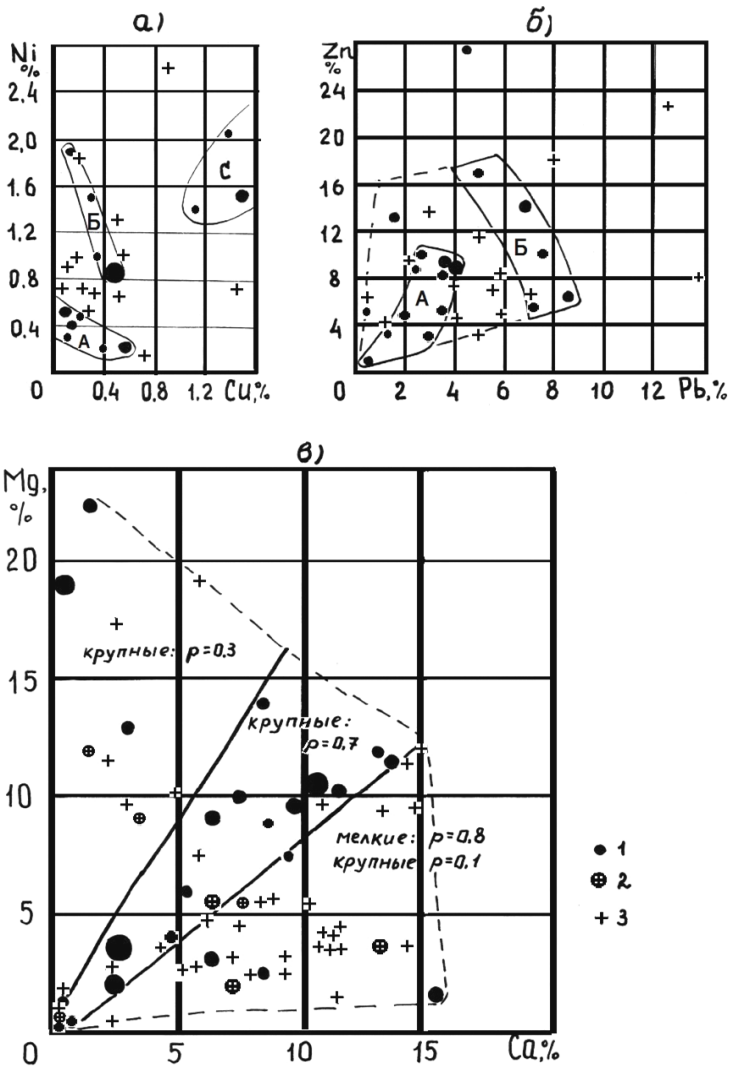


Рис. 11.31. Образование кластеров по масштабу оруденения на диаграммах качества руды в месторождениях: а - сульфидных, б - колчеданных, в - железорудных (всех генетических типов). 1 - крупные, 2 - средние, 3 - мелкие месторождения.

анализ количества запасов руд того или иного генетического типа на диаграммах химического состава руд. Диаграммы должны составляться для 20 и более месторождений данного региона или региона с аналогичной геологической обстановкой.

11.6. Основные выводы по главе "Влияние величины атома рудогенных элементов на адаптацию месторождения"

1. Наибольшее содержание химического элемента в железной руде зависит от суммарного теплового потока и от двух атомных параметров: от электроотрицательности и от атомного радиуса элемента. Содержание элемента возрастает с увеличением электроотрицательности элемента и с уменьшением его атомного радиуса. То есть чем слабее диффундирует элемент в твёрдой фазе, тем выше его содержание.

2. В месторождениях цветных металлов существует как прямая, так и обратная связь между содержанием рудогенного элемента и запасами руды. Нами анализировалась степень увеличения содержания рудного элемента при уменьшении запасов руды в два раза.

3. В ходе такого анализа установлено, что степень увеличения содержания элемента возрастает с увеличением его атомного радиуса. Другими словами, чем быстрее диффундирует элемент в твёрдой фазе, тем больше приращение его содержания в руде.

4. В средне- и высокотемпературных месторождениях положительная роль диффузии проявляется в меньшей степе-

ни, чем в низкотемпературных месторождениях. Причина этого явления кроется в неоднократном прогревании зоны рудогенеза в средне- и высокотемпературных месторождениях. Это приводило к разрушению рудных минералов.

5. Атомный радиус рудогенного элемента мог влиять на рост его содержания и через ситовый эффект, когда крупные атомы плохо проникали через малопроницаемый экран над зоной рудогенеза.

6. Поскольку существует закономерная связь между тепловым воздействием среды, запасами и химическим составом руды, то можно прогнозировать один из этих параметров по известным другим из их числа.

7. Следовательно, можно прогнозировать запасы руды по ее химическому составу. Достоверность такого прогноза составляет 75-95%. Данный метод применим на стадии поисковой разведки.

Глава 12. ВЛИЯНИЕ МАГМАТИЗМА И ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД ФУНДАМЕНТА НА АДАПТАЦИЮ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

12.1. Используемая информация и ее графическое представление

Для выяснения управляющих факторов, формирующих ору-
денение, нами используются данные о 216 месторождениях,
приведённые в книге "Geologie and grade-tonnage informa-
tion on Tertiary districts". Информация для публикации
подготовлена авторами Dan L. Mosier, W. David Menzie, Frank
J. Klienhample в 1965 г. в США.

Сведения о месторождениях РСФСР и других стран быв-
шей СССР в данной книге отсутствуют и нами не исполь-
зуются.

В ходе исследований мы анализировали данные о
качестве и количестве руд в месторождениях в связи с
составом рудогенных, рудовмещающих и подстилающих пород,
а также в зависимости от величины магматического воз-
действия (от числа магматических инъекций).

Анализ данных выполнялся с помощью диаграмм:
фазовых портретов рассматриваемого множества или подмно-
жества, выделяемого по какому-либо признаку. На диаграм-
ме рассматривалось изменение третьей переменной, харак-
теризующей месторождение или вмещающие породы.

Из множества месторождений подмножества выделялись
по следующим признакам:

- по уровню содержания того или иного рудогенного
элемента;
- по вхождению в один и тот же кластер;
- по величине месторождения;
- по интенсивности магматического воздействия;

-по содержанию двух элементов в руде.

Строились следующие диаграммы:

- а) запасы руды - интенсивность магматического воздействия;
- б) состав руды - интенсивность магматического воздействия;
- в) содержание i -го элемента - содержание j -го элемента в руде;
- г) запасы руды - содержание рудогенного элемента.

Изучалась взаимосвязь перечисленных параметров месторождений и боковых пород. Рассматривалась характеристика месторождений в зависимости от состава осадочных и магматических пород фундамента, рудогенной и рудовмещающей толщи. Для этого строились гистограммы и диаграммы.

12.2. Влияние магматизма на качество и запасы руды

Воздействие магматических инъекций на качество и запасы руды изучалось на диаграммах запасы руды (B)-содержание золота, серебра; содержание i -го элемента - содержание золота, серебра. Величина Q вычислялась отдельно для рудогенного (Q_1) и пострудного (Q_2) этапов развития.

Оценивалось тепловое воздействие (Q_2) пострудных магматических тел на подмножества с $Q_1 = \text{Const}$, и на подмножества с разными примесными элементами.

На двух диаграммах B - Ag , при $Q_1=1$ и $Q_2=2$, подмножества образуют по 10-12 кластеров (рис.12.1-а, б). Для каждого кластера вычислено среднее значение $\overline{Q_2}$. По этим числам проведены изолинии теплового

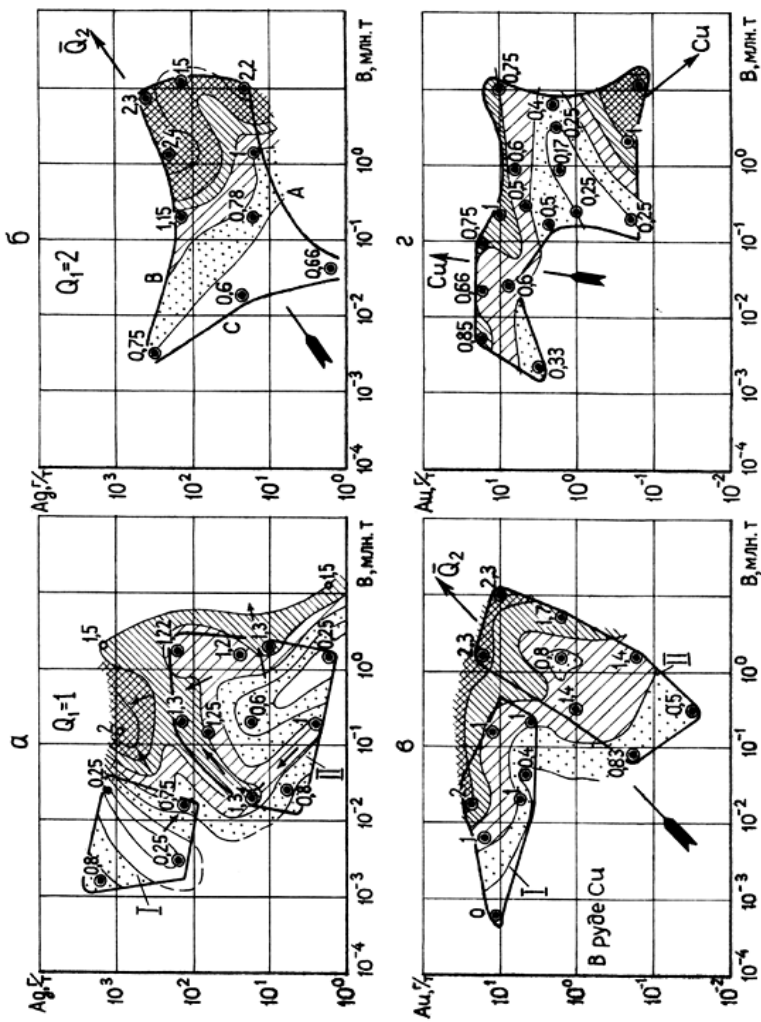


Рис. 12.1. Пояснения на следующей странице

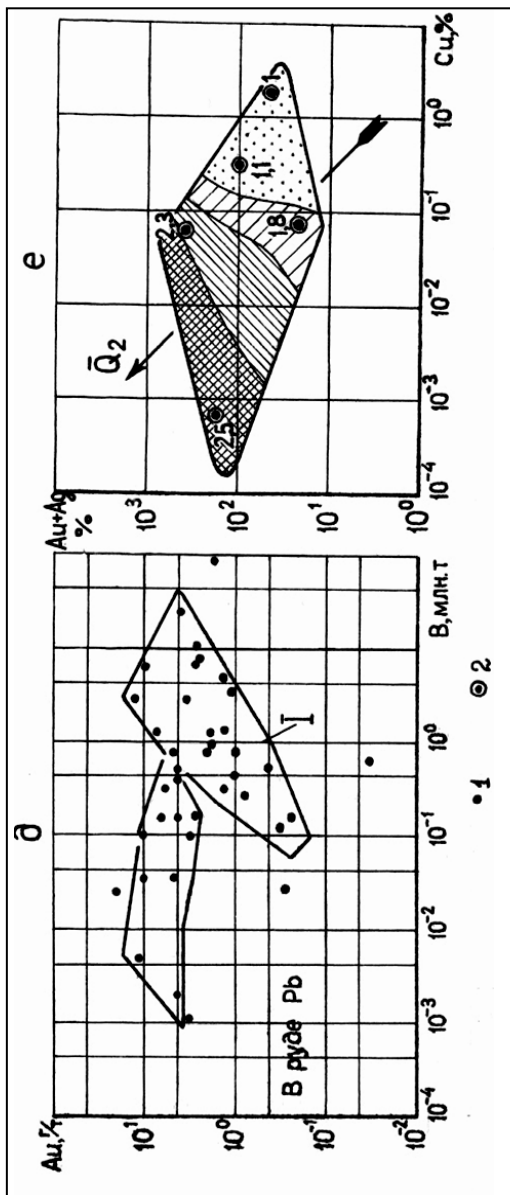


Рис. 12.1. Месторождения в фазовом пространстве содержание золота, серебра - запасы руды: а) изолинии Q_2 при $Q_1=1$; б) изолинии Q_2 при $Q_1=2$; в) изолинии Q_2 для месторождений с Cu; г) изолинии доли Cu-содержащих месторождений в кластерах; д) поля существования Pb-содержащих месторождений; е-месторождения с запасами более 1 млн.т в фазовом пространстве (Au+Ag)-Cu: изолинии среднего значения для Q_2 . 1-месторождение, 2-центр кластера.

воздействия (Q_2) пострудного этапа развития. Оказалось, что магматическое воздействие увеличивает содержание серебра в руде, запасы руда в месторождении.

Следовательно, эти подмножества объединяют такие месторождения, которые можно отнести к комплексам, развивающимся с расширением. В них преобладает принос рудогенных элементов над выносом, что вызывает рост содержания этих элементов.

Граничные линии поля существования месторождений можно объяснить следующим образом (см. рис. 12.1.-б):

1) линия А - увеличение объёма месторождения при одновременном росте содержания серебра;

2) линия В - увеличение объёма месторождения в условиях слабого поступления серебра;

3) линия С - ограничение по экономической целесообразности разработки месторождений.

На рисунке 12.1-а выделяются две группы кластеров: I - месторождения в основном не испытывали пострудное магматическое воздействие ($\overline{Q_2} < 1$); II - месторождения, которые подвергались пострудным инъекциям магм.

Для золота отдельно рассматривались месторождения, содержащие медь (рис.12.1-в) и свинец (рис. 12.1-д). Для этих диаграмм характерны те же свойства, что и для диаграмм В-Аg.

На диаграмме В-Au, когда в руде содержится медь, чётко выражены 2 группы месторождений:

I-увеличение объёма месторождения в условиях

недостаточного поступления золота;

II-рост объёма месторождения при одновременном увеличении содержания золота.

Улучшение качества руды и рост масштаба оруденения происходит при усилении магматического воздействия в пострудный этап развития месторождения.

Рассмотрим подмножество месторождений, содержащих в руде свинец. Внутри него выражена группа (I) с резким увеличением объёма месторождения при одновременном росте содержания золота (рис. 12.1-д, I). На диаграмме (рис. 12.1-г) подмножество, содержащее в руде свинец, смещено в сторону меньших значений В и Au. Причина этого в следующем. Медь отлагается в более высокотемпературных ($Q=345^{\circ}\text{K}$, где Q-характеристическая температура Дебая) условиях, чем свинец ($\theta=105^{\circ}\text{K}$). Очевидно, что высокотемпературные месторождения золота крупнее и с лучшим качеством руды.

Сказанное подтверждается схожестью двух диаграмм: с изолиниями магматического воздействия (см.рис.12.1-в) и с изолиниями доли Cu-содержащих месторождений в кластерах (см.рис.12.1-г).

Рост числа магматических инъекций приводит к увеличению содержания благородных металлов при одновременном уменьшении содержания меди (рис. 12.1-е). Вероятно, при многократном тепловом воздействии магмы, роль адаптивности элементов (гл.14.) возрастает по сравнению с другими атомными параметрами. Поэтому, в результате конкуренции, в зоне рудогенеза остаются более адаптивные золото и серебро ($A=0,8-1,4$). Медь, с меньшей адаптивностью ($A=0,68$), уносится.

Таким образом, медь и золото ведут себя противоположным образом. При увеличении пострудного магматического воздействия возрастает число месторождений с большим содержанием золота. В то же время содержание меди в этих месторождениях уменьшается. А доля крупных месторождений в подмножестве увеличивается.

12.3. Влияние проницаемости пород фундамента на величину золоторудного месторождения

При рассмотрении Cu-Zn содержащих месторождений было установлено, что выделяются два подмножества, по-разному реагирующие на тепловое воздействие магматических тел:

1. Тип М - мелкие месторождения. В руде содержится более 0,3% меди. С увеличением пострудного магматического воздействия содержание меди возрастает до 1,7%. Запасы руды уменьшаются от I млн. т до 0,006 млн.т.

2. Тип К - крупные месторождения. Содержат меди менее 0,3%. С ростом интенсивности пострудного магматического воздействия содержание меди в общем уменьшается, а объём месторождения и запасы руды возрастают.

Оказалось, что тип М характеризуется отсутствием пород, подстилающих рудовмещающие породы. То есть отсутствует basement rocks. В то же время для типа К породы фундамента чётко выражены.

На диаграмме Ag-Pb были выделены кластеры по запасам руды (рис. 12.2). Для каждого кластера

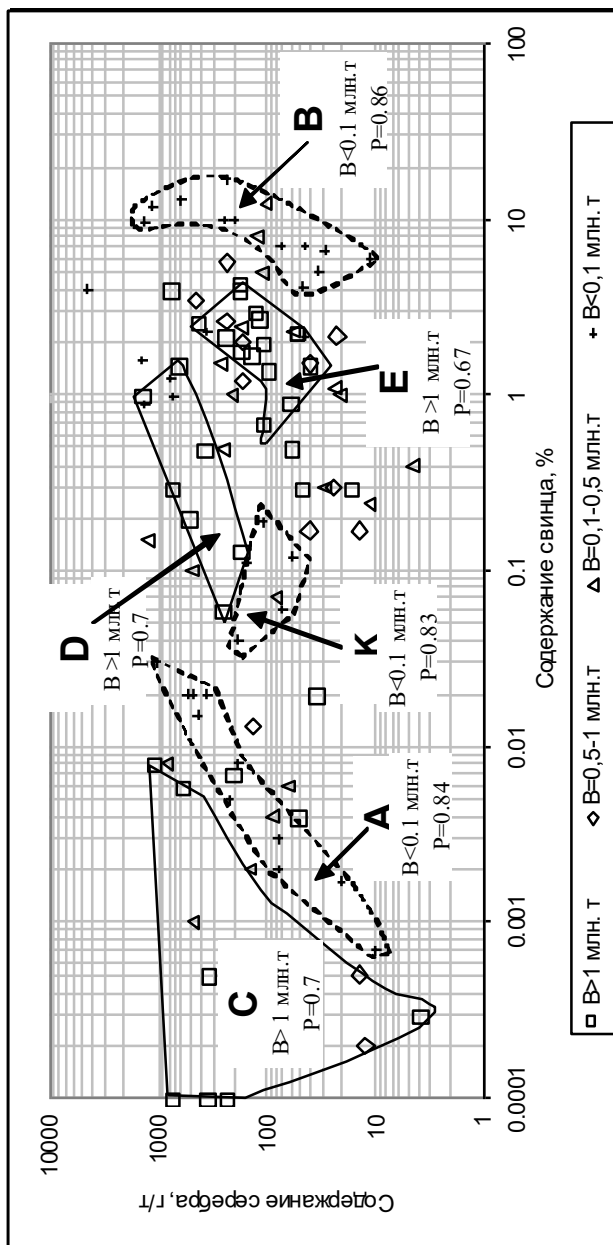


Рис.12.2. Поля существования месторождений на диаграмме Ag-Pb

вычислялись средние запасы руды и долевое участие (Д) в породах фундамента экранирующих пород (аргиллитов, солей, известняков и доломитов) по отношению ко всем породам фундамента.

Оказалось, что, с увеличением долевого участия экранирующих пород в фундаменте, средние запасы руды уменьшаются (рис 12.3). Таким образом, несомненно влияние состава пород фундамента на масштаб оруденения. Для уточнения этого факта изучалось влияние состава фундамента на запасы руды в отдельных месторождениях.

Были построены десять диаграмм *состав пород - запасы руды*. Две из них приведены на рис. 12.4. Из них видно, что влияние переслоя пород фундамента определяется наиболее крупнозернистым слоем. Так, на диаграмме "а" в ряду конгломерат-песчаник-аргиллит-известняк-соль, запасы уменьшаются слева направо. На этой диаграмме по горизонтальной оси отложены наиболее крупнозернистые породы всего переслоя.

На диаграмме "б" (см.рис 12.4) данные "отфильтрованы" по результатам семи диаграмм такого же типа. Здесь сохраняется та же закономерность: с уменьшением крупности зерна пород фундамента снижаются запасы в месторождении.

Таким образом, масштаб оруденения увеличивается с ростом проницаемости пород фундамента, подстилающих рудовмещающую толщу. При этом наименее проницаемы слои гипса, ангидрита, соли. Слои известняков, играющие роль геохимического барьера, тоже малопроницаемы. Проницаемость пород явно растёт от аргиллита к конгломерату.

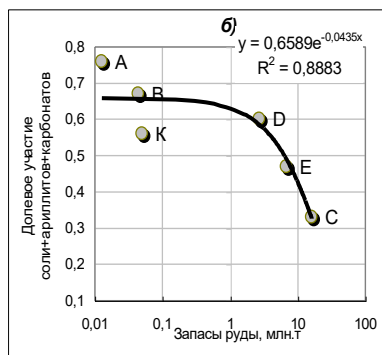
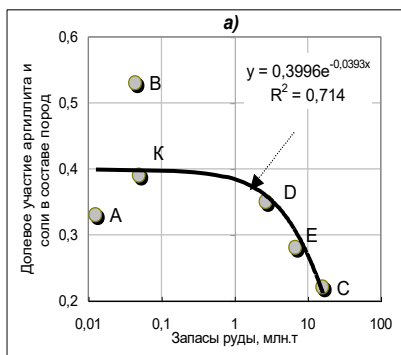


Рис. 12.3. Влияние экранирующих пород фундамента (basement rocks) на запасы В руды: а-долевое участие аргиллита и соли в составе пород фундамента; б-суммарное долевое участие аргиллита, соли и карбонатных пород.

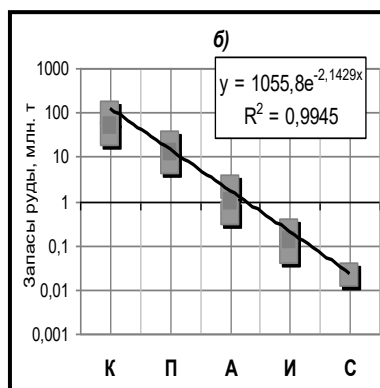
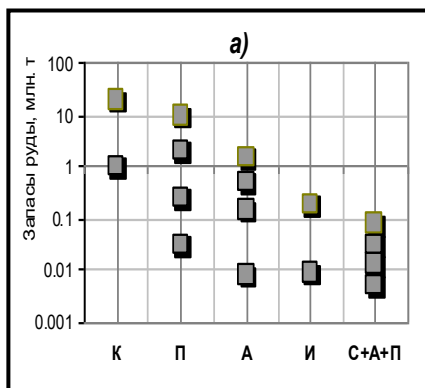


Рис. 12.4. Влияние пород фундамента на запасы руды в месторождении: а-переслоя пород, по породе с наибольшей крупностью зерна; б-отдельных разновидностей пород: К-конгломерат, П-песчаник, А-аргиллит, И-известняк, С-соль.

В этом же направлении увеличиваются запасы руды в месторождениях, расположенных на более высоких гипсометрических уровнях. Причина здесь может быть не только в микропористости подстилающих пород. Возможно комбинированное влияние разных факторов:

- 1) эффективной пористости пород;
- 2) химического состава пород, т.е. способности слоёв образовывать геохимический барьер;
- 3) пластичности породы, или ее способности залечивать тектонические трещины, по которым поступали флюиды.

12.4. Влияние состава боковых пород на состав руды

Для выяснения роли породной толщи в формировании состава руды определялись средние значения некоторых параметров фундамента и рудовмещающих пород для кластеров диаграммы Ag-Pb. Анализ выполнялся на 20 графиках. Из них наиболее информативными оказались 6 графиков.

Оказалось, что содержание свинца в руде следующим образом контролируется составом пород фундамента:

- 1) увеличивается по мере снижения доли магматических пород (рис. 12.5, а);
- 2) растёт с уменьшением доли интрузивных пород в фундаменте (рис 12.5, б);

Содержание свинца зависит от состава рудовмещающих пород и увеличивается по мере:

- 1) роста доли интрузивных пород (рис. 12.6, а);
- 2) снижения интенсивности пострудного магматического воздействия (рис. 12.6, в);

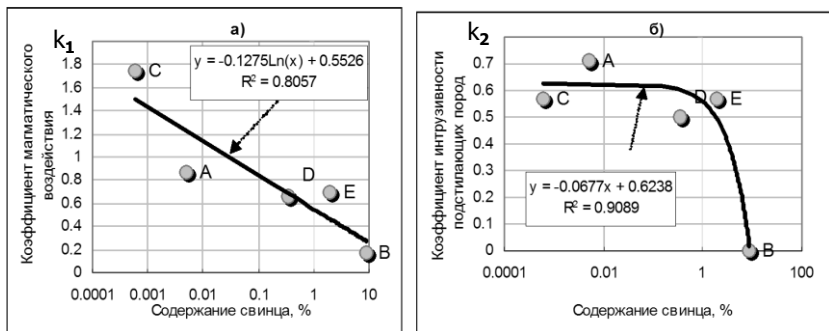


Рис. 12.5. Влияние на содержание свинца в руде: а-коэффициента магматического воздействия. б-коэффициента интрузивности; С . . . В - кластеры на диаграмме свинец-серебро. Коэффициенты вычислены для пород фундамента.

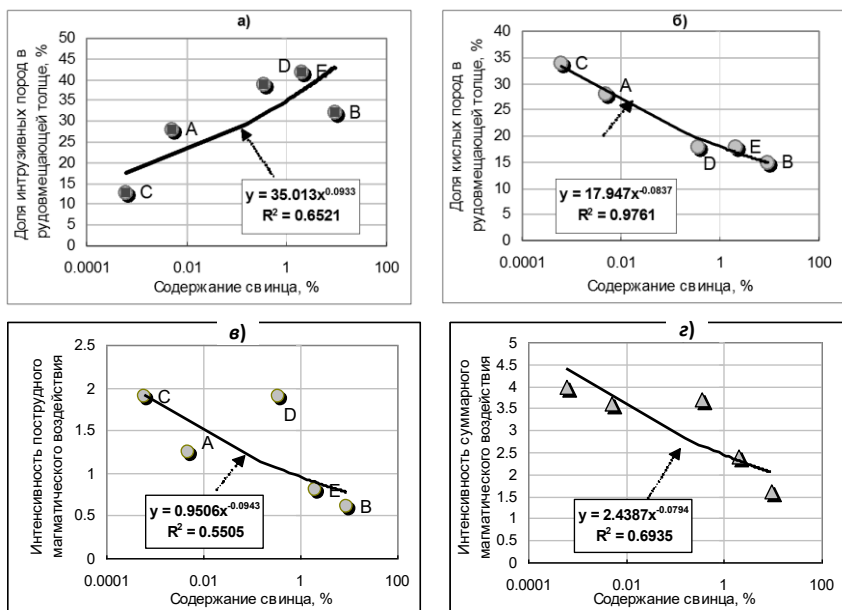


Рис. 12.6. Изменение содержания свинца в руде в связи: а – с ростом доли интрузивных пород в рудовмещающей толще; б – со снижением доли кислых пород в рудовмещающей толще; в, г – со снижением интенсивности магматического воздействия $Q_1 + Q_2$ в т.ч. в пострудном этапе Q_2

3) уменьшения доли кислых пород (рис. 12.6, б).

Анализ влияния состава породной толщи на содержание золота и серебра в руде показал следующее:

1) много золота и серебра в руде, если чётко выражен фундамент и в его составе много осадочных пород;

2) мало золота и серебра в том случае, когда мало ассоциированных пород;

3) много золота и мало серебра в руде, если:

– из общего числа интрузивных пород 37% образуют фундамент;

– в магматических породах много кислых (56%);

4) много серебра и мало золота, когда:

– из общего числа интрузивных пород в фундаменте залегают лишь 6%, остальные 94% входят в рудовмещающую и ассоциирующую толщи;

– магматические породы на 81% представлены средними, основными, ультраосновными породами.

Влияние состава породной толщ на содержание золота и серебра суммировано на рис. 12.7.

Таким образом, золото тяготеет к породам верхних этажей из магматического ряда. И содержание золота, по сравнению с содержанием серебра, возрастает на месторождениях, где интрузивы залегают преимущественно в фундаменте. А их состав кислый. Серебро тяготеет к нижним этапам магматического ряда: к интрузивам ультраосновного–среднего состава.

Все это подтверждает более интенсивную миграцию золота по сравнению с серебром благодаря действию эффекта массы в ходе твёрдофазной диффузии.

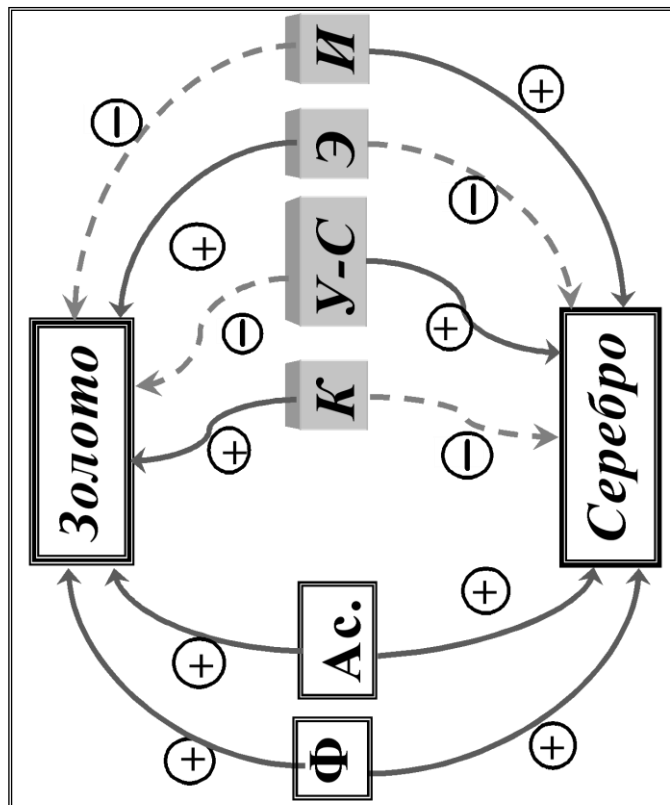


Рис. 12.7. Влияние состава породной толщи на содержание золота и серебра в руде: Ас-ассоциирующие породы; Ф-осадочные породы фундамента; Э-эффузивы; И-интрузивы; К-кислые породы; С-У-средние, основные и ультраосновные породы.
 Знак (+) прямая связь; знаке (-) обратная связь.

12.5. Прогнозирование масштаба оруденения по составу руды

Запасы руды в золото-серебряных месторождениях коррелируются со следующими параметрами среды и месторождения:

- 1) с составом осадочных пород фундамента, подстилающего рудовмещающую толщу (см. рис. 12.4);
- 2) с интенсивностью пострудного магматического воздействия и с содержанием золота, серебра в руде (см. рис. 12.1);
- 3) с соотношением среднего содержания рудогенных элементов в руде (см. рис. 12.2).

Эти закономерности могут использоваться для прогнозирования масштаба оруденения на разных стадиях поисково-разведочных работ. Рассмотрим более детально последний критерий: соотношение содержания рудогенных элементов в руде. Анализ выполнялся на диаграммах « i -й элемент - j -й элемент».

Диаграмма Pb - Си

Существует прямая связь между содержанием свинца и меди. На диаграмме выделяются три кластера по масштабу оруденения: кластеры **А, В, С** (рис. 12.8). В кластер **В** с вероятностью 0,82 входят более крупные месторождения ($B > 0,6$ млн.т). В кластерах **А** и **С** - с вероятностью 0,7 расположены мелкие месторождения ($B = 0,0007 \div 0,5$ млн.т).

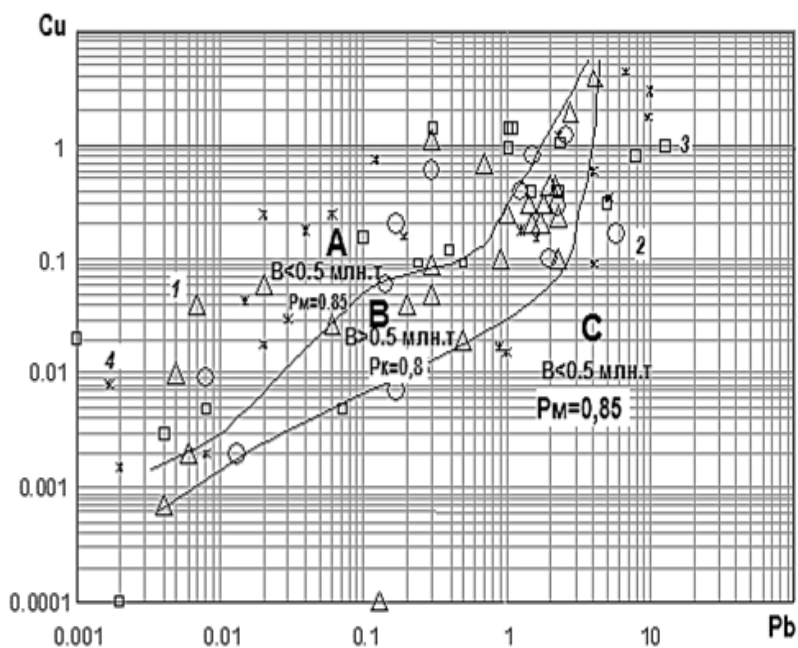


Рис. 12.8. Взаимосвязь между содержанием свинца, меди и запасами руды в золоторудных месторождениях. 1-крупные, 2-средние, 3, 4 - мелкие месторождения.

Диаграмма Pb - Zn

Связь между содержанием свинца и цинка прямая (рис. 12.9). По запасам руды месторождения образуют три кластера. В кластер **A** входят месторождения с большими запасами ($B > 0,6$ млн.т). В руде отмечается относительно повышенное содержание цинка (в $5 \div 10$ раз). Вероятность встречи крупных месторождений высока: $p = 0,97$.

Кластеры **B** и **C** образуют мелкие месторождения ($B = 0,0002 \div 0,5$ млн.т). Вероятность их вхождения $p_{ср} = 0,78$. В руде более высокое содержание свинца, с малой температурой Дебая ($\theta = 105^\circ\text{K}$). Следовательно, более мелкие месторождения характеризуются низкими температурами рудообразования (гл.14 и гл.15).

Диаграмма Cu - Zn

С увеличением содержания меди растёт содержание цинка, а масштаб оруденения уменьшается (рис. 12.10). С одновременным увеличением содержания меди и цинка снижается суммарное содержание золота и серебра в руде. С ростом содержания цинка, при постоянном уровне меди, запасы руды в месторождении увеличиваются.

На диаграмме выделены 4 кластера: **A**, **B**, **C**, **D**. В кластер **A** с вероятностью 0,8 входят крупные месторождения ($B = 1 \div 17$ млн.т). Кластеры **B**, **D** с вероятностью 0,75 образованы средними по запасам руд месторождениями ($B = 0,5 \div 1$ млн.т). Кластер **C** на 85% состоит из мелких, месторождений ($B = 0,001 \div 0,4$ млн.т).

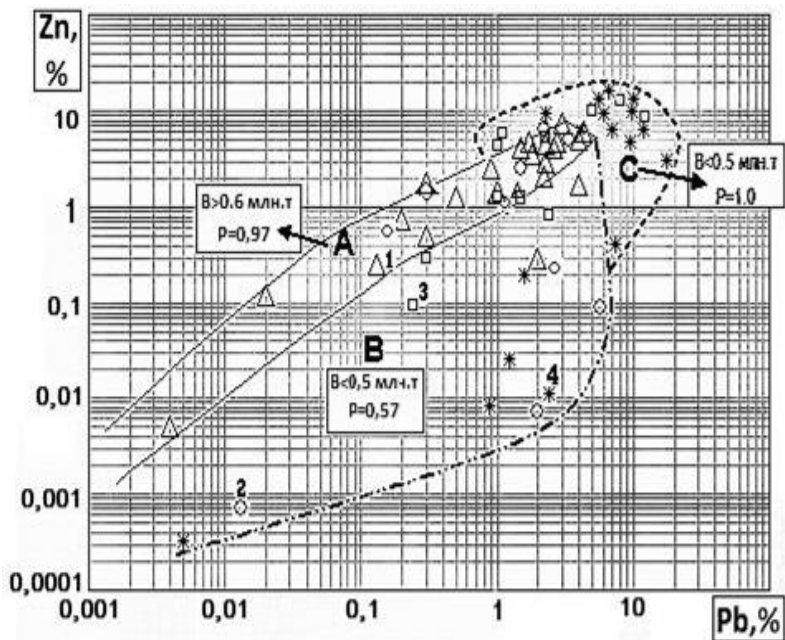


Рис.12.9. Взаимосвязь между содержанием свинца и цинка, и запасами руды в месторождениях. 1-крупные, 2 - средние, 3, 4 - мелкие месторождения.

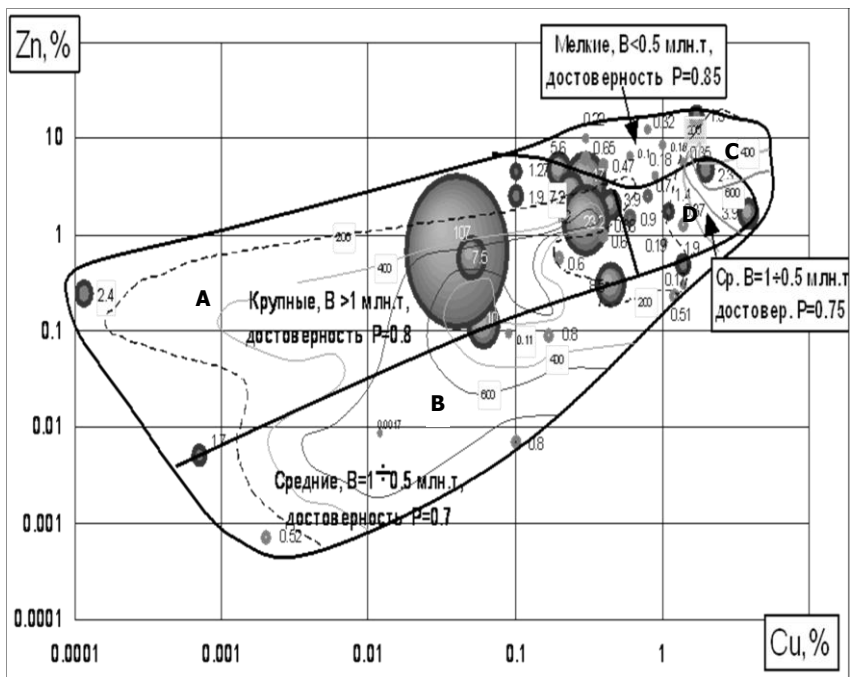


Рис.12.10. Взаимосвязь между содержанием меди, цинка, серебра + золота и масштаб оруденения. 1-крупные месторождения, 2-средние по запасам руды месторождения, 3, 4-мелкие месторождения, А-кластер крупных, В, D-кластер средних, С-кластер мелких месторождений. Изолинии суммарного содержания золота и серебра.

Диаграмма Au – Pb

В общем, связь между содержанием золота и свинца обратная (рис. 12.11). Однако при малых содержаниях свинца ($Pb < 0,005\%$) с увеличением содержания золота растёт и содержание свинца. Одновременное увеличение содержания золота и свинца сопровождается уменьшением запасов руды.

На диаграмме выделяются 5 кластеров по величине месторождения (**A, B, C, D, E**):

A) $V = 0,7 \div 18$ млн.т, вероятность $p=0,89$;

B) $V = 0,0003 \div 0,1$ млн.т, $p=0,73$;

C) $V = 0,1 \div 0,5$ -млн.т, $p=0,77$;

D) $V = 0,6 \div 23$ млн.т, $p=0,6$;

E) $V = 0,6 \div 107$ млн.т, $p=0,83$; или же

$V = I \div 107$ млн.т, $p=0,78$;

Рост интенсивности пострудного магматического воздействия сопровождался уменьшением содержания золота, свинца и увеличением запасов руды. Однако достоверность последнего факта недостаточно высока - на уровне 0,6.

Диаграмма Au – Ag

Поле существования месторождений на диаграмме достаточно изометрично. То есть связь между содержанием золота и серебра не прослеживается. На диаграмме выделяются два кластера: **A, B**.

Кластер **A** состоит из мелких месторождений ($p=0.8$, $V=0,0002 \div 0,5$ млн.т). Он расположен в области высоких содержаний золота и серебра. Кластер **B** содержит крупные

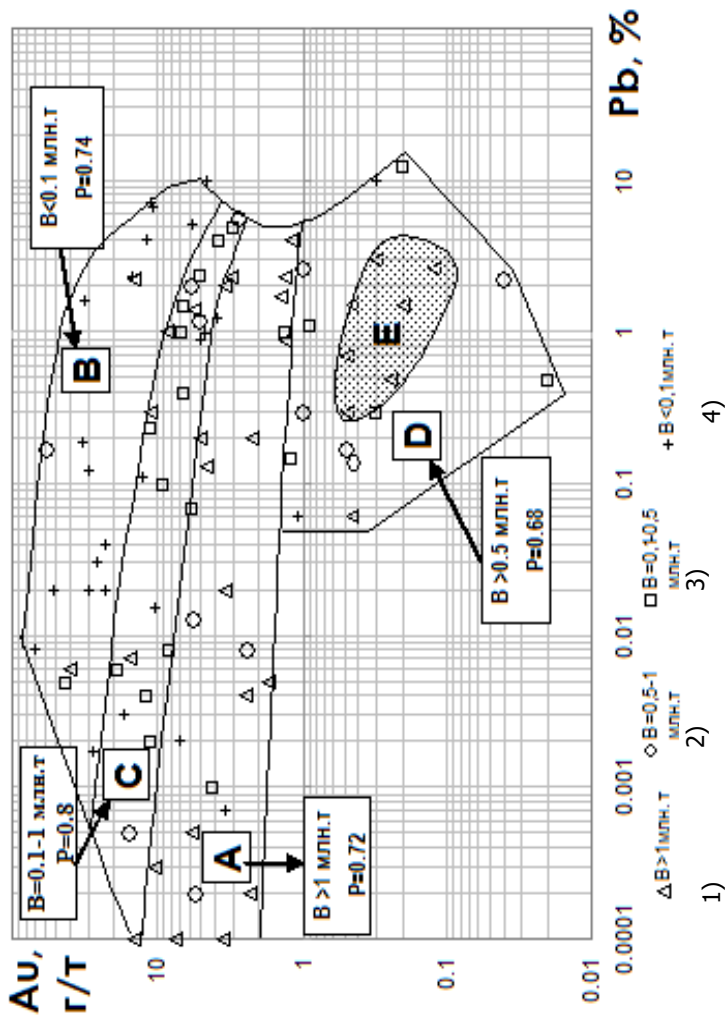


Рис.12.11. Взаимосвязь между содержанием свинца, золота, запасами руды и интенсивностью магматического воздействия. Величина месторождения: 1-крупные, 2-средние, 3-мелкие, 4-очень мелкие.

месторождения с вероятностью 0,62.

Используя эти диаграммы, а также учитывая состав пород фундамента и интенсивность магматического воздействия, можно прогнозировать масштаб выявленного оруденения.

12.6. Некоторые особенности адаптации золоторудных месторождений

Диаграммы химического состава руды, на которых, показаны его запасы по месторождениям, свидетельствуют о наличии не менее шести генетических подтипов месторождений. Они являются продуктом комбинированного воздействия различных генетических факторов: состава пород фундамента, рудовмещающих и ассоциирующих пород, интенсивности теплового воздействия магмы на стадии рудогенеза и пострудных изменений. Несомненно, воздействие и других невыясненных факторов.

Наиболее часто выделяются две группы подмножеств месторождений на диаграммах "среднее содержание металла-запасы руды" (см.рис. 12.1). Для первой группы месторождений характерно высокое содержание металла при малых запасах руды. В ней наблюдается обратная связь между содержанием металла и запасами руды. Это свидетельствует о том, что месторождение этой группы является комплексом, где преобладали силы, стягивающие элементы к центру комплекса. Поэтому, чем сильнее действовали рудоформирующие факторы, тем сильнее уменьшались запасы руды и возрастало содержание металлов.

Месторождения этой группы возникали при наличии в

фундаменте экранирующих пород: аргиллитов, солей и карбонатов. Известняки здесь играли роль геохимического экрана.

Малые размеры месторождения объясняется быстрым залечиванием флюидопроводящих трещинных зон. Длительно могли функционировать лишь наиболее крупные проводящие каналы, вокруг которых и возникали небольшие месторождения.

Высокое содержание металла, очевидно, есть следствие накопления металлосодержащих флюидов под экранирующим слоем и их последующий сток в крупный проводящий канал, обслуживающий большую площадь прогрева. Далее флюиды по каналу поднимались вверх и в зоне термо-, баро-, геохимического барьера сбрасывали рудогенные элементы.

Вблизи узко локализованных, направленных вверх высокотемпературных флюидных потоков возникало конвективное движение. То есть в толще пород, над экранирующим слоем, действовали горизонтальные потоки, радиально направленные к центру рудоконтролирующего канала. Именно поэтому для месторождений I группы характерно конкреционное стягивание рудогенных элементов, сопровождаемое ростом содержания металла и уменьшением объёма месторождения.

Для второй группы месторождений характерны большие запасы руды и изменение в широких пределах содержания металла. Между содержанием металла и запасами руды в месторождениях существует прямая зависимость.

Причина этого заключается в том, что рудовмещающая

толща подстилается конгломератами и песчаниками, то есть проницаемыми для флюидов слоями. Поэтому рудоконтролирующие каналы представляют собой мощную систему длительно функционирующих пористых и трещиноватых зон. По ним флюидные потоки в рудовмещающую толщу поступали на больших площадях. Это стало причиной отсутствия в зоне рудогенеза сильно выраженных конвективных потоков.

Как следствие этого, месторождение представляло собой комплекс, формирующийся с расширением. Другими словами, каждая порция металлоносного флюида обеспечивала и рост объёма рудного тела, и увеличивала в нем содержание металла.

Пострудное магматическое воздействие в мелких месторождениях увеличивало содержание металлов и снижало объём рудных тел. То есть, вызывало конкреционное стягивание. В крупных месторождениях под влиянием пострудных магматических тел увеличивался объём месторождения, а содержание металла уменьшалось.

12.7. Основные выводы по главе "Влияние магматизма и проницаемости пород фундамента на адаптацию золоторудных месторождений"

1. На формирование золото-серебряных месторождений оказывали влияние интенсивность пострудного магматического воздействия, состав подстилающих, рудовмещающих и рудогенных горных пород, адаптивность рудогенных элементов.

2. Первоначальная величина месторождения зависит от

наличия и состава пород фундамента (basement rocks):

-мелкие месторождения образовались при отсутствии пород фундамента и наоборот;

-чем грубее зерно в осадочных породах фундамента, тем крупнее месторождение.

Причина данного явления в том, что осадочные породы фундамента играли роль экранирующей плиты, под которой накапливались рудогенные флюиды. В трещиноватых и пористых зонах плиты флюиды находили выход на верхние этажи. В условиях резкого снижения температуры и давления происходил сброс рудогенных элементов над экранирующей плитой.

3. С увеличением интенсивности пострудного магматического воздействия, величина месторождения возрастает. Одновременно увеличивается содержание золота и серебра в руде.

4. Золото и серебро ведут себя различным образом в рудогенезе: золото тяготеет к породам верхних этажей магматического ряда (к кислым интрузивам), а серебро связано с ультраосновными и основными породами. Причина этого явления заключается в более высокой скорости твёрдофазной диффузии атомов золота благодаря действию эффекта массы диффундирующего атома (см. п.13.4).

5. Полученные результаты исследований позволяют прогнозировать запасы золото-серебряных месторождений комплексно: по составу пород фундамента, по интенсивности пострудного магматического воздействия и по химическому составу руды. Достоверность прогноза на стадии поисковой разведки может составлять от 0,70 до 0,90.

Часть 4. ВЛИЯНИЕ ТВЁРДОФАЗНОЙ ДИФФУЗИИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИХ АДАПТАЦИЮ В МЕСТОРОЖДЕНИИ И В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Глава 13. КУСОЧНАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТВЁРДОФАЗНОЙ ДИФФУЗИИ ОТ АТОМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

13.1. Твёрдофазная диффузия в геологических процессах: состояние вопроса

Прямая оценка масштабов влияния твёрдофазной диффузии на рудогенные процессы практически невозможна. Дело в том, что мы видим конечные результаты генетических факторов рудогенеза, а диффузия атомов в твёрдой фазе является лишь одним из этих факторов. При построении рудогенных моделей обычно игнорируется этап твёрдофазной диффузии [196]. Причина этого в том, что скорость диффузии атомов в кристаллах настолько мала, что на первое место по значимости выдвигаются другие факторы [163, 232].

Каким образом выяснить место твёрдофазной диффузии в шкале приоритетов для генетических факторов? Одним из способов является установление степени коррелированности геологических процессов с такими атомными параметрами, которые проявляются лишь в твёрдой фазе. К ним относится характеристическая температура Дебая (θ), играющая "роль подгоночного параметра, который обеспечивает наилучшее согласие между экспериментальными и теоретическими значениями теплоёмкости" кристалла [15, с.161]. Отмечают, что "как это не удивительно, но понятие температуры Дебая используется во многих задачах физики

твёрдого тела, в том числе и не связанных с теплоёмкостью" [15, с.165]. С учётом Дебаевской частоты, коэффициент диффузии для атомов в твёрдом теле записывается в виде [15, с.587]:

$$D = \xi a^2 \gamma_j = \xi a^2 \gamma_d \exp(-E / \chi_0 T), \quad (13.1)$$

где ξ - определяется типом решётки, порядка единицы;

a - расстояние до ближайших соседей;

γ_j - частота перескоков атома;

γ_d - Дебаевская частота;

E - энергия активации.

Дебаевская частота - это предельная частота колебания кристаллической решётки [15, с.587]:

$$\gamma_d = (\chi_0 \Theta_d) / h, \quad (13.2)$$

где χ_0 - постоянная Больцмана;

h - постоянная Планка.

Необходимость в анализе процесса диффузии атомов в кристаллах возникла после того, как нами был установлен факт корреляции характеристической температуры Дебая с некоторыми геологическими процессами и явлениями (ч.4). Например, в планетарном масштабе возраст месторождений металлов увеличивается с ростом их температуры Дебая. Содержание главных элементов в основных, средних и кислых породах снижается с уменьшением Θ_d . В месторождениях раньше накапливались элементы с большей температурой Дебая.

Это, вероятно, связано со следующими причинами. Во-первых, при наличии дефектов скорость твёрдофазной

диффузии возрастает [127]. Во-вторых, рудогенезу обычно предшествует трещинообразование и возникновение дефектов в кристаллах. Это значительно уменьшает путь диффундирующего атома внутри кристалла. Выделяя в процессе рудообразования этапы активации рудогенных элементов, их мобилизации, транспортировки и рудоотложения, отмечают, что первый этап зависит от твёрдофазной диффузии [187].

Наиболее простым для анализа случаев является диффузия в одноэлементных кристаллах. Изучая ее особенности, можно выяснить основные факторы, контролирующие диффузию и в многокомпонентных кристаллах. Нами использовались данные из справочника "Свойства элементов М.: Металлургия, 1985, 672 с.". Справочник подготовлен авторами М.Е.Дриц, П.Б.Будберг, Г.С.Бурхановым, А.М.Дриц, В.М.Пановко. Необходимые при анализе значения атомных параметров были взяты из приложения к справочнику.

13.2. Изученность проблемы твёрдофазной диффузии в кристаллах

Различают диффузию и самодиффузию в кристаллах. Диффузия - это самопроизвольное выравнивание концентрации атомов одного вида. Самодиффузией называется выравнивание состава твёрдого раствора. Диффундирующий атом перемещается, совершая ряд скачков между равновесными положениями в кристаллической решётке. Теоретически предложены около десяти механизмов диффузии

[133]. Все они являются комбинациями двух простых видов скачков из одного узла решётки в другой узел или же из одного равновесного положения в междоузлии, в другое междоузлие.

Для кристаллов с рыхлой упаковкой атомов возможен простой обмен двух соседних узловых атомов. Кольцевой механизм является усложнённым вариантом обмена, когда три или более атомов одновременно меняются местами.

Мелкие примесные атомы могут диффундировать по междоузлиям, не сильно смещая атомы матрицы.

Если размер атома примеси равен величине узлового атома, может реализоваться механизм непрямого перемещения междоузельной конфигурации. При этом атом примеси из междоузлия смещается в узел, выталкивая атом матрицы в междоузлие. Затем все повторяется. Это так называемый гантельный механизм.

В плотноупакованной атомной решётке может реализоваться краудинный механизм, когда избыточный атом находится в ряде атомов, равномерно смещая около десяти соседних атомов.

Считается, что наиболее распространённым является вакансионный механизм в системах замещения с примерно одинаковыми атомами. Атом совершает скачок в пустой соседний узел, образуя вакансию на первоначально занятом узле. Если одновременно диффундируют соседние вакансии, то говорят о дивакансионном механизме.

При некоторых условиях возможно смещение соседних атомов к вакансии. Если величина смещения такова, что

правильная структура решётки исчезает, то возникает релаксированная область. В ней атомы могут совершать нерегулярные движения, как в жидкости. Это релаксационный механизм диффузии.

Перечисленные механизмы диффузии охарактеризованы по Дж. Маннингу [133].

Наименее изучена диффузия атомов по поверхностям. Однако установлено, что "...поверхность может рассматриваться как двухмерная среда, ограниченная с одной стороны адсорбированным слоем, а с другой - объёмом, обладающим высокими потенциальными барьерами для диффузии атомов" [31, с.31]. В качестве поверхностного слоя можно рассматривать до 4-х атомных слоёв.

Амплитуда колебания атомов в поверхностном слое в 1,5 - 2,5 раза выше, чем в объёме. И разрыв увеличивается по мере повышения частоты колебания решётки до $0,5 \cdot \Theta_d$ (Дебаевской частоты). Это свидетельствует о том, что, при прочих равных условиях, скорость диффузии в поверхностном слое выше, чем в объёме кристалла. А также о том, что с увеличением температуры скорость диффузии растёт быстрее в поверхностном слое, чем в объёме.

Коэффициент диффузии в кристалле зависит от подвижности атомов [127, с.10]:

$$D = b \cdot \chi_0 \cdot T, \quad (13.3)$$

где D - коэффициент диффузии;

b - подвижность атомов данного сорта;

χ_0 - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура.

Экспериментальные значения коэффициента диффузии часто описывают формулой Аррениуса:

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q / \chi_0 \cdot T), \quad (13.4)$$

где D_0 - предэкспоненциальный множитель;

Q - экспериментальная энергия активации.

Коэффициент диффузии для одномерной диффузии определяется первым законом Фика:

$$\mathfrak{J} = -D \cdot \partial c / \partial x, \quad (13.5)$$

где \mathfrak{J} - число диффундировавших атомов;

∂c - концентрация атомов;

∂x - линейное расстояние.

Для трёхмерного случая:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial(-D \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} = D \frac{d^2 c}{dx^2} \quad (13.6)$$

где t - время.

Это уравнение называется вторым законом Фика.

Общепринятым является представление об уменьшении коэффициента диффузии с ростом массы диффундирующего атома. Это так называемый изотопный эффект. Он вытекает из классической теории реакций. Частота скачков прямо зависит от вибрационной частоты колебания решётки. Но частота колебания решётки обратно пропорциональна корню квадратному из масс изотопов [133, с.148].

Следовательно, с ростом массы атома скорость его диффузии уменьшается.

13.3. Твёрдофазная диффузия как кусочная функция атомных параметров

В справочнике "Свойства элементов" приведены параметры взаимной диффузии различных элементов. Примеси диффундировали в одноэлементных кристаллах. Анализ данных нами выполнялся на диаграммах *коэффициент диффузии - атомные параметры*. Рассматривалась диффузия в одноэлементных кристаллах 16 элементов.

Было установлено, что коэффициент диффузии D коррелируется в разных случаях с одним или несколькими атомными параметрами: с атомным радиусом (R), с электроотрицательностью (Θ), с Дебаевской температурой (θ) атомов диффундирующих элементов, а также с положением элементов внутри периода. Последний параметр (e) оценивался числом электронов от элемента до ближайшего инертного газа данного или предыдущего периода. Величина e показывает, сколько электронов атом должен отдать ($+e$) или присоединить ($-e$), чтобы электронная оболочка стала такой же, как и у инертного газа. Например, для Ca $e=+2$, для Cl $e=-1$, для Si $e=+4$. Атомы, отдающие электроны, названы нами электронофобами; присоединяющие электрон - электронолюбями.

Корреляция величины D для кристалла может быть с 1-4 атомными параметрами примесей. Она может быть прямая (+), обратная (-) или резонансного типа (o). В последнем случае диффузия возрастает с приближением значения

параметра диффундирующих атомов к значению параметра атома матрицы.

На D-R диаграммах диффундирующие элементы образуют относительно упорядоченное отображение периодической системы элементов. Это заключается в следующем (рис. 13.1):

- 1) в последовательном укладывании элементов одного периода па прямые или изогнутые отрезки линий;
- 2) в некоторых случаях в последовательном субпараллельном расположении этих линий в зависимости от номера периода;
- 3) в схожести рисунков отображения для нескольких элементов - растворителей.

Для типизации отображений на диаграммах была применена следующая формализация. Случаю, если рост D коррелировался с увеличением номера периода, а значит и массы атома, присваивался знак (+), т.е. M^+ , где M - масса атома. Уменьшение номера периода отмечалось как M^- .

Далее рассматривался вид корреляции диффузии с атомным радиусом всех элементов, изображённых на D-R диаграмме.

По двум параметрам: массе M и радиусу R атома применены установлены 4 типа отображений периодической системы элементов на диаграммах:

1. $M^+ R^0$ (в кристаллах Cu, Ag, Zn, Mo, Fe, Ge, Zr, Al, Au).
2. $M^- R^0$ (в Si при $R > R_{Si}$).
3. $M^+ R^+$ (в кристаллах U, Ti, W).

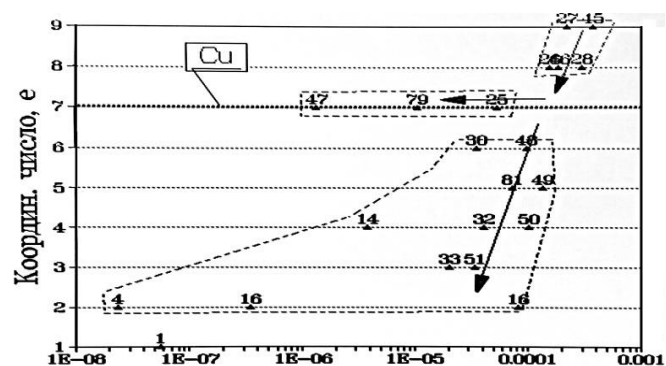
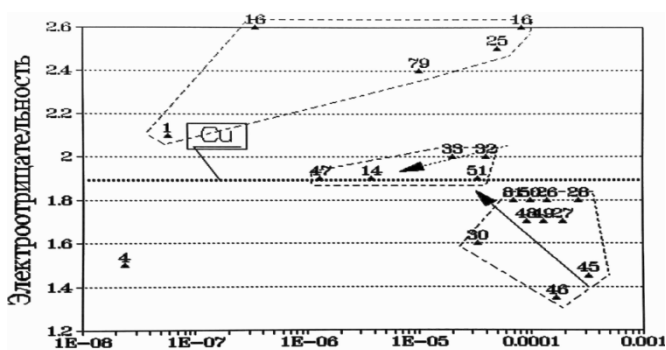
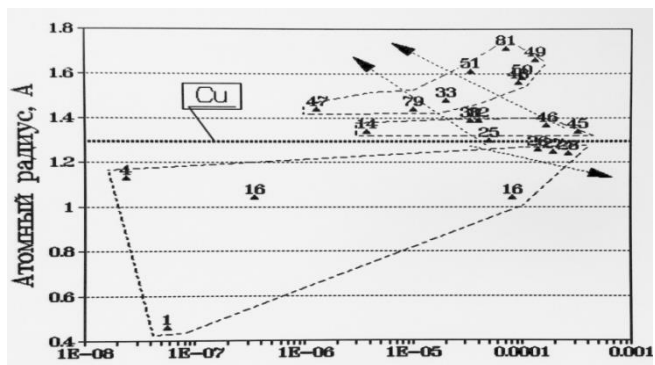


Рис. 13.1. Пример диаграмм для анализа влияния атомных параметров примесных элементов на их твёрдофазную диффузию. Приведён пример для матрицы из Cu.

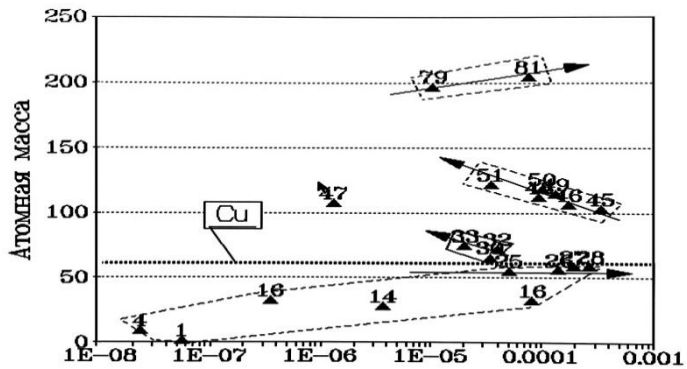
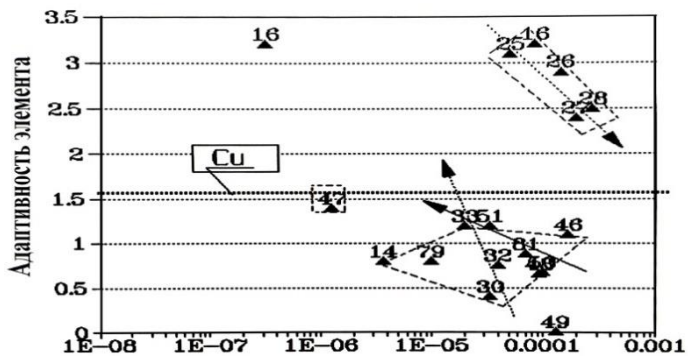
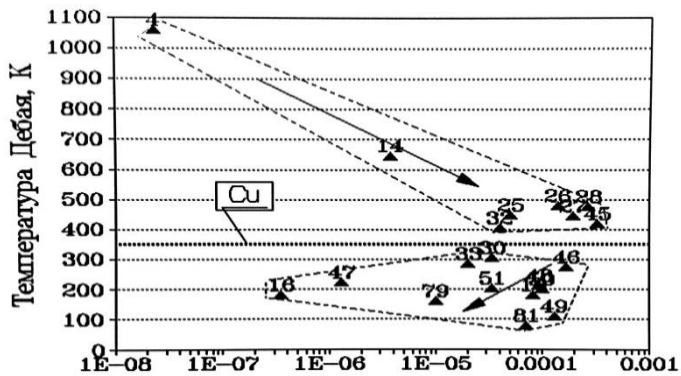


Рис. 13.1. Продолжение. Стрелки показывают рост массы внутри группы. Понятие "Адаптивность элемента" см. на стр. 299.

4. $M^- R^+$ (в Hg, Pb).

В том числе случай M^+ реализуется с вероятностью 0,85, случай R^0 - с вероятностью 0,73.

Дальнейшая детализация проводилась по корреляции D с изменением атомных радиусов элементов одного периода. Было установлено, что рост D следующим образом коррелируется с R:

1. r^- (в кристаллах Cu, Ag, Zn).
2. r^0 (в кристаллах Mo, Fe, Ge, Zr, Al, Au).
3. r^+ (в кристаллах Si, U, Ti, W, Hg, Pb).

Таким образом, по корреляции D с M, R, или по типу отображений диффундирующих элементов на диаграммах D-R, можно выделить 4 группы одноатомных кристаллов:

1. $M^+ R^0 r^0$ (кристаллы Fe, Au, Mo, Zr, Ge, Al).
2. $M^+ R^0 r^-$ (кристаллы Ag, Cu, Zn).
3. $M^+ R^+ r^+$ (кристаллы U, W, Ti).
4. $M^- R^+ r^+$ (кристаллы Pb, Hg, Si).

Для выяснения причины объединения одноэлементных кристаллов в указанные группы необходимо рассмотреть другие диаграммы: D-Э, D-Θ, D-е. В табл. 13.1 показаны соответствующие тому или другому кристаллу связи диффузии с атомными параметрами примеси. Характеристика атомов матрицы, т.е. кристалла, дана на качественном уровне.

Таблица 13.1

Вид корреляции коэффициента диффузии элементов
с их атомными параметрами

Кристалл					Диффундирующие								Рост D связано с
Эл-т	M	Э	e	θ	R	r	M	Э	e	θ	X		
Fe		max	max	max	0,+	0	+	⊖		⊖	-4,1	снижением периода решётки	
Au	max	max	-max	min	0	0		⊖		⊕	-5,75		
Ag		max	-max	min	0	-	+	⊖	⊕	⊕	-4,5	опережают электронофобы (+e)	
Cu		max	-max		0	-	+	⊖	⊕	0	-5,14	родство m, n электронных слоёв	
U	max	min	+6	min	+	+	+	⊖	⊖	⊖	-6,45	родство p, q электронных слоёв	
W	max		+6		+	+	+	⊖			-5,7	снижением валентности	
Mo			+6		0	0	+	0	[+]	[0]	-8		
Hg	max	max	-6		⊕			[+]		⊕	-9,6	ряд e = (+2, +1, -7, -6, -5, -4)	
Zn			-6		⊕	-	+	[+]	⊕		-5,3	снижением валентности	
Zr			+4		0	0	+			[+]	-6,6		
Ti			+4		+	+	+	[-]			-6,9		
Si		max	±4	max	0	+	±	0	⊕	⊕	-4,9	рост валентности	
C		max	±4	max	0		+	[-]	[0]	⊖	-2,5		
Pb	max	max	-4	min	⊕	⊕	-	[-]	[0]	[0]	-5	сходство электронных слоёв	
Ge		max	-4		0	0	+	[+]		[+]	-5,2	опережают электронофобы (-e)	
Al			+3		0	0	+	⊖		[0]	-7,6	опережают крупные атомы	

Примечание: M - масса атома, Э - электроотрицательность, θ - температура Дебая, e - число электронов от атома при- меси до инертного газа (расстояние до инертного газа), R - атомный радиус всех



элементов, r – атомный радиус элементов периода.
Вид корреляции: (+) прямая, (-) обратная, (0) резонансная.
Выраженность корреляции: \oplus сильная, \ominus средняя, \oplus слабая,
 \dagger весьма слабая, $[+]$ незначительная.

Достаточно внимательно осмотреть табл. 13.1, чтобы прийти к выводу, что диффузия в одноэлементных кристаллах является многофакторным и сложным процессом, который трудно описать одной формулой. Она происходит в результате конкуренции между различными управляющими факторами: взаимодействием атомных параметров элементов примеси и кристалла. В то же время существует мнение Дж. Маннинга о том, что "...динамические характеристики примеси не зависят от атомной массы и силовых констант кристалла.." [133, с.157]. Очевидно, что это мнение ошибочно.

Изучение влияния на скорость диффузии параметров как диффундирующих атомов, так и атомов кристалла позволило прийти к следующим выводам (рис. 13.2, 13.3):

1. Коэффициент диффузии растёт по мере уменьшения сходства между атомами растворителя и примеси.

2. Рост коэффициента диффузии сопровождается увеличением числа коррелирующих параметров атомов примеси и ростом общей коррелированности с ними.

Таким образом, если атомы кристалла сильно отличаются от диффундирующих атомов примеси, то растёт скорость диффузии. И коэффициент диффузии начинает сильнее коррелироваться с атомными параметрами примеси.

Степень несходства (V) свойств атомов кристалла и примеси вычислялась по формуле (13.7):

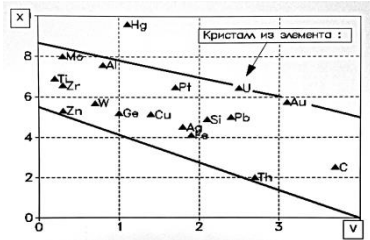


Рис. 13.2. Рост скорости диффузии (D) в кристаллах по мере увеличения различия (V) параметров атомов от средних параметров диффундирующих элементов. X-показатель степени при D.

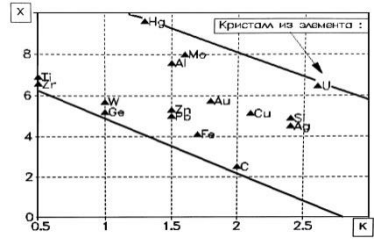


Рис. 13.3. Рост скорости диффузии (D) в кристаллах из-за увеличения ее коррелированности (K) с атомными параметрами кристалла.

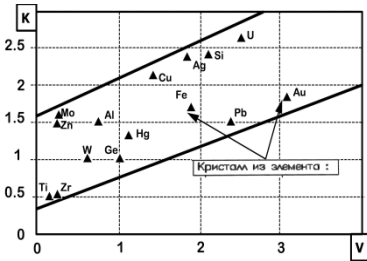


Рис. 13.4. Рост коррелированности (K) диффузии с атомными параметрами кристалла по мере увеличения их различия (V) от средних параметров диффундирующих элементов.

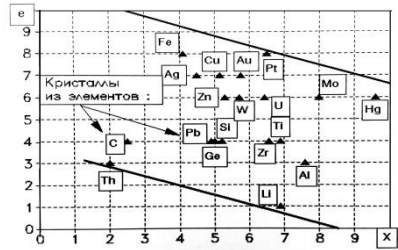


Рис. 13.5. Снижение скорости диффузии по мере уменьшения числа электронов, необходимых до конфигурации электронной оболочки инертного элемента.

$$V_i = \frac{2(C_i - \bar{C})}{\Delta C}, \quad (13.7)$$

где V_i - отклонение свойств по i -му параметру;

C_i - значение i -го параметра атома матрицы;

$\bar{C} = C_{\min} + \frac{1}{2}(C_{\max} - C_{\min})$. \bar{C} - среднее значение i -го параметра;

C_{\max} , C_{\min} - соответственно наибольшее и наименьшее значение i -го параметра.

$$\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$$

Несходство свойств оценивалось по электроотрицательности (Θ), температуре Дебая (θ), атомной массе, по числу электронов до инертного газа (e). Суммарное несходство для кристалла:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (13.8)$$

Степень коррелированности для рис. 13.3 рассчитывалась следующим образом. Сильная корреляция приравнивалась 1, средняя - 0.8, слабая - 0.7, очень слабая 0.6, незначительная - 0.5.

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_n \quad (13.9)$$

где K - степень корреляции D с атомными параметрами примеси;

n - число атомных параметров, с которыми коррелируется D .

Рассматривалась корреляция с электроотрицательностью, с температурой Дебая и с числом электронов до инертного газа.

Поскольку существует взаимосвязь диффузии с V и K , то несомненна связь между несходствами свойств (V) и

степенью коррелированности (K). Управляющим аргументом здесь, скорее всего, является несходство атомов кристалла и примесей:

$$K = f(V) \quad (13.10)$$

Коррелированность (K) минимальна, если кристалл состоит из атомов с координационным числом 4. Это элементы Zr, Ti, Ge, Pb, C (рис. 13.3).

13.4. Влияние на твёрдофазную диффузию температуры Дебая, электроотрицательности, массы атома и плотности электронной плазмы

Диффузия включает в себя активацию атома и его перескок в другой узел или междоузлие. Активация представляет собой передачу колебательной энергии от атомов матрицы атому примеси. Общепринятым является мнение о прямой зависимости частоты перескока от частоты колебания [133]. Это означает, что чем выше температура Дебая для примеси, тем больше коэффициент диффузии.

Однако, фактически в 46% всех случаев коэффициент диффузии максимален тогда, когда температура Дебая для примеси равна температуре Дебая для атомов матрицы кристалла. То есть, диффузия максимальна, если существует частотный резонанс в колебаниях атомов примеси и кристалла. Это, вероятно, связано с уменьшением времени активации атома примеси вследствие передачи энергии без потерь.

А в 31% всех случаев скорость диффузии действительно растёт с увеличением частоты колебания атомов примеси

(θ^+).

В 23% всех случаев рост коэффициента диффузии сопровождается снижением температуры Дебая. Это показывает, что здесь частота перескока коррелируется с амплитудой колебания примеси, поскольку амплитуда является обратной величиной к частоте.

В 77% всех случаев коэффициент диффузии растёт при снижении *электроотрицательности* атомов примеси. Причина видимо в том, что перескок реализуется с высокой вероятностью тогда, когда атом примеси легко теряет свои внешние электроны.

В 81% случаев увеличение коэффициента твёрдофазной диффузии коррелируется с ростом *массы атома* примеси. Вероятно, здесь работает *соотношение массы атома примеси к массе атома кристалла*. Дело в том, что с увеличением массы атома кристалла среднее значение коэффициента диффузии примесей в нем снижается (рис. 13.5). Чтобы объяснить эти два факта надо предположить гантельный механизм диффузии, или же простой обменный механизм. И в том и в другом случае атом примеси при перескоке выбивает атом кристалла из устойчивого состояния и занимает его место. И чем больше масса атома примеси, тем выше его импульс, что повышает вероятность перемещения атома кристалла под воздействием атома примеси.

При рассмотрении коэффициента диффузии в связи с числом электронов от атома кристалла до инертного газа (**e**) выявлено следующее:

I. С ростом абсолютного значения $|e|$ увеличивается коэффициент диффузии.

2. При $|e| = 4$ в кристаллах из атомов-электронолюбов коэффициент диффузии в 10-100 раз выше, чем в кристаллах из атомов-электронофобов.

Влияние абсолютного значения $|e|$ объясняется ростом плотности электронной плазмы. Согласно теории Фрелиха существует электрон-фононное взаимодействие, когда движущийся электрон непрерывно взаимодействует с атомами решётки, получая от них и передавая им колебания [15, с.339]. Следовательно, увеличение плотности электронной плазмы усиливает межатомное взаимодействие. Это приводит к уменьшению времени активации атома примеси.

Высокая скорость диффузии в кристаллах из атомов электронолюбов объясняется тем, что они более эффективно взаимодействуют с электронами атома примеси. Электроны примеси периодически включаются в электронную оболочку окружающих атомов и возвращаются примеси. Тем самым передача колебательной энергии от атомов кристалла к атому примеси происходит достаточно быстро.

13.5. Влияние эффекта размера атома примеси на твёрдофазную диффузию

При анализе нами был выявлен эффект размера примеси, когда с увеличением атомного радиуса примеси растёт коэффициент диффузии. Наиболее чётко эффект проявляется в кристаллах из тяжёлых металлов (U, W, Hg, Pb), которые трудно выбиваются атомом примеси из потенциальной ямы. Однако процесс выбивания облегчается, если атом кристалла заранее смещён относительно

равновесного состояния. Тогда атом примеси при перескоке достаточно легко выбивает атом кристалла и занимает его место. Понятно, что чем больше величина смещения атома кристалла, тем выше вероятность его выбивания.

Величина смещения атома кристалла зависит от объёма соседнего атома примеси и растёт с увеличением атомного радиуса примеси.

Эффект размера примеси в той или иной степени проявляется в кристаллах почти всех элементов. Он начинается, когда радиус атома примеси превысит на 5-25% радиус атома кристалла (табл. 13.2).

Было изучено влияние различных факторов на начало проявления эффекта размера примеси. Установлено следующее:

1. Атомы -электронолюбы кристалла ведут себя иначе, чем атомы - электронофобы.

2. С увеличением размера ячейки кристалла снижается ΔR . То есть эффект наступает при малом превышении радиуса атома примеси над радиусом атома кристалла. При прочих равных условиях в кристалле из атомов-электронофобов эффект наступает при меньшем ΔR , чем в кристалле из атомов-электронолюбых (рис. 13.6).

3. С увеличением амплитуды колебания (со снижением θ) уменьшается ΔR (рис. 13.7).

4. В кристалле из атомов-электронолюбых (при $-e$) начало эффекта зависит от амплитуды колебания: ΔR снижается с ростом амплитуды (со снижением θ) (рис 13.8).

5. В кристалле из атомов - электронофобов (при $+e$)

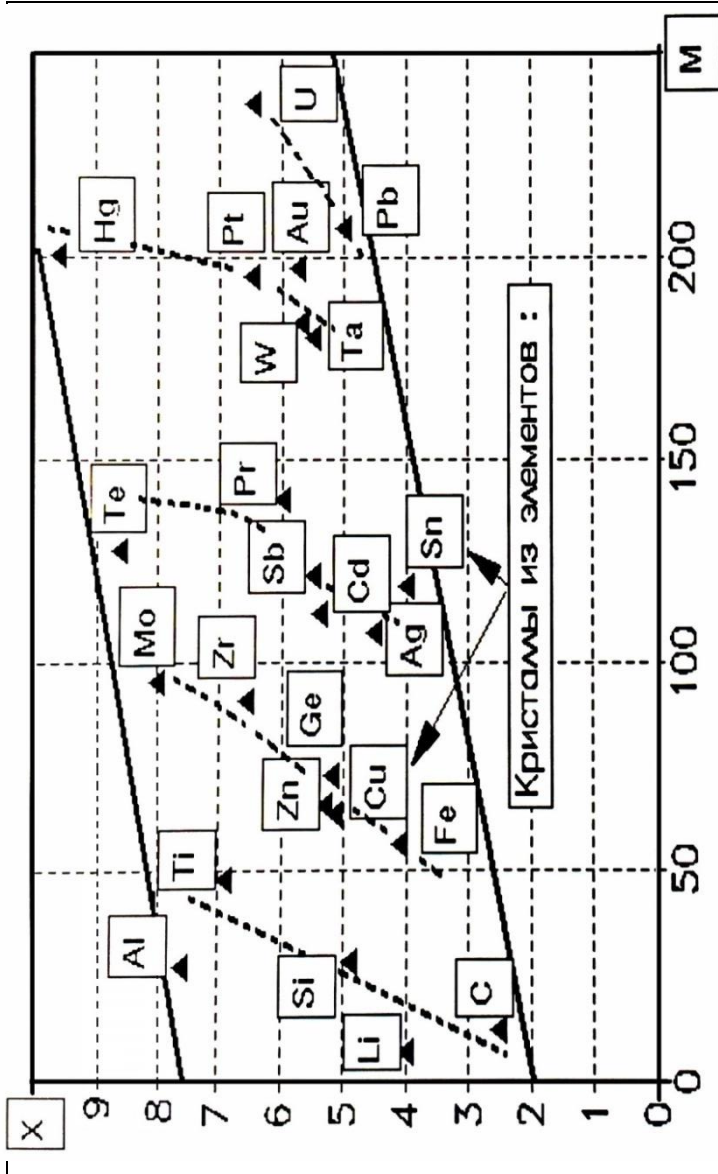


Рис. 13.6. Снижение коэффициента твёрдофазной диффузии (D) по мере роста атомной массы (M) атомов матрицы кристалла. X-показатель степени при коэффициенте диффузии.

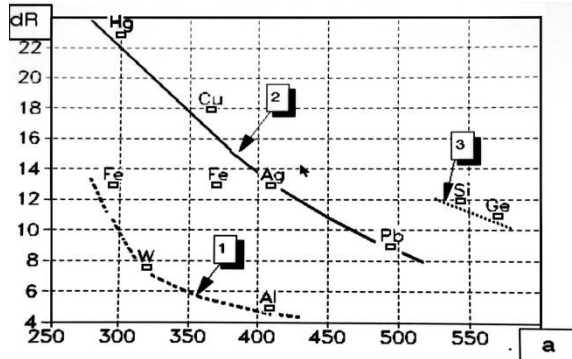


Рис. 13.7. С увеличением размера ячейки кристалла эффект размера примеси наступает раньше. 1-атомы-электронофобы, 2-атомы-электронолюбы, 3-атомы из середины периода.

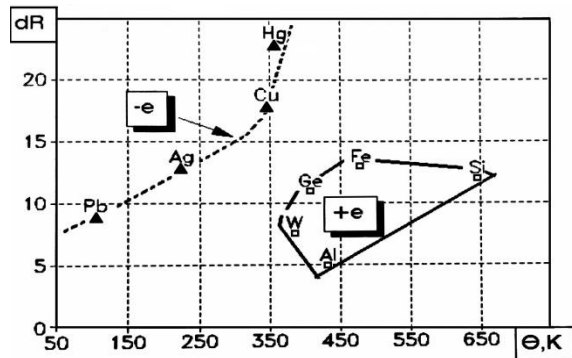


Рис.13.8. С уменьшением амплитуды колебания атомов матрицы эффект размера примеси проявляется позже. См. текст.

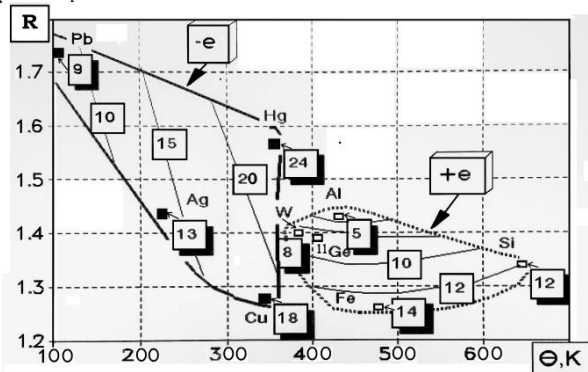


Рис.13.9. Влияние размера атома примеси (R) и Дебаевской температуры (θ) на проявление эффекта размера примеси. Изолинии показывают

эффект в основном зависит от радиуса атома матрицы: ΔR уменьшается с ростом радиуса атома кристалла.

Таблица 13.2

Эффект размера примеси
отличие радиуса атомов примеси и матрицы в процентах.

Кристалл	Начала эффекта и параметры примеси			
	ΔR %	a , нм	R_K нм	$\theta^\circ K$
1	2	3	4	5
Си	18	0,361	0,128	345
Ag	13	0,409	0,144	225
Hg	24	0,299	0,157	397
Ge	11	0,566	0,139	406
Pb	9	0,495	0,174	105
Fe	14	0,296; 0,364	0,126	478
W	8	0,316	0,140	384
Si	12	0,543	0,134	645
Al	5	0,405	0,143	432

Примечание: $\Delta R = (R_n - R_K) : R_K \cdot 100$, где R_n - радиус атома примеси, R_K - радиус атома кристалла; a - размер ячейки кристалла; θ - температура Дебая.

Приведённое позволяет дополнить сказанное о механизме действия эффекта размера примеси. Когда более крупный атом примеси занимает один из узлов решётки, смещая соседние атомы кристалла, то возникает множественная гантельная картина. После активации атом примеси перескакивает в соседний узел, выталкивая хозяина в междоузлие. Оттуда последний может перейти в следующий узел. Затем все повторяется.

Снижение ΔR по мере роста размера ячейки объясняется тем, что величина гантельного смещения атома кристалла здесь выше. Это связано с увеличением незанятого объёма междоузлия по мере роста размера ячейки при прочих равных условиях.

13.6. Влияние ангармоничности колебаний атомов на твёрдофазную диффузию

В кристалле из атомов электронолюбов ($-e$) на основные колебания решётки накладываются высокочастотные ангармонические колебания. Атом кристалла забирает электроны у атома примеси, формируя оболочку инертного газа. Под действием кулоновской силы положительно заряженный атом примеси притягивается к отрицательному иону кристалла. Поскольку электронная оболочка примеси отличается от оболочки атомов кристалла, то возникшая связь неустойчива. Электроны возвращаются атому примеси, который занимает своё прежнее место. Затем аналогичное взаимодействие повторяется с другим атомом решётки.

Благодаря высокочастотной составляющей, которая относится к валентным колебаниям, возрастает величина смещения атома примеси относительно атомов кристалла. А начальное смещение атома кристалла относительно узла, обусловленное большим размером атома примеси, способствует выбиванию атома кристалла в результате перескока атома примеси.

Уточняя механизм активации отметим, что существенным является ангармоничность колебания атома

примеси. Это обеспечивает взаимное смещение его положения относительно атомов решётки. Следовательно, способствует более быстрой диффузии.

Энергия активации затрачивается на увеличение частоты колебания атома в основной моде. Для достижения одинаковой частоты колебания более тяжёлых атомов требуется больше энергии. Это связано с их высокой инерционностью.

Больше энергии потребляется и при активации до определённой частоты атомов - электронолюбов по сравнению с атомами - электронофобами. Причина этого в образовании локальных высокочастотных колебаний, частота которых в 3-4 раза выше основных колебаний решётки [134]. Следовательно, лишняя энергия при активации нужна для передачи более высокой кинетической энергии атому примеси. Высокая кинетическая энергия обеспечивается большей массой атома, или же большими ускорениями в области высокочастотных колебаний.

И чем больше энергии активации затрачивается сверх обычной нормы, тем выше коэффициент диффузии. В качестве нормальной энергии для элемента здесь рассматривается энергия активации самодиффузии элемента (рис. 13.10).

В большинстве из рассмотренных одноэлементных кристаллов наиболее интенсивная диффузия происходит следующим образом. Быстро диффундирующие атомы примеси имеют одинаковые размеры с атомами кристалла и плотно с ними контактируют. В кристаллах, состоящих из тяжёлых атомов (Hg, W, U, Pb) и из атомов с координационным чис-

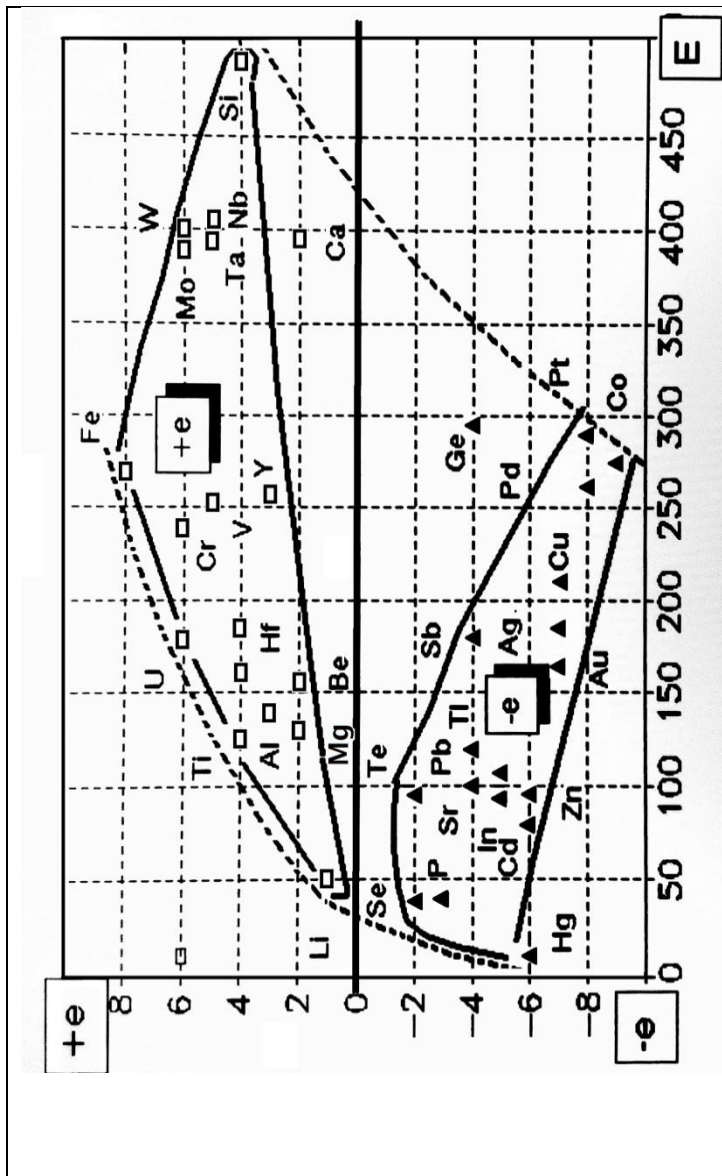


Рис. 13.10. Взаимосвязь между энергией активации самодиффузии (E) и числом электронов (e) необходимых для образования конфигурации электронной оболочки ближайшего инертного газа.

лом 4 (Si, Ti) быстро диффундируют более крупные атомы, чем атомы кристалла. Благодаря этому обеспечивается смещение из узлов соседних атомов кристалла, т.е. возникает множественная гантельная картина.

Ангармоничность колебания примеси снижает время активации и повышает вероятность перескока. Она возникает из-за отличия масс атомов примеси и кристалла; из-за большого радиуса атома примеси, смещающего атомы решётки; а также в кристаллах из атомов-электронолюбов. Высокочастотные ангармонические колебания ускоряют диффузию в Ge, Ag, Zr, Hg. В кристаллах C, Fe вероятность перескока повышается вследствие роста амплитуды колебания. В кристаллах из атомов-электронолюбов (Pb, Ge, Zn, Au, Ag, Cu, Hg, Si) возникают высокочастотные валентные колебания, повышающие коэффициент диффузии.

13.7. Некоторые особенности твёрдофазной диффузии в металлах

Перескок после активации происходит быстрее, если связь между ионом примеси и внешними электронами является слабой. Это условие реализуется в кристаллах из атомов Cu, Al, Pb, Ag, Au, C, W, U, Ti, Fe, где опережают атомы примеси о минимальной электроотрицательностью.

Атом примеси при перескоке не возвращается назад, а закрепляется в следующем узле тогда, когда имеет большой импульс, достаточный для выбивания из узла атома-хозяина.

Такое явление характерно для всех одноэлементных кристаллов, кроме кристаллов Pb и Hg.

Остановимся на особенностях диффузии в матрицах из элементов, приведённых в табл. 13.1.

1. Элементы с $|e| > 6$: Fe, Au, Ag, Cu.

Fe - характеризуется малым атомным радиусом и большой электроотрицательностью, быстро диффундируют атомы, легко отдающие электроны (Ξ_{\min}), более тяжелые и более крупные, имеющие большую амплитуду колебания

Cu - имеет малый атомный радиус, большую электроотрицательность, электронолюб. Коэффициент диффузии большой у элементов с минимальным радиусом внутри периода, с наименьшей электроотрицательностью; внешние электронные оболочки которых схожи с медью. Однако Ag и Au, 2 внешних электронных слоя у которых идентична электронным слоям меди, диффундируют плохо.

Ag - характеризуется большой электроотрицательностью, большой массой атома, низкой температурой Дебая. Диффузия более интенсивна у элементов с высокой температурой Дебая, с низкой электроотрицательностью, с большей массой и с малым атомным радиусом.

Au - электроотрицательность и масса выше, чем у серебра, а температура Дебая ниже. Коэффициент диффузии выше у атомов с малой электроотрицательностью, с большой массой, с резонансной частотой колебания.

2. Элементы с $|e| = 6$: V, W, Mo, Hg, Zn.

V - имеет большой атомный радиус, малую электроот-

рицательность, большую атомную массу и низкую температуру Дебая. Быстро диффундируют крупные и тяжелые атомы с малой электроотрицательностью и с низкой температурой Дебая; внешние электронные слои которых идентичны слоям атома урана.

W - характеризуется большой массой. Диффузия выше у атомов с большим радиусом и с большой массой, с малой электроотрицательностью.

Mo - быстрее происходит диффузия у атомов с большей массой и с резонансными параметрами по размеру, электроотрицательности и по частоте колебания.

Zn - быстрее диффундируют атомы с большей массой и с минимальным радиусом внутри периода, с меньшей валентностью, с большей электроотрицательностью.

Hg - характеризуется большим атомным радиусом и большой массой. Диффузия более интенсивна у атомов с высокой температурой Дебая; с радиусом, превышающим радиус атома ртути; у электронолюбов с малым координационным числом.

3. Элементы с $|e|=4$: Zr, Ti, Si, C, Pb, Ge.

Zr - атомы крупные, температура Дебая низкая. Более быстрая диффузия у атомов с большей массой, с высокой температурой Дебая»

Ti - интенсивно диффундируют атомы с большим радиусом, с низкой электроотрицательностью, с большой массой.

Si - характеризуется большой электроотрицательностью, малой атомной массой, высокой температурой Дебая.

Быстрее диффундируют атомы, схожие с атомом кремния по координационному числу, по электроотрицательности, по температуре Дебая; внутри периода - элементы с большим радиусом. С массой атома корреляция прямая, если его размер меньше, чем у атома кремния; и обратная - если радиус больше. То есть для мелких атомов примеси работает эффект массы, для крупных - эффект размера примеси. С увеличением валентности диффузия ускоряется.

C - атомы мелкие, электроотрицательность большая, масса маленькая, температура Дебая очень высокая. Диффузия интенсивна для атомов примеси с малой электроотрицательностью; схожих с атомом углерода по координационному числу; с большой амплитудой колебаний, с большой массой.

Pb - характеризуется большой массой атома, радиусом, электроотрицательностью и низкой температурой Дебая. Быстро диффундируют атомы с большим радиусом, с малой электроотрицательностью, с меньшей массой, с резонансной частотой и координационным числом, с внешней электронной оболочкой, похожей на оболочку свинца.

Ge - характеризуется большой электроотрицательностью.

Легко диффундируют атомы с высокой температурой Дебая и с большой электроотрицательностью, атомы-электронолюбы.

4. Элемент с $e=3$: Al.

Al - характеризуется малой массой. Коэффициент диффузии выше у атомов с малой электроотрицательностью, большой массой, с радиусом, превышающим радиус атома алюминия.

13.8. Механизм твёрдофазной диффузии в зависимости от электронной плазмы в кристалле

При рассмотрении диффузии в зависимости от атомных параметров кристалла можно увидеть следующие основные закономерности. Главными факторами, управляющими диффузией примеси в кристаллах из атомов-электронолюбов, являются Дебаевская температура ($\rho=0,78$) и расстояние до инертного газа ($\rho=0,67$) (см. табл.13.1). Наиболее интенсивно диффундируют атомы с большой температурой Дебая и с большим значением $|e|$. Мы ранее отметили, что успех при выбивании атома кристалла из узла решётки определяется либо эффектом размера примеси, обеспечивающим исходное смещение из узла атома кристалла, либо высокой энергией атома примеси. Энергия атома растёт с увеличением его массы и частот колебания. Здесь эффект размера примеси слабо работает, поскольку внешние электроны атома примеси включаются во внешние слои атомов-электронолюбов решётки. В то же время частота колебания θ определяет начало действия эффекта размера примеси (см.рис. 13.7) в кристаллах из атомов - электронолюбов.

Следовательно, вероятность выбивания атома кристалла из узла решётки растёт с увеличением колебательной энергии атома примеси.

В кристаллах из атомов - электронофобов главным фактором, управляющим диффузией примеси, является низкая электроотрицательность атома примеси. Причина, видимо, в

том, что атомы кристалла и примеси достаточно легко теряют внешние электроны и взаимодействуют между собой как катионы. То есть в электронной плазме находятся положительные ионы. И чем легче атом примеси теряет электрон, тем выше вероятность его быстрой активации в результате электрон - фононного взаимодействия.

13.9. Основные выводы по главе "Кусочная функциональная зависимость твёрдофазной диффузии от атомных параметров"

1. Твёрдофазная диффузия зависит по меньшей мере от пяти атомных параметров: от атомного радиуса, от электроотрицательности, от Дебаевской температуры, от числа электронов, необходимых атому для образования электронной оболочки инертного элемента; от атомной массы.

2. Быстрее диффундируют более тяжелые атомы примеси ($r=0,87$) и легко теряющие электроны ($r=0,67$).

3. Коэффициент диффузии увеличивается по мере роста Дебаевской температуры до резонансного значения и выше ($r=0,77$).

4. Диффузия происходит по гантельному механизму и быстрее диффундируют атомы примеси, радиус которых превышает радиус атома кристалла более чем на 5 - 25%.

5. Быстро диффундируют те атомы примеси, которые либо заранее смещают атомы кристалла из узлов решётки, либо обладают большой энергией за счёт массы или частоты колебания.

6. Смещение атомов кристалла из узлов решётки

обусловлено большим объёмом атома примеси. Явление нами названо эффектом размера примеси.

7. Чем сильнее отличаются атомы примеси от атомов кристалла, тем быстрее они диффундируют.

Отметим, что второй вывод позволяет определить направление преобладающей миграции атомов в природных процессах.

Глава 14. ТВЁРДОФАЗНАЯ ДИФФУЗИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ВЕЩЕСТВА ЗЕМНОЙ КОРЫ

14.1. Изученность проблемы дифференциации химических элементов в земной коре

Проблема дифференциации химических элементов имеет две стороны. Первая - это их распространённость в природных объектах. Вторая - причины перераспределения элементов в природных процессах. Широкомасштабными исследованиями относительной распространённости химических элементов впервые стал заниматься Ф.Кларк (Clarke, 1899). Несколько позднее исследования были продолжены им вместе с Вашингтоном (Clarke P.W., Washington H.S., 1924)

На основании данных, собранных Кларком и Вашингтоном, Харкинс установил, что элементы с чётными атомными числами более распространены, чем с нечётными (Harkine, 1917). Эта закономерность была названа правилом Оудо-Харкинса. А.Е.Ферсман, исследуя представления Л.Мейтнер о "геолио-группах" подсчитал, что распространение изотопов в природе подчиняется закону кратности четырём.

В 1850 году была выдвинута гипотеза о сходстве среднего состава земли с составом метеоритов. В.М.Гольдшмидт в 1922 г. детально разработал эту гипотезу, используя известный из металлургии факт о распределении фаз в процессе доменной плавки руды на металлическую (внизу), сульфидную (в середине), силикатную и газовую (вверху) составляющие. Он предположил, что вещество мете-

орита содержит три основные зоны земли. Это - силикатная оболочка (кора), окисно-сульфидный слой (мантия) и железо-никелевое ядро.

Для описания примесных элементов, сконцентрированных в железной фазе метеоритов, он использовал термин сидерофильный, в сульфидной - халькофильный, в силикатной фазе - литофильный. Элементы, преимущественно встречающиеся в атмосфере, были названы атмосфильными. Позднее, вместе с И.Ноддак и В.Ноддак было продолжено систематическое исследование элементов в этих фазах. В последующие 30 лет ими совершенствовалась эта классификация элементов.

Правильность классификации Гольдшмидта базируется на сходстве электронных конфигураций элементов одной группы. У литофильных элементов валентные электроны, находятся над оболочкой из 8 электронов. Валентные электроны поэтому экранированы от ядра, а элементы стремятся к образованию ионов. В.В.Щербина (1971 г.) к числу литофильных относит 64 элемента: щелочные элементы и щелочноземельные: В, Al, Sc, лантаноиды, актиноиды, С, Si, Ti, Zr, Hf, Р, V, Nb, Та, О, Cr, W, галогены, Mn, возможно Те, и At. У халькофильных элементов валентные электроны экранированы от ядра оболочкой из 18 электронов. Они стремятся к образованию ковалентных связей с серой. К ним относятся 18 элементов: Cu, Ag, Hg, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Si, Se, Те, Sn, Ca, Ge, Cd, Tl, Po. В природе они встречаются в виде сульфидов, в самородном состоянии, в виде селенидов и теллуридов.

У сидерофильных элементов достраиваются две внешние электронные оболочки. Поэтому положительный заряд ядра оказывает сильное воздействие на внешние электроны, которые при обрётённых условиях становятся не вполне доступными для связи с другими элементами. Следствием является нахождение этих элементов в самородном состоянии. К ним относятся С, Со, Мо, Pd, Re, Pt, P, Ni, Ru, Sn, Os, Au, Fe, Ge, Rh, Та, Ir.

Атмофильные элементы имеют заполненную электронную оболочку - это инертные газы, а также N и H. В природе находятся главным образом в самородном состоянии.

К биофильным элементам относятся: O, C, H, N, Ca, Mg, K, Na, S, Cl, P и Fe. Эти элементы образуют живые организмы и обеспечивают их стабильность.

Исследованиями распространённости и геохимической специализации элементов занимались советские геологи В.И.Вернадский, А.Е.Ферсман, А.М.Заварицкий и др.

В.И.Рехарский (1964 г.) установил, что отношение содержания элемента в основных породах к содержанию в кислых породах (коэффициент концентрации) определённым образом подчиняется периодичности менделеевской таблицы. Аналогичную связь для ультраосновных пород и метеоритов обнаружил Ю.Г.Щербаков (1965 г.). *Это явление он объяснил изменением температуры плавления соединений различных элементов.*

Приведённые закономерности фиксируют факт определённой специализации химических элементов. Или дают качественную взаимосвязь распространённости элементов с пе-

риодической системой Менделеева.

К попытке количественно оценить распространённость химических элементов в природе относится установление Гольдшмидтом (1937 г.) закономерности экспоненциального уменьшения содержания элементов по мере роста их атомного номера (веса). Клейн, Бесков, Треффенберг (Klein, Beskow, Treffenberg, 1946 г.) эту закономерность пытались объяснить исходя из теории равновесия Вейцзеккера (1937 г.). Согласно этой теории, современное состояние генерации элементов равновесно. Однако, теория не объясняет большую распространённость тяжёлых элементов 6 и 7 периодов.

Это несоответствие обходит теория нейтронного захвата, по которой химические элементы возникли не в результате состояния равновесия, а их количество прогрессивно возрастало. Эта теория была разработана Альфером, Бете и Гамовым (Alter, Bethe, Gamov, 1948 г.).

Планетарная дифференциация химических элементов происходит в результате гравитационной сегрегации в соответствии с теорией Гольдшмидта (1937 г.). То есть кристаллы тяжёлых элементов опускаются вниз, а лёгкие фракции всплывают. Именно термо-гравитационной химико-плотностной конвекции обязано зональное строение Земли (Е.В.Артюшков, 1979 г.). Л.Н.Овчинников (1988 г.) считает, что при этом происходило отделение летучих, переносивших рудное вещество вверх, в зону рудонакопления. Он говорит, что не было препятствий для "...экстракции металлов из окружающей среды ...на всем протяжении движе-

ния флюидов от ядра до верхней части литосферы - зоны рудоотложения" [157, с.26].

Латимер считает, что дифференциация химических веществ происходила ещё в процессе аккреции [Latimer, 1950 г.). Более тяжёлое железо устремляясь к центру протопланетного пылегазового облака, приобретало более высокую скорость. И, благодаря простому строению кристаллической решётки, быстрее кристаллизовалось. Поэтому в центре облака вначале формировалось железное ядро. По тем же законам вокруг ядра возникала ортосиликатная мантия, а затем образовалась более лёгкая базальтовая кора.

Согласно Л.Н. Овчинникову [157, с.33] ценность химических элементов возрастает с уменьшением их кларка. И промышленность все в большей степени нуждается в тех элементах, которые находятся в примесной форме в кристаллах из основных элементов.

Известный закон Гольдшмидта отражает зависимость содержания примесного элемента в минерале от его ионного радиуса и электрического заряда. Содержание возрастает с приближением ионного радиуса примеси к ионному радиусу матрицы и с увеличением заряда примеси. Однако существует значительное число исключений из этого правила.

Для объяснения фактов Аренс [Ahrens, 1953] ввёл концентрацию функции поля, тождественную кулоновой силе для пробного заряда. Согласно этой поправке содержание примеси возрастает с увеличением функции поля при равенстве валентности и ионного радиуса.

Рингвуд [Ringwood, 1955] в развитие идей Гольдшмидта выяснил, что при кристаллизации магмы в первую очередь в кристалл проникнет примесный атом с наименьшей электроотрицательностью. Другими словами, если у двух ионов заряды равны, то в кристалл войдёт ион меньшего размера, а при равенстве величины ионов войдёт ион большего заряда.

Ионы с зарядом больше трёх в жидкой фазе образуют комплексы, окружая себя анионами. И кристаллическую решётку они часто достраивают этими комплексами. Для них Рингвуд установил следующие правила кристаллизации: ионы, образующие нететраэдрические комплексы, или имеющие заряд выше 4-х, или очень крупный размер, концентрируют - ся в остаточных расплавах.

Для лантаноидов, которые образуют нететраэдрические комплексы, Г.Мюкка и П. Мёллер [G.K.Muoke, P.Moller, 1988] установили некоторые особенности кристаллизации. В магматическом расплаве тяжелые лантаноиды стремятся войти в кристалл, разрушая комплексы жидкой фазы. Остаточный расплав тем самым обогащается лёгкими лантаноидами, имеющими больший ионный радиус. В гидротермальных растворах, наоборот, лёгкие лантаноиды входят в кальциевые минералы. Авторы отмечают, что ион может войти в кристалл вместе с лигандами, если строение комплекса соответствует строению кристалла.

Л.Н.Овчинников выявил специализацию примесных элементов в различных типах магматических пород [157,с.22]. Он установил, что запасы металлов в месторождении возра-

стают с увеличением кларков этих металлов. Он предполагает существование единого закона, ответственного за распределение вещества в земной коре и рудных месторождениях: "...можно предположить, что не только слагающие земную кору силикатные горные породы испытывают дифференциацию, но и металлы, рассеянные в земной коре и верхней мантии, дифференцируются по вертикали с зональностью, моделями которой могут служить зональность геохимических ореолов, распространяющаяся на сотни метров, и зональность распределения месторождений вокруг интрузива, захватывающая километры [157, с.48].

В качестве механизма дифференциации рудного вещества, в ходе которой образуются месторождения, Д.Н. Овчинников рассматривает осадочно-хроматографический. Хроматография "...объединяет широкий круг физико-химических процессов распределения, адсорбции, диффузии, ионного обмена" [157, с.214]. Металлы в растворах переносятся в виде комплексов, и "... зональность рудных тел и ореолов определяется разной устойчивостью комплексных ионов". По пути продвижения рудоносного раствора "...будет наблюдаться последовательное относительное обогащение твёрдой фазы металлами, комплексные ионы которых обладают все большей и большей устойчивостью" [157, с.216]. Устойчивость комплексных ионов оценивается по К.В. Яцимирскому и численно приравнивается к изменению энергии при переходе иона центрального атома комплекса в нейтральное состояние.

Причина различной извлекаемости разных металлов из

расплава и пород, как правило, не выясняется. Извлечение металлов из магматических расплавов происходит [157]:

- 1) в виде водно-хлоридных флюидов;
- 2) газовыми флюидами с комплексными соединениями металлов, устойчивость которых возрастает с повышением температуры;
- 3) в виде соляных расплавов;
- 4) в магнетитовых и сульфидных расплавах, образующихся в результате ликвации или вытеснения железа известняком из силикатной магмы;
- 5) в результате пенной флотации капель атомарных металлов.

Отмечается, что отделение металлов из расплава магмы происходит не одноактно, а "...закономерно сопровождает весь длительный магматический процесс, начиная с самых первых его этапов" [157.с.74].

Рассматривая извлечение металлов из горных пород, Л.Н.Овчинников подчёркивает, что лёгкость извлечения обусловлена нахождением металлов в рассеянной молекулярной или атомарной форме [157, с.77].

Существенным является изменение рудогенеза во времени. Считается, что уменьшение доли высокотемпературных рудных образований и рост доли легкоплавких является следствием "...термической деградации мантии [Рундквист, 1971 г.]. Эпохи глобального разогрева, возможно связанные "... с перестройкой конвективных ячеек" сопровождаются резким увеличением "...числа месторождений такого тугоплавкого металла, как вольфрам" [В.К.Денисенко,1978].

Наблюдается систематическое снижение железистости и марганцовистости изверженных пород [И.И.Абрамович,1984].

Краткий обзор общепринятых представлений и мнений о дифференциации химических элементов в эндогенных процессах выполнен по В.Ф. Барабанову (1985 г.), А.Х.Браунлоу [A.H.Brownlow, 1984], Я.Мияки [Y.Miyake, 1969], А.Н. Тугаринову (1973 г.), Л.Н.Овчинникову (1988 г.), А.Д.Щеглову (1987 г.) и др.

Выделим некоторые важные для нас моменты:

1. Породообразующие химические элементы разделяются в гравитационном поле. Элементы примеси входят в минералы в соответствии с правилом Гольдшмидта-Рингвуда.

2. Зональность месторождений и рудных провинций подчиняется термической зональности и, возможно, правилу устойчивости водно-газовых комплексов рудогенного элемента.

3. Рудогенез меняется во времени от формирования месторождений тугоплавких элементов в сторону легкоплавких.

4. Движение рудоносных растворов соответствует осадочно-хроматографическому механизму, в числе прочих содержащему и диффузию.

Отсюда возникают вопросы, требующие уточнения:

1) нет ли единого фактора, определяющего содержание примеси в разных типах магматических пород?

2) возможен ли одинаковый механизм распределения примесей в магматических породах и металлов в зонах оруденений?

3) только ли плавкостью металлов обусловлена эволюция рудогенеза во времени?

4) какова истинная роль твёрдофазной диффузии в эндогенных процессах?

5) как использовать выводы об особенностях миграции рудогенных элементов на производстве при добыче руды?

14.2. Адаптация породообразующих элементов к гравитационному полю в земной коре

Ведущим фактором дифференциации вещества в земной коре является гравитационное поле Земли. Следовательно, породообразующие элементы, составляющие основную массу вещества, должны подчиняться закону гравитационной сегрегации. Что касается примесных элементов, вхождение которых в минералы регулируется правилом Гольдшмидта-Рингвуда, то на их содержание должны некоторым образом влиять другие внешние факторы, например P-T условия (давление и температура). Рассмотрим влияние гравитационной дифференциации на распределение породообразующих элементов в разных слоях литосферы (таб.14.1).

Для этого просуммируем атомные веса этих элементов следующим образом. По данным таблицы 14.1 построим A-C диаграммы (A - атомный вес элемента, C - его содержание в породе).

Поделим диаграмму на вертикальные прямоугольники шириной по 5%. Если в прямоугольник попадёт более 1 точки, найдём среднюю гипотетическую точку. Она будет характеризовать средний атомный вес гипотетического элемента

для данного прямоугольника .

Таблица 14.1

Породообразующие химические элементы (без кислорода)

Элемент	Атомн. вес, А	Температ. Дебая $\theta^{\circ}\text{K}$	Содержание элемента в породах, С, %					
			Хондрит	Ультраосн.	Осн.	Сред.	Кисл.	Осадочн.
Mg	24	386	14,0	26,0	4,5	2,2	0,6	1,3
Si	28	645	18,0	19,0	24,0	26,0	32,0	24,0
Fe	56	478	25,0	9,9	8,6	5,9	2,7	3,3
Al	27	432	1,3	0,45	8,8	8,9	7,7	10,0
S	32	180	2,0	0,01	-	-	-	-
Ni	59	476	1,35	0,02	-	-	-	-
Ca	40	220	1,4	0,7	6,7	4,7	1,6	2,5
Na	23	160	-	0,6	1,94	3,0	2,8	2,5
K	39	90	-	-	0,8	2,3	3,3	2,3
Ti	48	430	-	-	0,9	0,8	0,23	-

Точки диаграммы последовательно соединим отрезками. Вместо прямоугольников шириной по 5% мы получим трапеции шириной по 5%. Просуммируем длины тех оснований трапеций, которые расположены справа (рис. 14.1):

для хондритов $35+27+26+34+56 = 172$

для ультраосновных пород $47+54+38+28+24 = 191$

для основных пород $40+40+36+35+28 = 179$

для средних пород $28+27,5+27+27+55 = 165$

для кислых пород $35+27+27+27,3+27,5+28 = 172$

для осадочных пород $50+27+27+27,2+27,5+28 = 160$

Для сравнения рассматриваются данные по хондритам - по

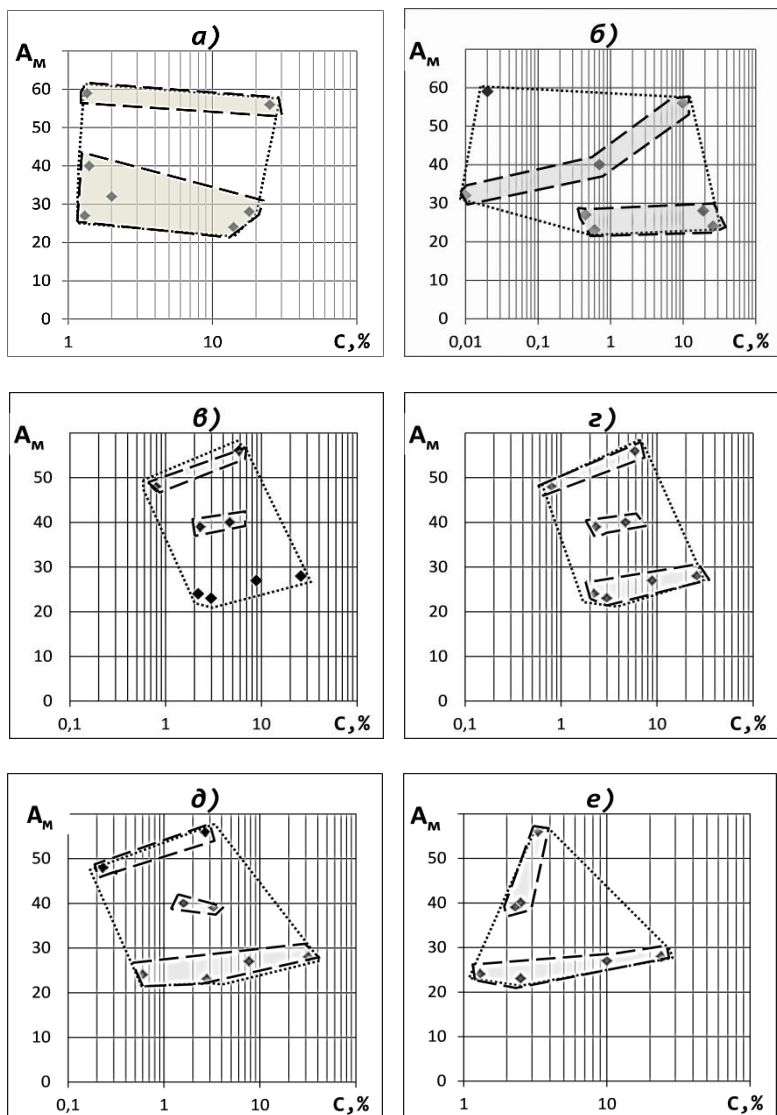


Рис. 14.1. Связь между атомным весом A_M элементов и их содержанием C : а-в хондритах, б-в ультраосновных, в-в основных, г-в средних, д-в кислых, е-в осадочных породах.

осадочным породам.

Полученные значения, назовём их "условная плотность", тождественны интегральной массе единицы объёма горной породы, однако не равны ей. Построим график изменения условной плотности от хондритов до осадочных пород в выведенной последовательности (рис. 14.2). График подтверждает достаточно тривиальный факт снижения плотности в указанной последовательности пород, то есть факт гравитационной сегрегации.

Здесь нас интересует возможность оценки роли факторов среды в адаптации вещества земной коры продемонстрированным выше способом.

Рассмотрим, каким образом в тепловом поле земли меняется соответствующая характеристика породного вещества. Дебаевская температура вещества характеризует его теплоёмкость, то есть способность аккумулировать тепловую энергию без разрушения связей в кристалле. Следовательно, именно ее можно использовать для оценки приспособления горных пород к тепловому полю.

Используя данные таблицы 14.1 построим диаграммы θ -C (θ -температура Дебая, C-содержание элемента). Для каждой породной разности просуммируем значения Дебаевской температуры вышеописанным способом (рис. 14.3):

для хондритов	$380+410+610+480 = 1680$
для ультраосновных пород	$480+570+580+380 = 2010$
для основных пород	$490+540+600+630 = 2260$
для средних пород	$440+510+660+630 = 2140$
для кислых пород	$430+470+520+560+620 = 2600$

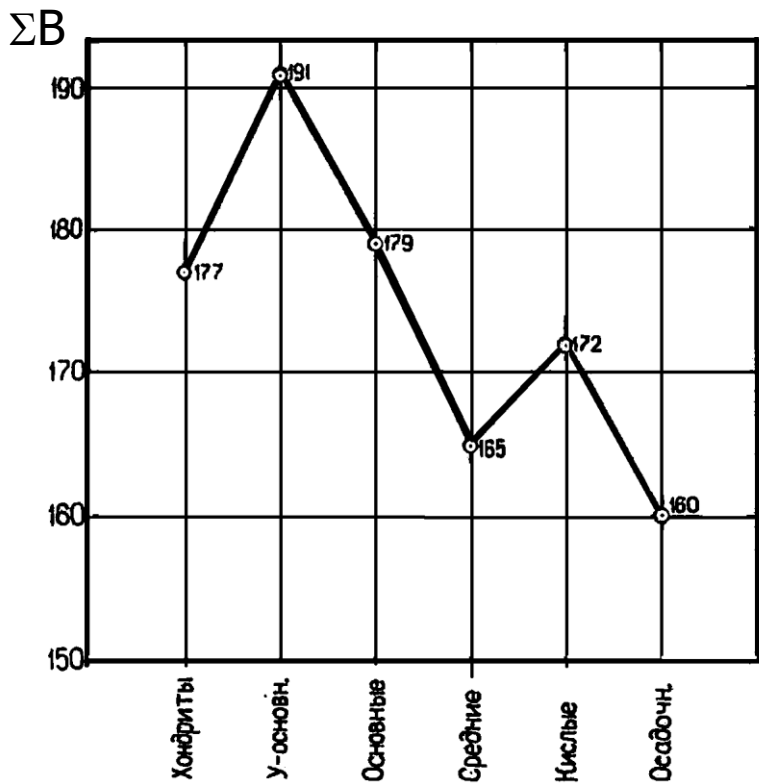


Рис. 14.2. Снижение условной плотности B от хондритов к осадочным породам. Пояснения в тексте.

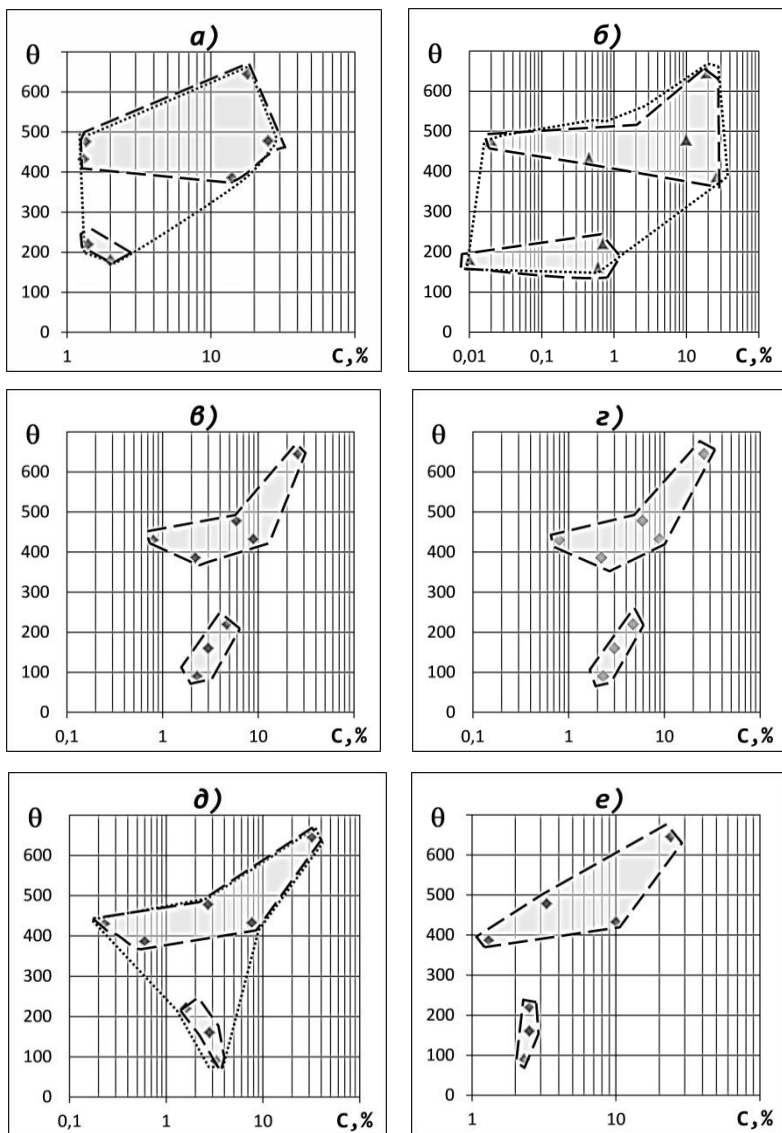


Рис. 14.3. Связь между Дебаевской температурой θ элементов и их содержанием C: а- в хондритах, б- в ультрахондритовых, в- в основных, г- в средних, д- в кислых, е- в осадочных породах

для осадочных пород $420+500+560+630 = 2110$

Полученное значение для каждой породной разности тождественно количеству тепла, которое может аккумулировать единица объёма вещества без разрушения кристаллических связей. Назовём полученную для каждой породной разности сумму "условная теплоёмкость" и построим график ее изменения в ряду хондриты-осадочная порода (рис. 14.4).

Из θ -С диаграммы (см. рис.14.3) следует, что в каждой породной разности повышено содержание того элемента, у которого выше температура Дебая. Это объясняется тем, что в ходе дифференциации мантийного вещества элементы с низкой Дебаевской температурой образовывали менее устойчивые кристаллы, которые разрушались при воздействии высокой температуры. Поэтому сохранились минералы с преобладанием элементов с высокой Дебаевской температурой.

Вместе с тем график условной теплоёмкости (см. рис. 14.4) противоречит представлению об увеличении температуры образования магматических пород от кислых к ультраосновным. Другими словами, если бы тепловое поле было фактором, управляющим дифференциацией породообразующих элементов, диаграмма была бы обратной. Теплоёмкость снижалась бы от ультраосновных пород к кислым. Для разрешения этого противоречия следует признать, что *дифференциация породообразующих элементов управляется лишь гравитационным полем земли.*

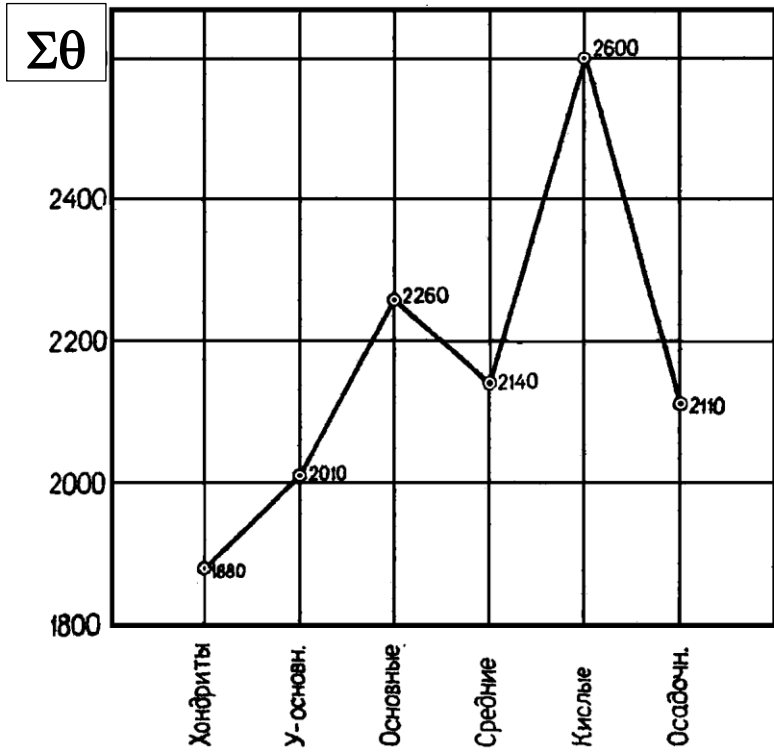


Рис. 14.4. Рост условной теплоёмкости $\Sigma\theta$ от хондритов к кислым.

14.3. Адаптация примесных элементов к давлению, температуре и роль твёрдофазной диффузии

Распределение примесных элементов в разных магматических породах рассматривает Л.Н.Овчинников [167, с.23]. В таблице 14.2 приводятся его данные о специализации примесей.

Таблица 14.2

Распределение примесных элементов в различных горных породах

Горн. порода	Эл-т	e	θ	R	Ξ	M	у.к.
Ультрабазит	Mg	2	386	1,62	1,2	24	57
то же	Fe	8	478	1,26	1,8	56	86
то же	Cr	6	357	1,28	1,6	52	151
то же	Co	9	445	1,25	1,7	59	93
то же	Ni	-8	476	1,24	1,8	58	97
Базальт	Si	-7	345	1,28	1,9	64	36
то же	Ag	-7	225	1,44	1,9	108	57
то же	Ti	4	430	1,45	-1,5	48	
то же	V	5	339	1,34	1,6	51	
то же	Sc	3	231	1,64	1,3	45	
Гранодиорит	La	3	135	1,88	1,2	139	37
то же	Pr	3	138	1,83	1,2	141	38
то же	Ce	3	138	1,82	1,2	140	38
то же	Sm	3	148	1,8	1,3	150	45
Гранит	Li	1	370	1,57	0,97	7	-2
то же	Rb	1	55	2,53	0,8	85	23
то же	Cs	1	39	2,74	0,7	132	22

Продолжение табл. 14.2

Горн. порода	Эл-г	e	θ	R	Э	M	у.к.
то же	Pb	-4	105	1,74	1,9	207	156
то же	Sn	-4	200	1,58	1,8	118	
то же	Ta	5	246	1,46	1,5	181	
то же	Th	3	180	1,8	1,15	232	
то же	V	3	200	1,53	1,15	238	
то же	Be	2	1060	1,13	1,5	9	
то же	In	-5	109	1,66	1,7	115	
то же	Te	-5	79	1,7Г	1,8	204	
Сиенит	Na	1	160	1,92	0,9	23	18
то же	K	1	90	2,36	0,8	39	20
то же	Nb	5	238	1,74	1,6	93	
то же	Zr	4	237	1,59	1,4	92	
то же	F	-1		0,71	4,0	19	
то же	Ba	2	96	2,21	0,9	137	35

Там же мы указали температуру Дебая элемента (θ), атомный радиус (R), электроотрицательность (Э), атомный вес (M), устойчивость его комплекса (у.к.) по К.Б.Яцимирскому, число электронов до ближайшего инертного газа (e).

Построим диаграммы и рассмотрим роль атомных параметров примесных элементов в их распределении по разностям горных пород (рис.14.5). Из диаграммы следует, что, в ряду ультраосновные, основные, средние, кислые породы, распределение примесных элементов изменяется в зависимости от некоторых атомных параметров. Из них

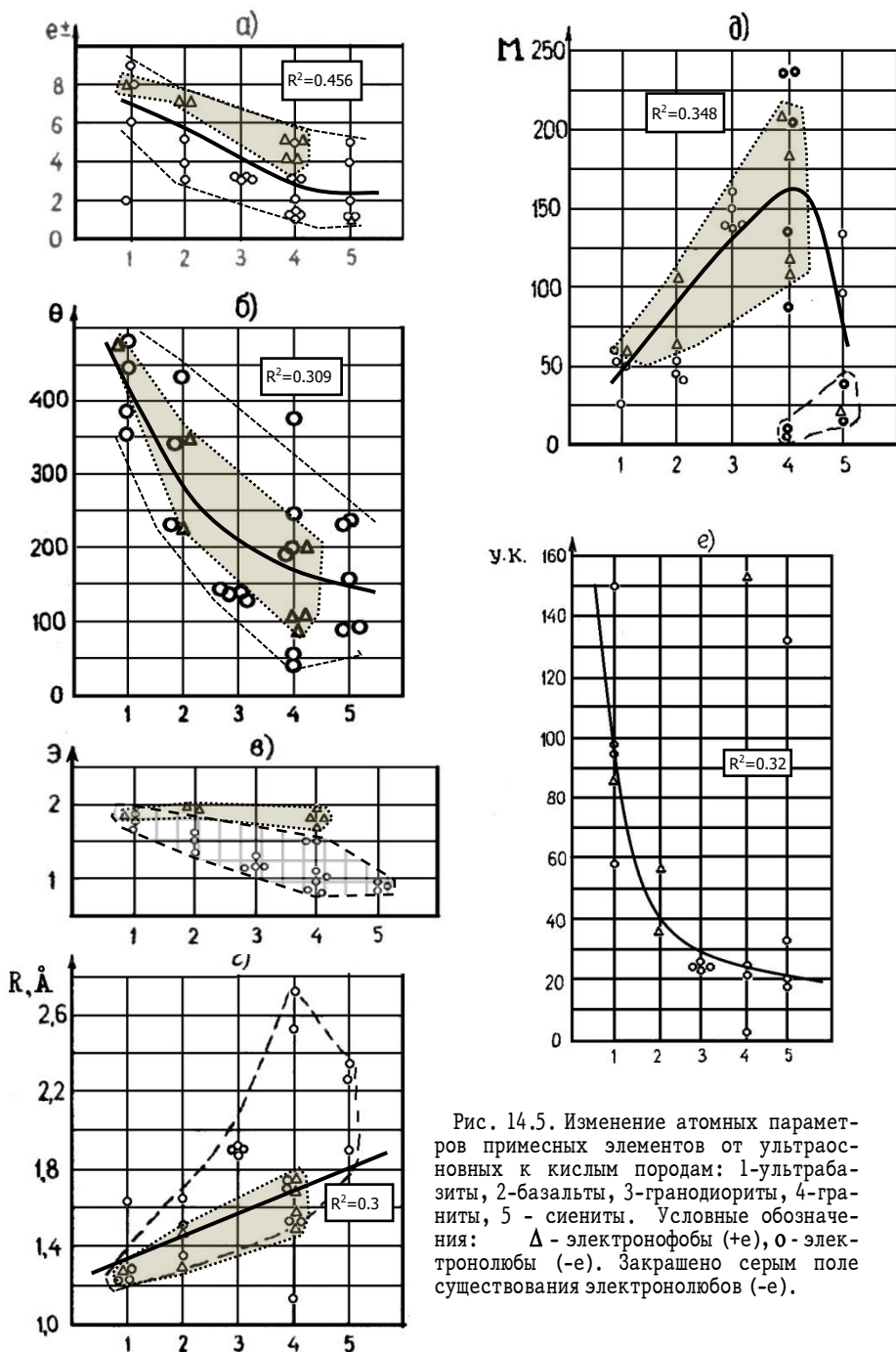


Рис. 14.5. Изменение атомных параметров примесных элементов от ультраосновных к кислым породам: 1-ультрабазиты, 2-базальты, 3-гранодиориты, 4-граниты, 5 - сиениты. Условные обозначения: Δ - электронофобы (+e), o - электронолюбы (-e). Закрашено серым поле существования электронолюбов (-e).

главными управляющими являются температура Дебая (θ), расстояние до инертного газа (e), устойчивость комплексов (У.К.). В меньшей степени влияют электроотрицательность (Θ), атомный радиус (R) и атомный вес (M) элементов.

В направлении от ультраосновных к кислым породам уменьшается температура Дебая, число (e), электроотрицательность для атомов-электронофобов; увеличиваются радиус и масса атома элементов-примесей. В этом же направлении снижается устойчивость комплексов, образуемых ионами примесных элементов. Диаграммы свидетельствуют о том, что существующее распределение примесных элементов обязано аддитивному воздействию нескольких факторов.

Снижение температуры Дебая (см. рис.14.5) отражает неспособность элементов с малой Дебаевской частотой образовать устойчивые внутрикристаллические связи в условиях высокой внешней температуры. То есть, каждой температуре среды соответствует своя Дебаевская частота. И элементы с низкой частотой диффундируют из объёма кристалла на его поверхность, переходят в жидкую фазу и мигрируют вверх.

В этом же направлении снижается величина $|e|$, что свидетельствует об уменьшении плотности упаковки атомов в кристаллах от ультраосновных к кислым породам. Металлическая связь сменяется координационной, затем ионной.

Ведущую роль твёрдотельной диффузии подтверждает и снижение электроотрицательности, рост радиуса и массы атомов примесных элементов в ряду ультраосновные-кислые породы. Здесь действуют те факторы, ускоряющие диффузию в твёрдой фазе, которые мы выявили для одноэлементных крис-

таллов (см.п.13.7). Это эффект размера примеси, когда диффузия возрастает с увеличением атомного радиуса; эффект атомной массы, когда более успешен перескок более тяжелого иона; эффект малой электроотрицательности.

Все эти явления действуют в одном направлении. И в кислых породах накапливаются те примесные элементы, которые в наибольшей степени испытывают ускоряющее твёрдофазную диффузию действие перечисленных эффектов.

Отсюда можно заключить, что в литосфере существует всеохватывающий транзитный поток примесных элементов. Этот поток преимущественно направлен снизу вверх и противодействует фактору гравитационной дифференциации. Транзитный поток в основном питается диффузионными токами примесных атомов из объёма кристалла на его поверхность. То есть, собственно миграции элементов в виде комплексных ионов предшествует твёрдофазная диффузия примесей, то есть их активация.

Обратим внимание на то, что, в общем случае, отсутствует прямая корреляция между температурой Дебая и устойчивостью комплексов по Яцимирскому. Однако здесь они действуют однонаправленно: в ряду ультраосновные-кислые породы устойчивость комплексов так же снижается. Хотя по мнению Овчинникова должно быть наоборот. Он полагает, что более устойчивые комплексы мигрируют дальше, в данном случае ближе к поверхности Земли.

Причина расхождения видимо в том, что Л.Н.Овчинников ведёт речь о водно-газовых комплексах металлов. Здесь же в роли лигандов выступают алюминий и кремний из силикат-

ного расплава. И более устойчивые комплексы, с примесным элементом в центре, входят в кристаллизирующийся минерал. Если по Дебаевской частоте, электроотрицательности, величине $|e|$, атомному радиусу и массе примесь соответствует внешним Р-Т условиям, то комплекс в минерале и останется. В противном случае вновь переходит в жидкий расплав.

Таким образом, устойчивость комплекса (у.к.) действует лишь в расплавах, но не в жёсткой породе. И способствует накоплению примесного элемента в минералах тогда, когда примесь по всем управляющим атомным параметрам соответствует данным Р-Т условиям.

14.4. Адаптивность химических элементов

В подтверждение того, что существует транзитный поток примесных элементов, рассмотрим диаграммы коэффициентов концентраций. Под коэффициентом концентрации (К) мы, вслед за В.И.Рехарским (1964 г.), понимаем отношение кларков в двух породных разностях. Коэффициенты концентраций найдём для каждой пары горных пород ряда ультраосновные-основные-средние-кислые породы.

Динамику химических элементов будем рассматривать в V-K пространствах, где V - следующие атомные параметры: θ - температура Дебая, R-атомный радиус; Э-электроотрицательность, e-расстояние до инертного газа, M-атомный вес, A-адаптивность элемента.

То есть, для каждой пары горных пород построим по 6 V-K диаграмм (атомный параметр-коэффициент концентрации). Коэффициенты концентраций приведены в табл. 14.3, а атомные

параметры элементов - в таблице 14.4.

Таблица 14.3

Коэффициенты концентрации для магматических пород

Хим. эл-т	log содерж. элементов (С)				log Коэф. концентр.		
	у-осн. α	основн. β	сред. γ	кислые τ	C_{oc}/C_y $\beta-\alpha$	C_{cp}/C_{oc} $\gamma-\beta$	C_k/C_{cp} $\tau-\gamma$
Li	-4,301	-2,284	-2,7	-2,4	1,48	0,12	0,3
Be	-4,7	-4,4	-3,745	-3,26	0,3	0,65	0,49
B	-4	-3,301	-2,824	-2,824	0,7	0,48	0
C	-2	-2	1,7	-1,523	0	0,3	0,18
N	-3,22	-2,745	-2,658	-2,7	0,47	0,09	-0,05
O	1,628	1,638	1,66	1,688	0,01	0,02	0,03
F	-2	-1,43	-1,3	-1,097	0,57	0,13	0,2
Na	-0,244	0,288	0,477	0,442	0,53	0,19	0,04
Mg	1,41	0,653	0,338	-0,25	-0,76	-0,32	-0,59
Al	0,347	0,943	0,947	0,886	1,29	0,004	-0,06
Si	1,28	1,38	1,41	1,51	0,1	0,03	0,1
P	-1,77	-0,85	-0,80	-1,40	0,92	0,05	-0,6
S	-2	-1,52	-1,70	-1,15	0,48	-0,18	0,55
Cl	-2,3	-2,3	-2	-1,62	0	0,3	0,38
K	-1,52	-0,08	0,36	0,52	1,44	0,44	0,16
Ca	-0,15	0,83	0,67	0,2	0,98	-0,16	-0,47
Sc	-3,3	-2,62	-3,6	-3,52	0,68	-0,98	0,08
Ti	-1,52	-0,05	-0,097	-0,64	1,47	-0,05	-0,54
V	-2,4	-1,7	-2	-2,4	0,7	-0,3	0,4
Cr	0,7	-1,7	-2,3	-2,6	-1	-0,6	-0,3
Mn	-0,82	-0,7	-0,928	-1,22	0,12	-0,22	-0,3

Продолжение табл.14.3

Хим.	log содерж. элементов (С)				log Коэф. концентр.		
	у-осн.	основн.	сред.	кислые	C_{oc}/C_y	C_{cp}/C_{oc}	C_k/C_{cp}
	α	β	γ	τ	$\beta-\alpha$	$\gamma-\beta$	$\tau-\gamma$
Fe	0,99	0,93	0,77	0,43	-0,06	0,16	0,34
Co	-1,7	-2,35	-3	-3,3	-0,65	0,65	-0,3
Ni	-0,7	-1,8	-2,26	-3,1	-1,13	-0,46	-0,84
Си	-2,7	-2	-2,46	-2,7	0,7	-0,46	-0,24
Zn	-4,52	-1,89	-2,14	-2,22	0,63	-0,25	-0,08
Ga	-3,7	-2,74	-2,7	-2,7	0,96	0,04	0
Ge	-4	-3,82	-3,82	-3,853	0,18	0	-0,03
As	-4,3	-3,7	-3,62	-3,82	0,6	0,08	-0,20
Se	-5,3	-5,3	-5,3	-5,3	0	0	0
Br	-4,3	-3,52	-3,35	-3,77	0,78	0,17	-0,42
Rb	-3,7	-2,35	-2	-1,7	1,35	0,35	0,3
Sr	-3	-1,36	-1,1	-1,52	1,64	0,26	-0,42
Y	-	-2,7	-	-2,47	-	-	0,23
Zr	-2,52	-2	-1,59	-1,7	0,52	0,41	-0,11
Nb	-4	-2,7	-2,7	-2,7	1,3	0	0
Mo	-4,7	-3,85	-4,05	-4	0,85	-0,2	0,05
Pd	-4,92	-5,72	-	0,6	-0,8	-	-0,28
Ag	-5,3	-5	-5,15	-5,3	0,3	-0,15	-0,15
Cd	-5,3	-5,72	-	-5	-0,42	-	-0,72
In	-5,89	-4,66	-	-4,59	1,23	-	0,07
Sn	-4,3	-3,82	-	-3,52	0,48	-	0,3
Sb	-5	-4	-4,7	-4,59	1	-0,7	0,11
Te	-7	-7	-7	-7	0	0	0

Продолжение табл.14.3

Хим. эл-т	log содерж. элементов (С)				log Коэф. концентр.		
	у-осн.	основн.	сред.	кислые	C_{oc}/C_y	C_{cp}/C_{oc}	C_k/C_{cp}
	α	β	γ	τ	$\beta-\alpha$	$\gamma-\beta$	$\tau-\gamma$
I	-6	-4,3	-4,52	-4,4	1,7	0,22	0,12
Cs	-5	-4	-	3,3	1	-	0,7
Ba	-4	-1,52	-1,19	-1,08	2,48	0,33	0,11
La	-	-2,57	-	2,22	-	-	0,35
Ce	-	3,35	-	-2	-	-	1,35
Pr	-	-3,4	-	-2,92	-	-	0,48
Nd	-	-2,7	-	-2,34	-	-	0,36
Sm	-	-2,7	-	-2,34	-	-	0,36
Eu	-6	-4	-	-3,82	2	-	0,18
Gd	-	-3,3	-	-3,05	-	-	0,25
Tb	-	-4,1	-	-3,05	-	-	0,5
Dy	-5,3	-3,7	-	-3,17	1,6	-	0,53
Ho	-	-4	-	-3,7	-	-	0,3
Er	-	-3,7	-	-3,4	-	-	0,3
Tu	-	-4,7	-	-4,52	-	-	0,18
Yb	-	-3,7	-	-3,4	-	-	0,3
Lu	-	-4,22	-	-4	-	-	0,22
Hf	-5	-4	-4	-4	1	0	0
Ta	-5,74	-4,3	-4,15	-3,467	1,44	0,15	0,69
w	-5	-4	-4	-3,822.	1	0	0,18
Re	-	-7,15	-	-7,17	-	-	-0,02
Pt	-4,7	-5	-	-	-0,3	-	-

Продолжение табл.14.3

Хим. элемент	log содерж. элементов (С)				log Коэф. концентр.		
	у-осн.	основн.	сред.	кислые	C_{oc}/C_y	C_{cp}/C_{oc}	C_k/C_{cp}
	α	β	γ	τ	$\beta-\alpha$	$\gamma-\beta$	$\tau-\gamma$
Au	-6,3	-6,4	-	-6,35	-0,1	-	-0,05
Hg	-6	-	-	-5,1	0,95	-	-0,05
Tl	-6	5,05	-4,3	-3,82	1,3	0,4	0,48
Pb	-5	-4,7	-	-3	1,9	0,28	-0,18
Bi	-7	-3,1	2,82	-6	0,85	0,15	0
Th	-6,3	-	-6	-2,74	2,78	6,37	0,41

Таблица 14.4

Атомные параметры элементов

Хим. элемент	$R, \text{Å}$	ϑ	e	$\theta^\circ\text{K}$	A	M
B	0,83	2,01	3	1219	0,9	10,8
C	0,77	2,50	± 4	1860	3,5	12
N	0,62	3,0	-3	-	4,2	14
O	0,66	3,5	-2	-	4,6	16
F	0,71	4,0	-1	-	5,15	19
Na	1,92	0,90	1	160	-	23
Mg	1,62	1,20	2	386	0,3	24,3
Al	1,43	1,50	3	432	0,6	27
Si	1,34	1,90	± 4	645	0,8	28
P	1,34	2,10	-3	-	1,8	31

Продолжение табл.14.4

Хим. элемент	$R, \text{Å}$	ϑ	e	$\theta^\circ\text{K}$	A	M
S	1,04	2,60	-2	180	3,2	32
Cl	0,99	3,00	-1	-	2,2	35,5
K	2,36	0,80	1	90	-	39,1
Ca	1,97	1,00	2	220	0,15	40,1
Sc	1,64		3	231	0,5	47,9
Ti	1,45	1,50	4	430	1,3	47,9
V	1,34	1,60	5	339	2	50,9
Cr	1,28	1,60	6	357	2,6	52
Mn	1,3	1,4÷ ÷2,5	7	450	3,1	55
Fe	1,26	1,80	8	478	2,9	55,8
Co	1,25	1,70	±9	445	2,4	58,9
Ni	1,24	1,80	-8	476	2,5	58,7
Cu	1,28	1,90	-7	345	1,68	63,5
Zn	1,39	1,60	-6	305	0,4	65,4
Ga	1,38	1,60	-5	333	0,68	69,7
Ge	1,39	2,00	-4	406	0,76	72,5
As	1,48	2,00	-3	285	1,2	74,9
Se	1,60	2,40	-2	89	1,5	78,9
Br	1,19	2,90	-1	-	2,2	79,9
Rb	2,53	0,80	1	55	-	85,5
Sr	2,15	1,0	2	129	0,1	87,6
Y	1,81	1,20	3	192÷235	-	88,9

Продолжение табл.14.4

Хим. элемент	R, Å	Э	e	θ°К	A	M
Zr	1,59	1,40	4	237÷ ÷310	0,01	91,2
Nb	1,47	1,60	5	238÷ ÷276	0,01	92,9
Mo	1,39	1,6÷ ÷2,1	6	380	1,6	95,9
Pd	1,37	1,35	-8	275	1,1	106,4
Ag	1,44	1,90	-7	225	1,4	107,9
Cd	1,56	1,70	-6	213	0,66	112,4
In	1,66	1,70	-5	109	0,01	114,8
Sn	1,58	1,80	-4	200	0,68	118,6
Sb	1,61	1,90	-3	204	1,2	121,7
Te	1,70	2,10	-2	129	1,56	127,6
I	1,33	2,60	-1	-	2,3	126,9
Cs	2,74	0,7	1	39	-	132,9
Ba	2,21	0,9	2	96	0,1	137,3
La	1,88	1,20	3	135	0,4	138,9
Ce	1,82	1,20	3	138	-	140,1
Pr	1,83	1,20	3	138	-	140,9
Nd	1,82	1,30	3	138	-	144,2
Sm	1,80	1,30	3	148	-	150,4
Eu	2,04	1,20	3	121	-	152
Gd	1,80	1,30	3	155	-	157,2
Tb	1,78	1,30	3	158	-	158,9
Dy	1,77	1,30	3	158	-	162,5
Ho	1,77	1,30	3	161	-	164,9
Er	1,76	1,30	3	163	-	167,2

Продолжение табл.14.4

Хим. элемент	$R, \text{Å}$	ε	e	$\theta^\circ\text{K}$	A	M
Tu	1,75	1,30	3	167	-	168,9
Yb	1,94	1,20	3	118	-	173
Lu	1,74	1,30	3	166	-	175
Hf	1,59	1,30	4	173	0,8	178,4
Ta	1,46	1,50	5	216	-	181
W	1.40	1.6-				
		-2.0	6	384	0,94	183,8
Re	1,37	1.8-				
		-2,2	7	415	1.1	186,2
Pt	1.39	1.44	-8	235	0,8	195
Au	1,44	2,40	-7	162	0,8	197
Hg	1,57	1,44	-6	357	0.9	200.5
Ti	1.71	1,80	-5	79	0,88	204,3
Pb	1.74	1,90	-4	105	2,6	207,2
Bi	1,82	1,90	-3	117	2	209
Th	3.56	1.1-				
		-1.2	3	180		232
U	1.53	1.1-				
		-1.2	3	200	2,95	238

Под адаптивностью химического элемента мы понимаем ширину электрохимической области, существования соединений этого элемента. То есть это ширина электрохимического ареала соединений элемента:

$$A_i = E_{i_{\max}} - E_{i_{\min}} \quad (14.1)$$

где A_i - адаптивность i -го элемента;

$E_{i_{\max}}$, $E_{i_{\min}}$ - соответственно наибольший и наименьшие стандартные окислительно-восстановительные потенциалы образования соединений i -го элемента.

Значения потенциалов были взяты из таблицы А. 14 монографии Р.Хорна [226].

14.5. Интенсивность восходящего потока элементов в зависимости от их атомных параметров

В ходе анализа V-K диаграмм (рис. 14.6, 14.7, 14.8) атомные параметры были отнесены к трём типам факторов: к главным, к второстепенным, к слабовыраженным. Если поле существования элементов на V_i - K диаграмме сверху ограничено одной линией, то i -ый атомный параметр является главным фактором. Если там же поле существования ограничено двумя линиями, то i -ый параметр является второстепенным фактором. Если поле существования состоит из множества кластеров, то i -ый параметр является слабо выраженным фактором (таблица 14.5):

Таблица 14.5

Взаимосвязь коэффициентов концентраций элементов с их атомными параметрами

Коэф. концентрации в породах	Главный фактор	Второстепенный фактор	Слабовыраженный
основн./ультраосновных	R^+, θ^-	$\theta^{-\cdot}, \Theta^-, M^{+\cdot}$	A^+
средних/основных	e^-	$R^+, \theta^{-\cdot}$	Θ^-, M^+, A^+
кислых/средних	-	R^+, M^+, A^+	$\theta^-, e^{-\cdot}, \Theta^{+\cdot}$

В основных породах по сравнению с ультраосновными преимущественно концентрируются крупные атомы (R^+), с

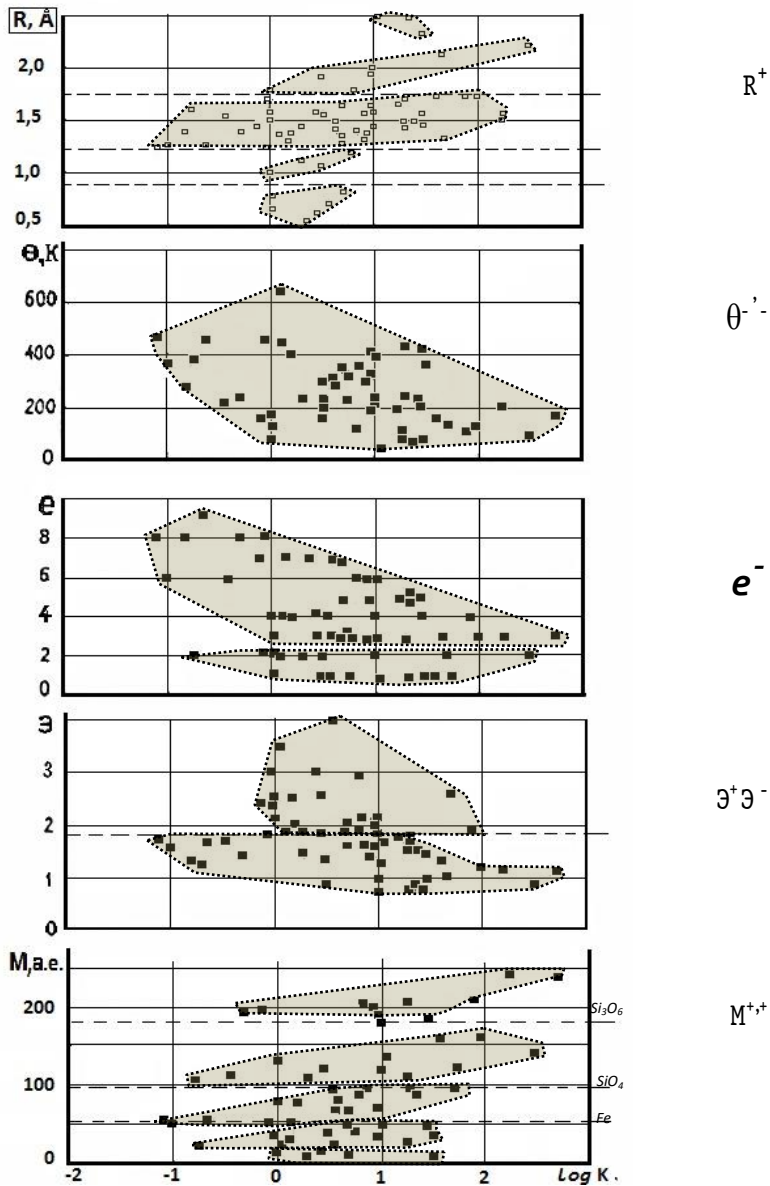


Рис.14.6. Коэффициент концентрации K элементов в основных породах относительно ультраосновных. Обозначения см. в тексте.

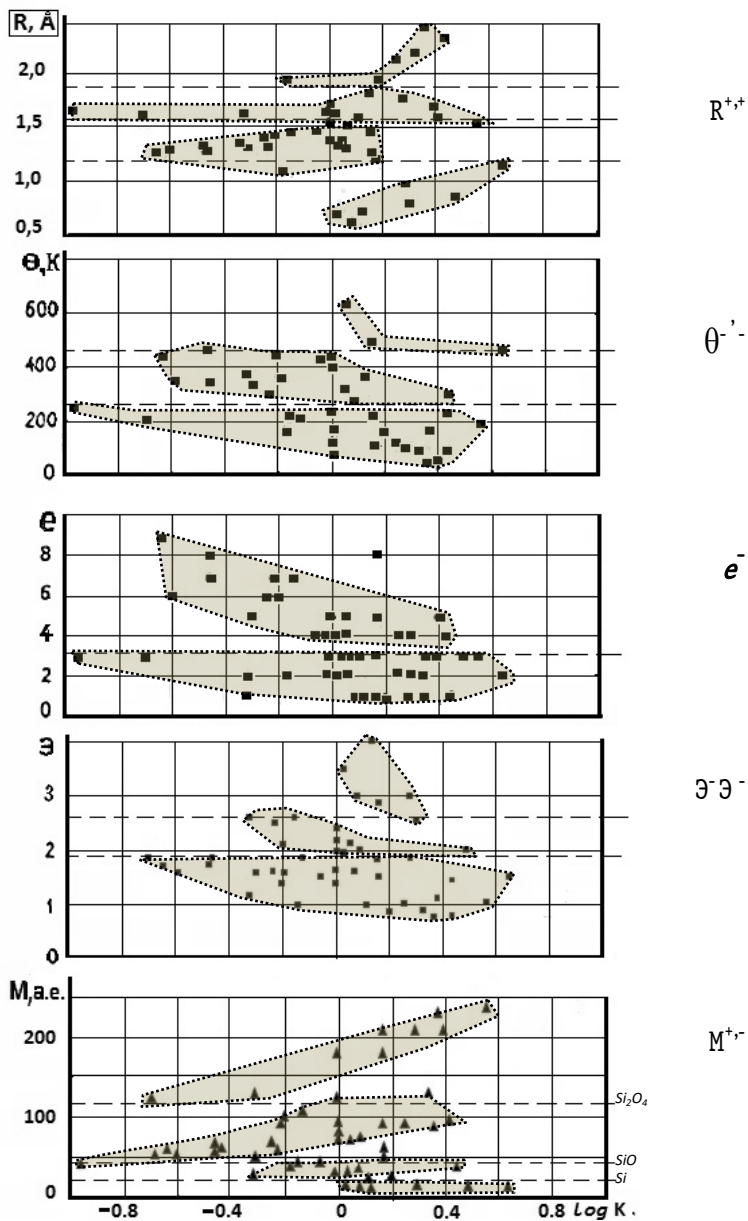


Рис.14.7. Коэффициент концентрации K элементов в средних породах относительно основных. Обозначения см. в тексте.

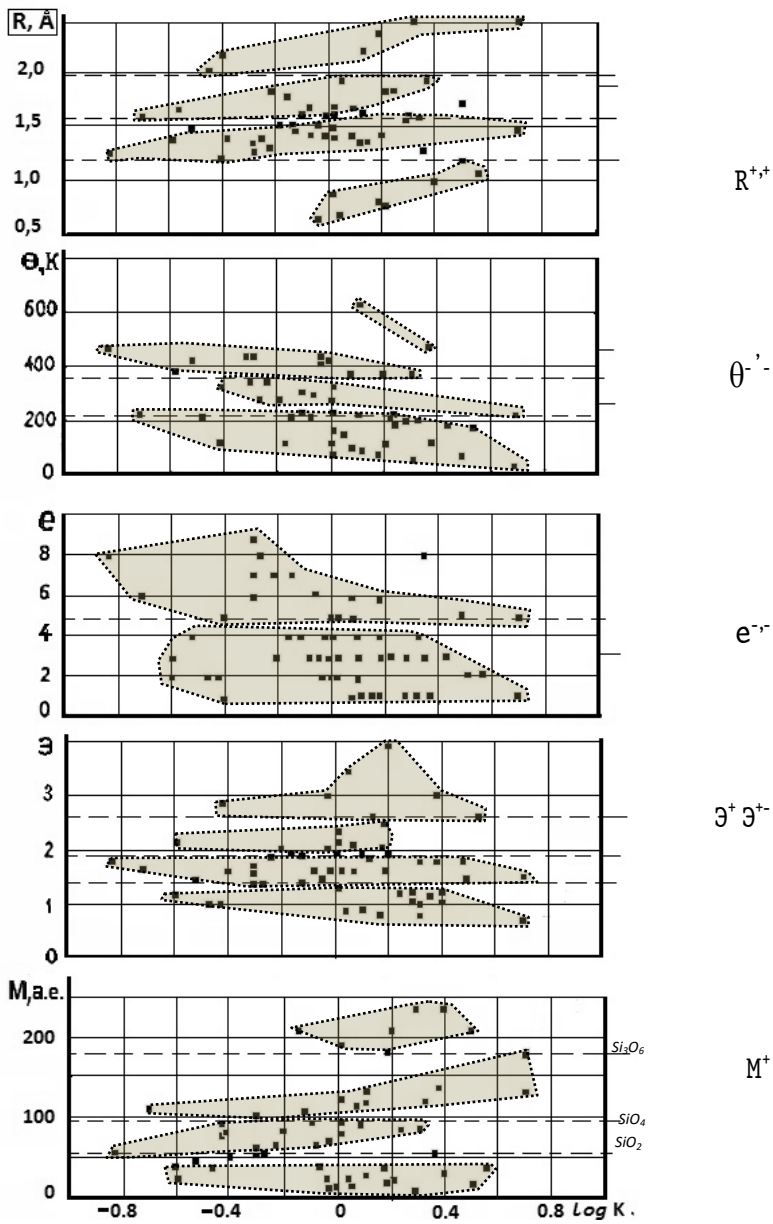


Рис.14.8. Коэффициент концентрации K элементов в кислых породах относительно средних. Обозначения см. в тексте.

минимальным расстоянием до инертного газа (e^-), с наименьшей температурой Дебая (θ^-), с малой электроотрицательностью (Ξ^-), с большой массой (M^+). Направленные изменения атомных параметров (Ξ^- , R^+ , M^+) свидетельствуют о твёрдофазной диффузии элементов, с последующей их миграцией из ультраосновных пород в основные. Изменение температуры Дебая подтверждает значительный масштаб твёрдофазной диффузии, а также и направленность миграции из более высокотемпературной области в низкотемпературную.

В ходе твёрдофазной диффузии реализуются эффект радиуса и эффект массы примеси, когда быстрее диффундируют более крупные (R^+) и более тяжелые (M^+) атомы (см. п.13.7). Точно так же, как и в одноэлементных кристаллах, быстрее диффундируют атомы, легко теряющие электроны (Ξ^-).

Аналогичная роль атомных параметров сохраняется и при миграции элементов из основных пород в средние, и из средних в кислые. В средних породах сильнее концентрируются элементы с малым расстоянием до инертного газа (e^-). В качестве второстепенных факторов здесь выступают больший атомный радиус (R^+), низкая Дебаевская температура (θ^-). Электроотрицательность и масса атома переходят в разряд слабо выраженных факторов.

Для концентрации элементов в кислых породах относительно средних главный фактор отсутствует. Однако в отдельных кластерах чётко проявляется роль радиуса (R^+) и массы атома (M^+), которые выступают в качестве второ-

степенных факторов.

На некоторых диаграммах границей кластера является вертикальная линия одинаковой концентрации ($\log K=0$). Это характерно для Θ -К диаграмм основных и средних пород, для М-К диаграммы основных пород, для R-К диаграммы средних пород (см. рис. 14.5, 14.6).

Причина этого заключается, в том, что миграция элементов - это результат их сложной адаптации к воздействию внешней среды, когда действует много внешних факторов. Среда выполняет динамическую пространственную ранжировку мигрирующих элементов, располагая их в определённой последовательности. В простом случае одному внешнему фактору среды соответствует один атомный параметр. Поэтому атомные параметры можно условно рассматривать в качестве факторов ранжировки, хотя в действительности таковыми являются внешние факторы среды.

Рассмотрим процесс ранжирования мигрирующих элементов, предположив, что действует один главный и два второстепенных фактора. *Главный фактор выполняет общую ранжировку элементов, располагая их в определённой последовательности - в одну линию. Второстепенный фактор-1 их локально сортирует, то есть производит локальную ранжировку. При этом элемент уходит из линии, т.е. линия размывается, превращаясь в полосу, где элементы, тем не менее, ранжированы по главному фактору. Второстепенный фактор-2 производит повторную локальную ранжировку, ещё более размывая полосу существования элементов на*

диаграмме.

Пример.

Общее ранжирование элементов по коэффициенту концентрации в основных породах выполнено по e -расстоянию до инертного газа, т.е. давлению среды (см.рис.14.6). Их локальная ранжировка согласована с температурой Дебая, с атомной массой и с атомным радиусом, что чётко проявляется в области отрицательных значений $\log K$.

Общее ранжирование по величине e в средних породах несколько хуже. Локальное ранжирование выполняется по θ и R . Атомная масса не влияет на ранжировку в области отрицательных значений $\log K$ (см.рис. 14.7).

На общее ранжирование в кислых породах в большей степени влияет атомная масса. Локальное ранжирование, в области отрицательных значений $\log K$, обусловлено электроотрицательностью (Ξ^+).

Из примера видно, как в направлении от основных к кислым ухудшается качество локального ранжирования в области отрицательных $\log K$. Это, видимо, обусловлено тем, что в ряду ультраосновные-основные-средние-кислые породы, возраст пород и температура среды возрастают справа налево. Поэтому коэффициент концентрации элементов в основных породах максимально ранжирован. Температура усиливает скорость твёрдофазной диффузии, а с увеличением времени возрастает количество продиффундировавшего вещества.

Результатом локального ранжирования являются линейные кластеры, закономерно удлиненные вдоль границ поля существования.

На диаграммах для основных пород линейные кластеры хорошо выражены по атомному радиусу (R^+) и электроотрицательности (Θ^+); слабо - по атомной массе (M^+). На диаграмме для средних пород линейные кластеры хорошо выражены по температуре Дебая (Θ^-), по атомной массе (M^+), слабо по электроотрицательности (Θ^-). Для кислых пород линейные кластеры хорошо выражены по атомному радиусу (R^+), электроотрицательности (Θ^+), атомной массе (M^+), слабо - по Дебаевской температуре (Θ^-).

Остановимся на А-К диаграммах, рассматривающих миграцию элементов в связи с их адаптируемостью (рис.14.9). Из диаграмм следует, что наиболее адаптируемые элементы обычно имеют равные концентрации в рассматриваемой паре. В то же время для средних и кислых пород выделяются линейные кластеры (A^+), в которых более адаптируемые элементы сильнее мигрируют.

В завершение данного параграфа о причинах распределения примесных элементов в разных магматических породах попытаемся *увязать динамику коэффициентов концентрации элементов с данными о специализации примесей*.

Ранее мы установили, что специализация примесей по разным магматическим породам подчиняется факторам твердофазной диффузии (см. рис. 14.6). Это доказывается закономерным изменением атомных параметров примесей в направлении от ультраосновных пород к кислым. Мы отметили, что в литосфере существует транзитный поток примесных элементов, направленный снизу вверх.

Попытаемся получить один из графиков рисунка 14.5 о

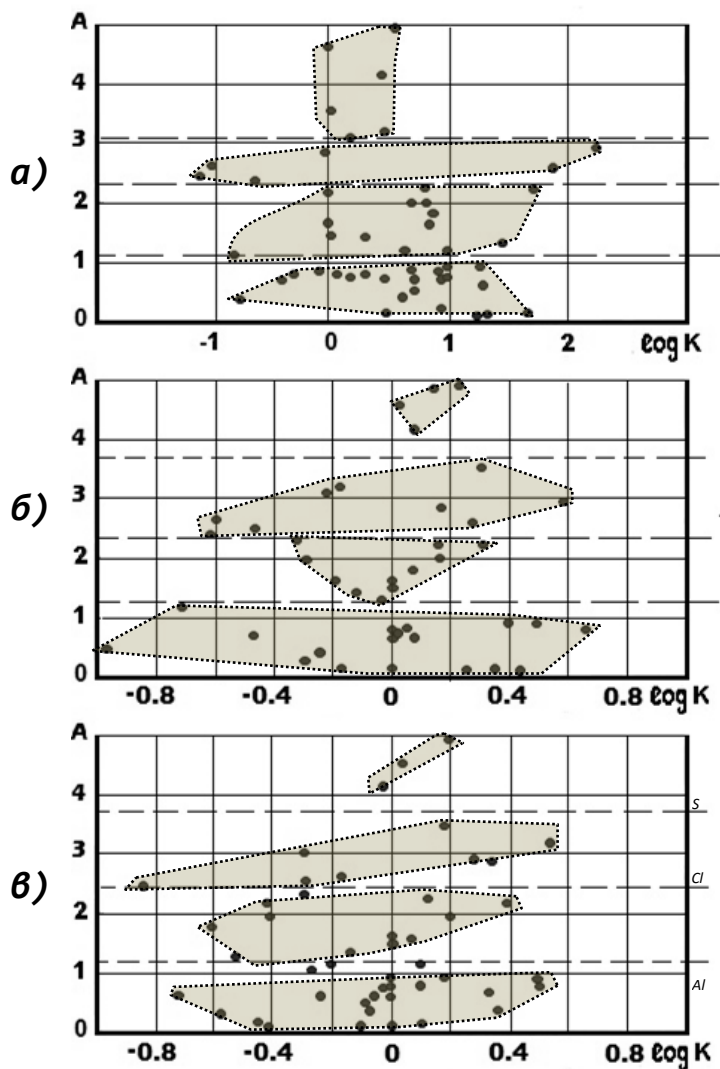


Рис. 14.9. Коэффициент концентрации элементов K в зависимости от их адаптивности: *а*- в основных породах относительно ультраосновных, *б*- в средних относительно основных; *в*- в кислых относительно средних пород.

специализации элементов исходя из динамики коэффициентов концентрации. То есть, используя данные, приведённые на диаграммах рисунков 14.6-14.9. Поскольку в обоих случаях исследуется один объект - литосфера, то несомненно, что попытка будет успешной. Но удачный результат покажет непротиворечивость разных подходов и их внутреннюю логическую связь.

Расстояние до инертного газа (e) является главным фактором ранжирования элементов по их коэффициенту концентрации. Поэтому построим расчётную диаграмму специализации элементов по величине e .

Несмотря на приблизительность расчётов, мы получили график (табл. 14.6, рис. 14.10), аналогичный построенному по данным Л.Н.Овчинникова (см. рис. 14.5, а). Снижение величины $|e|$ от ультраосновных пород к кислым свидетельствует о более плотной упаковке атомов в минералах на больших глубинах.

Выводы:

1. Дифференциация породообразующих химических элементов в земной коре подчиняется гравитационному фактору. Дифференциация примесных элементов обусловлена давлением, температурой среды и реализуется через их твердофазную диффузию.

2. Твёрдофазная диффузия в земной коре происходит по тем же законам, что и твердофазная диффузия в одноэлементных кристаллах (см. п. 13.7).

3. Миграция примесных элементов состоит из их активации посредством твердофазной диффузии и собственно миграции во флюидах.

Таблица 14.6

Расчёт специализации элементов

e_i	Остаются в левой стороне каждой пары											
	1) у-осн. → оснв.			2) оснвн. → средние			3) средние → кисл.			3) литосфера → реки		
	Кол-во	%	% к e_i	Кол-во	%	% к e_i	Кол-во	%	% к e_i	Кол-во	%	% к e_i
1	0/8	0	0	1/8	13	17	2/8	25	32	2/5	40	51
2	4/9	45	29	3/8	38	25	2/7	28	18	3/7	43	28
3	0/7	0	0	1/6	17	11	5/7	72	48	3/5	60	40
4	2/5	40	22	1/7	15	8	4/7	57	32	4/6	67	37
5	0/2	-	-	1/4	25	27	2/3	67	63	1/2	-	-
6	2/4	50	22	3/4	75	33	3/3	100	45	1/2	-	-
7	1/4	25	9	3/3	100	34	3/3	100	34	2/3	67	23
8	4/4	100	100	2/2	-	-	2/2	-	-	2/2	-	-
9	1/1	-	-	1/1	-	-	1/1	-	-	1/1	-	-

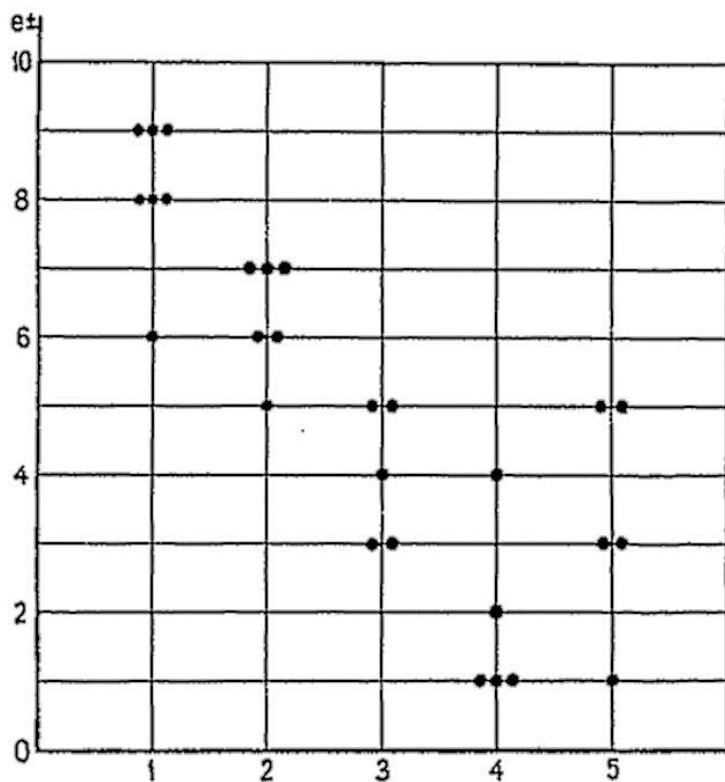


Рис. 14.10. Расчётное распределение элементов по типам пород в зависимости от расстояния $|e|$ от атомов до инертного газа. Типы пород: 1-ультраосновные, 2-основные, 3-средние, 4-кислые, 5-осадочные. Для расчётов использованы коэффициенты концентрации элементов по типам пород.

4. Главным управляющим фактором среды является давление. Поэтому атомы, образующие более плотную упаковку, приурочены к ультраосновным породам, а примесные атомы, образующие рыхлую упаковку, накапливаются в кислых породах.

5. В ходе твёрдофазной диффузии, в результате действия эффекта размера и эффекта атомной массы примеси, элементы с большим атомным радиусом и с большей массой диффундируют более интенсивно, накапливаясь в кислых породах.

14.6. Закономерности рудогенеза во времени и по вертикали

Очевидно, что атомные свойства элементов действуют не только в ходе их дифференциации в литосфере, но и определяют особенности рудогенных процессов. Здесь возникают два вопроса:

1) какие атомные параметры и почему контролируют рудогенез?

2) каким образом рудогенез вписывается в общую схему миграции примесных элементов в литосфере? В контексте этих вопросов необходимо выяснить роль твёрдофазной диффузии в рудообразовании. Попытаемся определить, связаны ли некоторые общеизвестные закономерности возникновения и строения рудных месторождений со следующими атомными параметрами рудогенных элементов:

с атомным радиусом (R),

с температурой Дебая (θ),

электроотрицательностью (Θ),
с атомной массой (M),
с расстоянием до инертного газа (e).
с адаптивностью (A).

14.6.1. Глобальная последовательность рудообразования во времени

Для двенадцати цветных металлов П.Лазничка (1973 г.) установил распределение запасов во времени. Нас интересует последовательность формирования 90% запасов каждого из них. Данные были взяты из графика, приведенного Л.Н.Овчинниковым по П.Лазничка [157, с.240]. Металлы расположились в следующей временной последовательности: Ni, Cr, W, Sn, Cu, Mo, Zn, Sb, Au, Ag, Pb, Hg. Анализ влияния на данную последовательность атомных параметров этих элементов (рис. 14.11) позволил сделать следующие выводы:

1. В ранжировании элементов, по рудообразованию во времени, в той или иной степени участвовали все 6 рассматриваемых атомных параметров: $R, \Theta, \Delta, M, e, A$.

2. *Главным фактором ранжирования является температура Дебая (Θ), т.е. температура среды.* A в качестве второстепенных факторов выступают по приоритету: атомный радиус (R^+), атомная масса (M^+), адаптивность (A^+), расстояние до инертного газа (e^-).

3. *Рассматриваемая последовательность рудообразования представляет собой результат неоднократного реформирования ранее возникших месторождений.* Разрушение

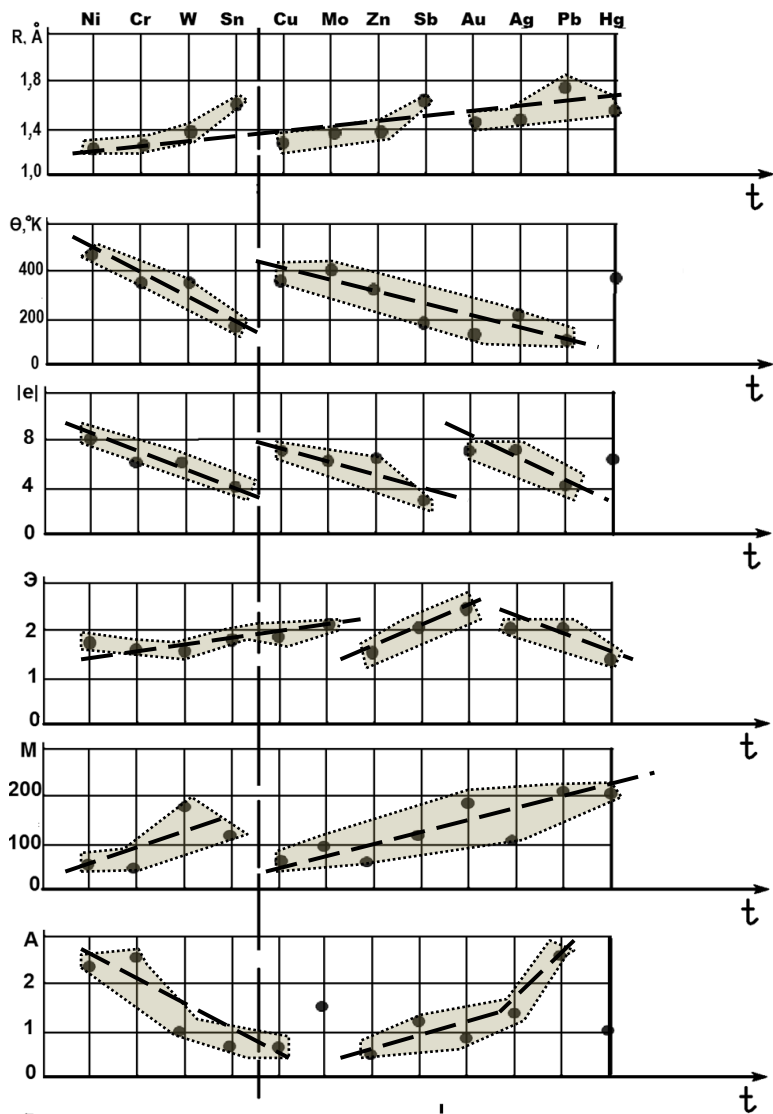


Рис. 14.11. Связь глобальной последовательности во времени рудообразования с атомными параметрами рудогенных элементов.

месторождений происходило под воздействием тепла магматических инъекций. Это следует из того, что древние месторождения сложены элементами с высокой температурой Дебая, а молодые - с низкой. Наиболее молодые месторождения высоколетучей ртути подтверждают этот вывод.

В процессе реформирования месторождений значительную роль играла твёрдофазная диффузия. Это подтверждается ростом радиуса и массы атомов от древних к молодым месторождениям. То есть, благодаря эффекту размера и эффекту массы рудогенного элемента, быстрее разрушались и позже окончательно формировались те месторождения, которые сложены из быстро диффундирующих элементов с более крупными и тяжёлыми атомами.

14.6.2. Типичная вертикальная зональность рудных месторождений

Рассмотрим типичную вертикальную зональность рудных месторождений в связи с изменением атомных параметров элементов. Зоны распространения минералов рудогенных элементов можно представить в виде идеализированной последовательности (снизу-вверх): W, Be, As, Sn, Au, V, Mo, Co, Ni, Bi, W, Au, Cu, Zn, Pb, Sn, Ag, Cd, Au, Cu, Hg, As, Sb, Ba. Из графиков (рис.14.12) следует, что главным фактором ранжирования является атомный радиус (R^+). Второстепенными факторами ранжирования служат (по приоритету): электроотрицательность (Θ^-), адаптивность (A^-), температура Дебая (θ^-), атомная масса (M^+), расстояние

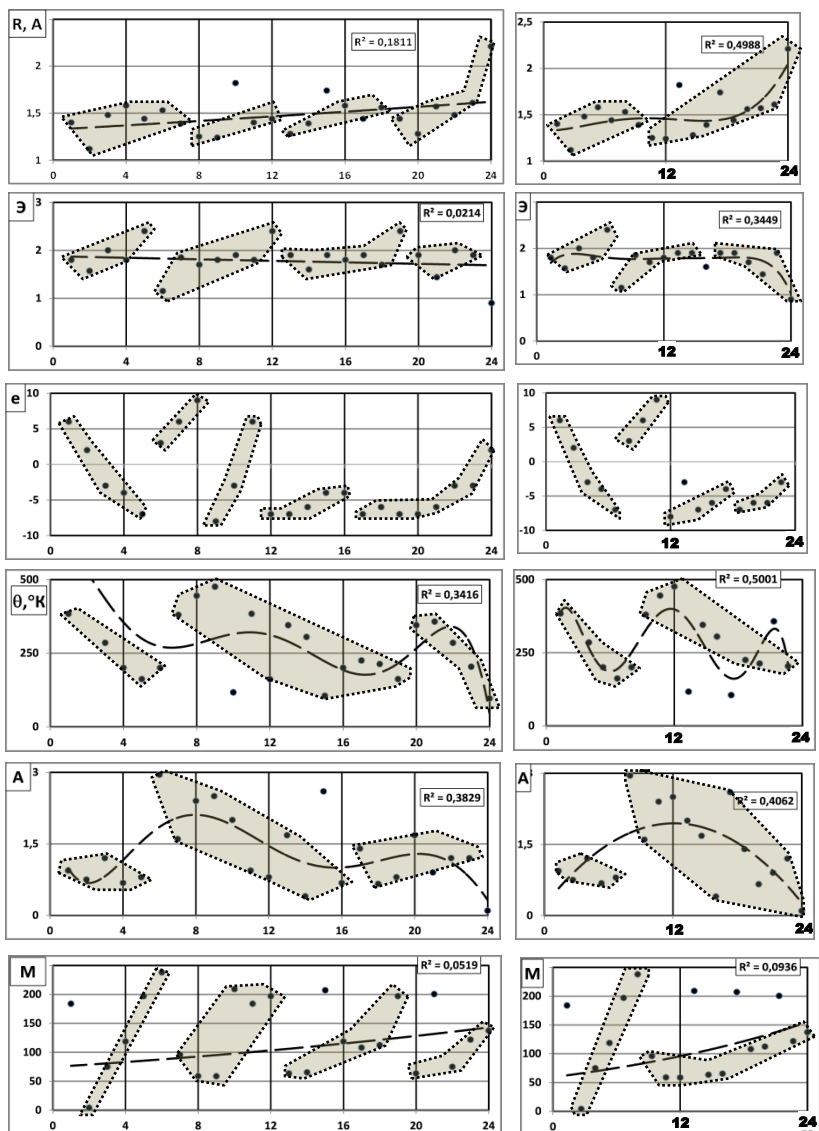


Рис.14.12. Типичная вертикальная зональность рудных месторождений в связи с атомными параметрами рудогенных элементов. График справа построен по первому появлению элементов. Ось X - отсчёт расстояния снизу.

до инертного газа (e^-).

Два первых фактора - атомный объём и электроотрицательность работают на общем уровне; снизу вверх возрастает величина атома и снижается электроотрицательность. Это свидетельствует о том, что внизу остаются плохо диффундирующие в твёрдой фазе атомы. Это общая пространственная тенденция.

Но существует и динамичная тенденция. На каждом графике выделяются свои линейные кластеры. Поскольку последовательность элементов идеализированная, то междиagramмные корреляции кластеров отсутствуют. Линейные кластеры характеризуются следующим направленным изменением атомных свойств: Θ^- , R^- , Z^+ , A^+ , M^+ , e^- . То есть в каждом из них снизу вверх уменьшаются Дебаевская температура, атомный радиус и расстояние до инертного газа; возрастают электроотрицательность, адаптивность и атомная масса. Это позволяет следующим образом интерпретировать общую тенденцию динамики минералообразования в каждой точке рудогенной зоны:

1. Существует соответствие между температурой среды и Дебаевской частотой рудогенных элементов, образующих минералы.

2. Во флюидах остаются рудогенные элементы, образующие более прочные связи в комплексах (с Z_{\max} , M_{\max}), с меньшим координационным числом (e_{\min}), с большей приспособляемостью к электрохимической обстановке (A_{\max}).

3. Минералы образуют те рудогенные элементы, которые

создают плотнейшую упаковку в кристаллической решётке (e_{\max}), быстрее диффундируют в твёрдой фазе (R_{\max} , Θ_{\min}).

Отметим, что сказанное отражает лишь общую, идеализированную тенденцию. Для получения истинной картины рассмотрим первичную зональность по генетическим типам и по отдельным месторождениям.

14.6.3. Последовательность формирования прожилков на медно- и молибден-порфировых месторождениях

Первичная зональность связана со стадийностью рудообразования. Для выяснения роли атомных свойств рудогенных элементов в стадийности рудогенеза, нами был выполнен соответствующий анализ данных по усреднённому медно- и молибден-порфировому месторождению.

На месторождениях данного типа обычно выделяются 4 этапа минералообразования. Первый и второй этапы обычно включают в себя по три стадии минералообразования. Последовательность образования минералов в прожилках чётко выражена для 2 стадий первого этапа, одной стадии второго этапа и в третьем и четвёртом этапах [167, с.109]. Условия минералообразования характеризуются устойчивым снижением интенсивности теплового потока, выраженной через температуру среды [167, с.121].

Нами строились V-t диаграммы, где V-атомные параметры минералообразующих элементов, t - время. Атомные параметры включают атомный радиус (R), температуру Дебая (θ), электроотрицательность (Θ), атомную массу (M), расстояние до инертного газа (e), адаптивность (A).

Были построены 2 типа диаграмм: по первому появлению рудогенного элемента, и по всем его проявлениям. Первое появление элемента, по нашему мнению, в большей степени характеризует эволюцию магматического очага, т.е. источника вещественного потока и энергии, а также может отражать скорость миграции этого элемента. Повторные проявления элемента в минералах в большей степени характеризуют условия в зоне минералообразования.

При анализе диаграмм первого типа, характеризующих очаг, установлено следующее:

1. Чётко выделяются 2 импульса в развитии очага вещественно-теплового потока.

2. Месторождение формировалось на фоне общего снижения интенсивности теплового потока. В середине периода развития тепловое поле усилилось в 2 раза, затем продолжалось остывание. Это видно из θ - t диаграммы (рис. 14.13).

3. До середины периода поступали мелкие атомы ($R < 1,4 \text{ \AA}$). После усиления теплового потока стали поступать крупные атомы ($R < 1,4 \text{ \AA}$). Причина в том, что до теплового импульса действовал фильтрационный эффект в районе очага. Усиление теплового потока совпало с трещинообразованием, что прекратило действие фильтрационного эффекта.

4. В каждом тепловом подэтапе в первую очередь из очага поступали и отлагались слабо диффундирующие в твёрдой фазе атомы, позже с большей скоростью диффузии.

Это подтверждается однонаправленным ростом размера и массы атома.

5. Адаптивность элементов является главным фактором ранжирования поступающих из магматического очага элементов. В месторождение сначала поступали и отлагались рудогенные элементы с большей адаптивностью, а к концу формирования адаптивность минералообразующих элементов снижалась.

Таким образом, в любой момент во флюидах оставались те элементы, которые имели устойчивые комплексы (\mathcal{E}_{\max}); и не могли образовать минералы из-за малой адаптивности (A_{\min}), большого коэффициента диффузии (R_{\max} , M_{\max}) и низкой температуры Дебая (θ_{\min}).

Анализ диаграмм второго типа, характеризующих зону минералообразования, позволил выявить следующие закономерности:

1. В зоне минералообразования достаточно чётко коррелировали между собой (R , θ , \mathcal{E} , M)- параметры. То есть те атомные свойства, которые являлись управляющими факторами и на диаграммах первого типа.

2. В минералы в первую очередь входили элементы с θ_{\max} , R_{\max} , \mathcal{E}_{\min} , M_{\min} . А во флюидах в виде комплексных соединений оставались рудогенные элементы с наибольшей электроотрицательностью, с большей массой, и с минимальным радиусом. То есть те элементы, которые не могли образовать связи в поверхностном слое кристалла из-за большой прочности их комплексов (\mathcal{E}_{\max}), малой вероятности контакта с зоной роста кристалла (R_{\min}),

вследствие большого импульса (M_{\max}) иона.

3. Стадии минералообразования взаимно наложены. В качестве главного вывода необходимо отметить, что оруденение является результатом однонаправленного действия по крайней мере 5 атомных параметров, из которых адаптивность (А) выполняла основную роль при ранжировании элементов-минералообразователей.

14.6.4. Вертикальная зональность на месторождениях различных типов

Вертикальная зональность в ореолах привноса анализировалась в связи с изменением следующих атомных параметров рудогенных элементов: R-атомный радиус, Э-электроотрицательность, М-атомная масса, Θ -температура Дебая, e -расстояние до инертного газа, А-адаптивность элемента. Для этого строились V-Z диаграммы, где V-атомный параметр, Z-последовательность элементов снизу-вверх. На каждой диаграмме определяли вид связи: (+)- значение атомного параметре V растёт снизу-вверх: (-)-значение V снижается снизу вверх; достоверность связи (P), которая вычисляется как отношение числа точек в линейном кластере к сумме всех точек. На диаграмме выделялись либо локальные кластеры, либо один общий кластер. Результаты анализа сведены в таблицу 14.7. Значение "P" для общего кластера в таблице подчёркнуто.

Из таблицы следует, что-вид связи атомных параметров с рядами осевой зональности, как правило, однозначен: R^+ , M^+ , θ^- , e^- , A^- .

Таблица 14.7

Изменение атомных параметров рудогенных элементов в рядах осевой зональности месторождений (снизу-вверх)

Формация или месторождение	R		Э		M		Θ		e		A		Источник данных
	Вид	P	Вид	P	Вид	P	Вид	P	Вид	P	Вид	P	
Кассетрит-силикатная	+	0,3	Нет	0	+	0,8	-	0,7	-	0,8	-	1,0	
Молибден-меднопорфир	+	0,87	+	0,75	+	0,75	-	0,87	-	0,87	-	0,6	
Медно-никелевая	+	0,85	-	0,7	+	0,85	-	0,71	-	0,86	-	0,86	
w-грейзенные	Нет	0	Нет	0	+	0,6	-	0,75	-	0,6	-	0,88	
Мадакоколчеданные	+	0,55	Нет	0	+	0,55	-	0,65	-	0,66	-	0,89	
Полимет.-скарновые	+	0,6	Нет	0	+	0,6	-	0,6	-	0,6	-	0,9	

Продолжение табл. 14.7

Формация или месторождение	R		Э		M		G		e		A		Источники данных
	Вид	R	Вид	R	Вид	R	Вид	R	Вид	R	Вид	R	
Полимет.-жильные	+	0,77	-	0,77	+	0,54	-	0,77	-	0,7	-	0,92	
Аи, высоко-температ.	+	0,92	Нет	0	+	0,77	-	0,77	-	0,77	-	0,46	
Аи, средне-температ.	+	0,55	+	0,78	+	0,55	-	0,55	-	0,55	-	0,78	
Урановые	+	0,50	Нет	0	+	0,5	-	0,67	-	0	-	1	
Сурьяно-ртутные	Нет	0	Нет	0	-	0,64	-	0,73	нет	0,73	-	0,82	
Стратиморф. Pb-Zn	+	0,7	+	0,8	Нет	0	-	0,8	-	0,7	-	0,8	
Корнуэлл	+	0,5	Нет	0	+	0,5	-	0,62	-	-	-	0,5	
"R" по стадиям		0,56		0,29		0,59		0,74		0,65		0,81	
"R" обшее		0,61		0		0,59		0,65		0,63		0	
Число общих "r"		7		0		8		6		5		0	
Число "R=0"		2		7		1		0		1		0	

Факторами, регулирующими зональность элементов на общем уровне, являются:

- Θ - температура Дебая ($p=0,65$),
- e - расстояние до инертного газа ($p=0,63$),
- R - атомный радиус ($p=0,61$),
- M - атомная масса ($p=0,59$).

Внутри рудогенных стадий зональность элементов определяют:

- A - адаптивность элемента ($p=0,81$),
- Θ - температура Дебая ($p=0,74$),
- e - расстояние до инертного газа ($p=0,65$),
- M - атомная масса ($p=0,59$),
- R - атомный радиус ($p=0,56$),
- Э - электроотрицательность ($p=0,29$).

То есть, снизу вверх снижается температура среды (Θ⁻, $p=0,65 \div 0,74$), уменьшается плотность упаковки атомов в кристаллической решётке (e^- , $p=0,63 \div 0,65$). Увеличение в этом же направлении атомного радиуса (R⁺, $p=0,56 \div 0,61$) и атомной массы (M⁺, $p=0,59$) свидетельствует о значительной роли твёрдофазной диффузии в процессах рудообразования, и о накоплении внизу атомов с малой способностью к диффузии в твёрдой фазе.

Локальные кластеры, соответствующие рудогенным стадиям, в первую очередь определяются адаптивностью рудогенных элементов. Внизу каждой локальной зоны накапливались элементы с высокой адаптивностью. А элементы с малой адаптивностью выносились вверх. Это является отражением условий среды в зоне минералообразова-

ния. В ряде случаев от ранних рудогенных стадий к поздним адаптивность элементов возрастает. Это, видимо, соответствует эволюции очага. И указывает на то, что более адаптивные элементы дольше задерживались в очаге, генерировавшем вещественно-тепловой поток.

14.7. Роль внешней среды в миграции элементов и в их локализации в месторождениях

Результаты анализа взаимосвязей атомных параметров элементов с их поведением в некоторых геологических процессах сведены в таблице 14.8. Сила связи оценивалась по трёхбалльной системе: 1-слабая, 2-средняя, 3-хорошая связь. Если 0, то нет связи. Перед значением балла указан знак связи. Если (+), то в рассматриваемом направлении значение параметра возрастает, если минус, то снижается.

Изучение данных таблицы указывает на однозначную роль четырёх атомных параметров (по приоритету):

- температуры Дебая (-2,34),
- расстояния до инертного газа (-1,67),
- атомного радиуса (+1,67),
- атомной массы (+1,56).

Их влияние на миграцию элементов в земной коре мы объясняем следующим. *На относительно нижних этажах земной коры, в условиях высокой температуры, оставались элементы с более высокой Дебаевской частотой.* Нами установлено, что существует зависимость между температурой среды и Дебаевской температурой рудогенных

Таблица 14.8

Взаимосвязь атомных параметров элементов (V) с их поведением в геологических процессах

№№ п/п	Геологический процесс	Изменение снизу-вверх					
		R	M	θ	e	A	Э
1	Распределение от ультра-осн. к кислым Концентрация в осн. относительно ультраосновных Концентрация в средних относительно основных Концентрация в кислых относительно средних Вертикальная зональность на месторождениях Типичная вертикальная зональность Последовательность во времени на Сп-Мо порфиров. месторождениях: а) общая б) внутри стадий Глобальная последовательность рудогенеза во времени (от древних к молодым) Суммарная роль параметров (ΣV _i) Среднее влияние (строка 9/8) Среднее для строк (1, 2, 3, 4, 5)	+1	+1	-3	-3	0	-2
2		+3	+2	-2	-3	+1	-2
3		+2	+1	-2	-3	+1	-1
4		+2	+2	-1	-1	+2	0
5		+2	+2	-3	-3	-2	0
6		+3	+1	-2	-1	-2	-2
7		+2	+2	-2	0	-3	+1
8		-2	+1	-2	0	0	+1
9		+2	+2	-3	-1	+1	0
10		+2	+1	-2	-1	-3	+1
11		+2	+2	-3	-1	+1	0
		+15	+14	-21	-15	-2	-5
		+1,67	+1,56	-2,34	-1,67	-0,22	-0,55
		+2	+1,6	-2,2	-2,6	+0,4	-1

элементов, образующих минералы при данной температуре среды (рис. 14.14):

$$T = (\Theta_D - 20)^{0,93} - 20$$

где T - температура среды, °С,

Θ_D - Дебаевская температура минералообразующих элементов, К.

На больших глубинах, в условиях высоких давлений, отлагались элементы, образующие более плотную упаковку в кристаллической решётке (с $|e|_{\max}$).

Из нижних слоёв литосферы вверх быстрее мигрировали атомы с большими коэффициентами диффузии в твёрдой фазе. К таким атомам относятся более крупные, благодаря эффекту размера примеси (см. п. 13.5), и более тяжелые атомы, из-за действия эффекта массы (см. п. 13.4).

Отметим, что все четыре атомных параметра действовали в одном направлении, поскольку между некоторыми из них существует слабая парная корреляция.

Общая временная последовательность отложений элементов в медно-молибден-порфириновых месторождениях подчиняется тем же закономерностям, что и описанная вертикальная последовательность отложения элементов. Это обусловлено постепенным остыванием каждой точки в зоне рудоотложения. В то же время фактор расстояния до инертного газа (e) не действует, поскольку давление в каждой точке рудоотложения было относительно постоянным.

Глобальная временная последовательность рудогенеза подчиняется тем же закономерностям, что и вертикальная последовательность концентрации и рудогенеза. Это вызва-

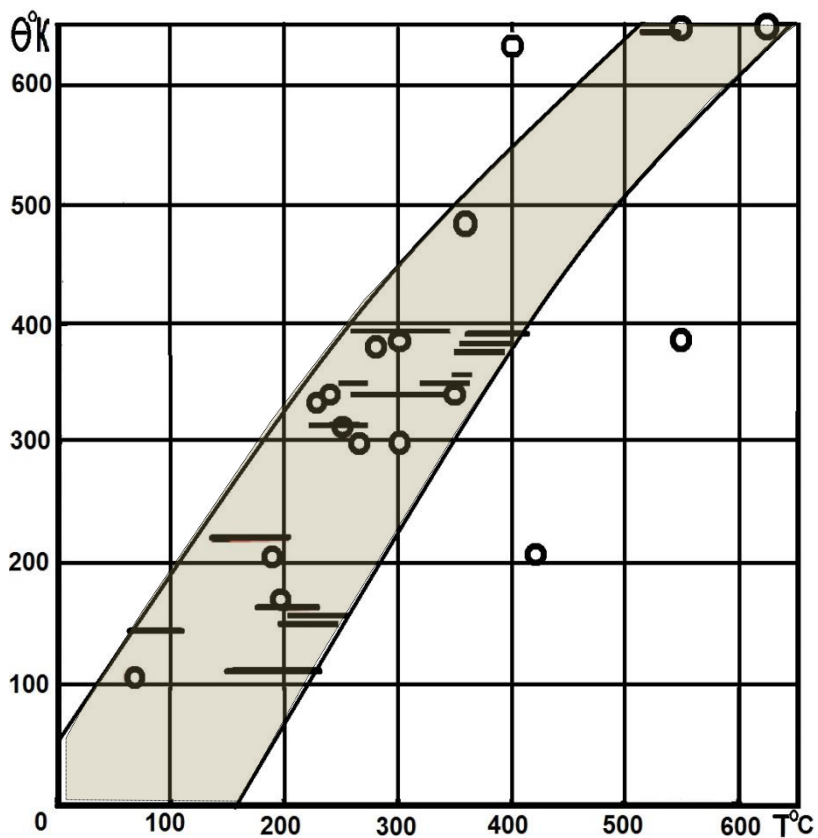


Рис. 14.14. Связь между Дебаевской температурой (Θ) элементов и температурой образования (T) их минералов.

но по меньшей мере двумя факторами, действующими од-
нонаправленно. Первый фактор - это общее остывание земной
коры, в том числе и зоны рудоотложения. Поэтому от
древних к молодым месторождениям снижается Дебаевская
температура рудообразующих элементов. Второй фактор - это
эрозия верхних частей древних месторождений или полная
регенерация ранних месторождений. То есть в наиболее
древних месторождениях мы видим их нижние этажи, в то
время как верхние их части были эродированы.

Обратим внимание на то, что эти четыре атомных
параметра выступают в качестве главных ранжирующих фак-
торов в вертикальной последовательности рудоотложения на
месторождениях различных генетических типов (см.
табл. 14.7).

*В то же время в качестве основного фактора,
определяющего зональность элементов внутри стадий,
выступает адаптивность элементов. Внизу, в условиях
высокой температуры, отлагались высокоадаптивные
элементы, а в верхней части рудных тел накапливались
элементы с малой адаптивностью.*

*Причина этого в том, что с ростом температуры
скорость химических реакций резко возрастает. И поэтому
в высокотемпературных условиях в минералах сохраняются
те элементы, у которых соединения существуют в широком
диапазоне окислительно-восстановительных условий. То
есть элементы с большей адаптивностью. А элементы с
малой адаптивностью переходят во флюиды.*



14.8. Основные выводы по главе "Закономерности дифференциации вещества земной коры и роль твёрдофазной диффузии"

1. Дифференциация породообразующих элементов в мантии, земной коре управляется силой тяжести, температурой, давлением и миграцией. Внизу остаются более тяжелые атомы, а в верхних слоях литосферы накапливаются элементы с высокой Дебаевской температурой и с большим значением $|e|$ - расстояния до инертного газа. Причина данного явления в том, что низкотемпературные и малокоординированные элементы мигрируют вверх, формируя атмосферу и гидросферу.

2. В литосфере существует транзитный поток химических элементов направленный снизу - вверх и противодействующий гравитационной дифференциации. Наиболее чётко поток проявляется для примесных элементов. Он обусловлен совместным действием давления и температуры. Поток начинается как твёрдофазная диффузия из объёма кристалла на его поверхность и продолжается как миграция во флюидах в виде комплексных соединений. Снизу - вверх в литосфере снижается роль давления и растёт роль температуры как фактора, управляющего миграцией элементов.

3. Для реконструкции условий внешней среды в ходе адаптивного анализа необходимо пользоваться следующими соотношениями между атомными параметрами минеральных элементов с одной стороны и факторами среды с другой:

а) уменьшение Дебаевской температуры - снижение температуры среды;

б) снижение $|e|$ - расстояния до инертного газа (ко-

ординационного числа) - снижение давления среды ;

в) рост атомного радиуса и атомной массы минералообразующих элементов - уменьшение подвижности атомов в минералах - уменьшение температуры среды ;

г) снижение адаптивности минералообразующих элементов - уменьшение пространственно-временной неоднородности среды .

4. Геологические процессы в земной коре управляются температурой ($k=2,34$), давлением ($k=1,67$) и геохимическими условиями .

5. В основе адаптации минерала, рудного тела и породного массива к внешней среде лежит следующий механизм :

а) не соответствующие внешней среде элементы выносятся из минералов в ходе твёрдофазной диффузии и затем мигрируют во флюидах ;

б) совокупности элементов, которые соответствуют факторам внешней среды, образуют новые минералы или присоединяются к существующим .

6. Распределение рудных месторождений по времени их окончательного формирования контролируется температурой внешней среды. Месторождения элементов с высокой Дебаевской температурой окончательно сформировались раньше, и наоборот. В основе разрушения месторождений элементов с низкой Дебаевской температурой лежит твёрдофазная диффузия, предшествующая миграции этих элементов .

7. Распределение минералов в рудных месторождениях по вертикали контролируется температурой и давлением среды: внизу формируются минералы из элементов с большой Дебаевской температурой и с большим координационным чис-

лом. Механизм адаптации минералов реализован через твердофазную диффузию и через устойчивость комплексных соединений элементов во флюидах.

Глава 15. РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ РУДОГЕНЕЗА МЕТОДОМ АДАПТИВНОГО АНАЛИЗА

15.1. Соответствие атомных параметров минерогенных элементов факторам внешней среды

Ранжирование элементов в соответствии с их атомными параметрами обусловлено внешними воздействиями. В качестве факторов внешнего воздействия нами рассматриваются температура среды, давление, электрохимические параметры среды. И изучаются соответствующие отражения этих внешних воздействий. Существуют следующие соотношения между изменением факторов среды и атомных параметров рудогенных элементов:

- а) снижение температуры → уменьшение характеристической температуры Дебая;
- б) снижение внешнего давления → снижение $|e|$ - расстояния до инертного газа;
- в) уменьшение температуры среды → уменьшение подвижности атомов в кристаллах → рост атомного радиуса и атомной массы рудообразующих элементов;
- г) уменьшение временной и пространственной неоднородности среды (в т.ч. химического состава) → уменьшение адаптивности рудообразующих элементов.

То есть на изменение внешней среды в каждой точке минералообразования возникает адекватный ответ, что сопровождается изменениями элементного состава минералов. Породный массив, месторождение, рудное тело таким способом приспосабливается к колебаниям параметров

внешних условий. Они адаптируются к внешней среде.

Совокупность элементов, соответствующих данной обстановке в той или иной точке минералообразования, образует кристаллы. Или же входит в существующие минералы, изменяя их состав. Те элемента, которые не соответствуют внешним условиям, выносятся из минералов, переходят во флюиды и транспортируются на верхние этажи литосферы. Тем самым происходит адаптация минералов к внешней среде.

Рассмотрим примеры минеральной адаптации породных массивов и рудных месторождений.

15.2. Решающая роль адаптивности элементов в минерагенезе урана

На урановом месторождении, залегающем в вулканогенно-осадочной толще, исследователи выделяют 5 рудогенных стадий: альбитовую, кварцевую, настуран-молибденитовую, флюоритовую и кальцитовую [Никитин К.А., 1977]. Месторождение гидротермального происхождения. Причиной отложения урана, по мнению Б.В.Щербины и Д.И.Щербакова, является падение давления CO_2 и рост рН раствора.

Температура гомогенизации в анкерите, друзовидном кварце, настуране, флюорите, кальците и барите равна 50÷195°C. Нами был выполнен анализ последовательности минералообразования в связи с изменениями атомных параметров минералообразующих элементов (рис. 15.1).

При изучении диаграмм было установлено следующее:

I. На месторождении выделяются 2 рудогенные стадии.

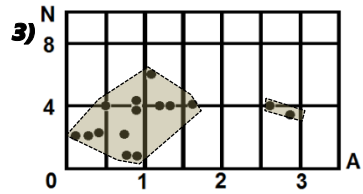
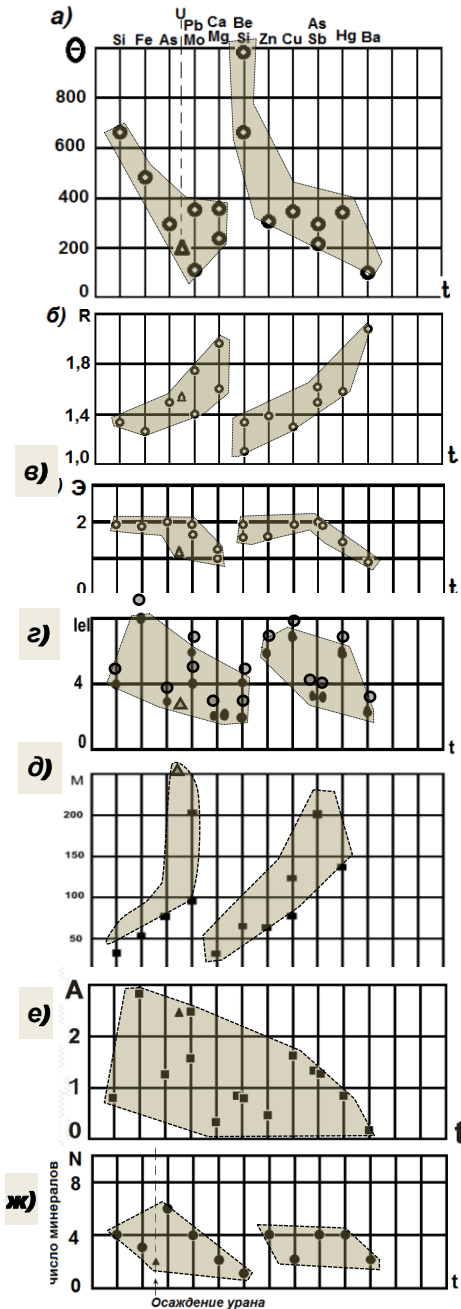


Рис. 15.1. Особенности рудогенеза на урановом месторождении: а, б, в, г, д, е- изменение во времени t атомных параметров минералообразующих элементов, Ж-изменение во времени числа минералов, з-взаимосвязь между числом минералов и адаптивностью минералообразующих элементов. Интерпретация: а-две стадии рудогенеза, температура среды снижается к концу стадии; б-в конце стадии минерал образуют элементы, слабо диффундирующие в твёрдой фазе, в-нет связи; г-в конце стадий уменьшается давление; д-в конце стадии минерал образуют слабодиффундирующие элементы; е, ж-общее обеднение очага рудогенеза.

2. В каждой стадии температура среды уменьшалась от 500°C до 50°C.

3. Уменьшение температуры сопровождалось падением давления в зоне рудогенеза,

4. В начале каждой стадии отлагались элементы с малым коэффициентом твёрдофазной диффузии (R_{\min} , M_{\min}); в конце, по мере уменьшения температуры, накапливались элементы с большим коэффициентом твёрдофазной диффузии.

5. Геохимическая неоднородность и непостоянство среды в общем уменьшались от начала первой стадии к концу второй стадии. Однако внутри каждой стадии изменение геохимической неоднородности было другое: в начале каждой стадии неоднородность была малой, а к концу стадии возрастала.

Общее снижение неоднородности мы объясняем обеднением рудогенного очага. Рост неоднородности к концу стадий объясняем формированием полужамкнутых, периодически соединяющихся камер минералообразования по мере остывания зоны рудообразования. В каждой камере формировалась специфическая геохимическая среда.

Такое объяснение подтверждается слабой корреляцией между адаптивностью элементов и числом минералов, возникающих синхронно с накоплением того или иного элемента.

Осаждение урана происходило в конце первой стадии. Главной причиной его вхождения в минералы явилось падение давления в зоне рудообразования. Снижение давления в конце второй стадии не сопровождалось образованием минералов урана. Причина в том, что геохимическая неоднородность

родность среды была значительно ниже, чем в конце первой стадии. Поэтому в конце второй стадии для урана существовала сильная конкуренция со стороны элементов с малой адаптивностью. Так, адаптивность Hg, Cu, As, Ba, Al, Mg, Si менее 1,2, в то время как адаптивность урана - 2,95.

Таким образом, вторая причина осаждения урана - слабая конкуренция со стороны других катионов в условиях сильного непостоянства геохимической обстановки. В то же время уран, имеющий большую ширину электрохимической области существования своих соединений, сумел сохраниться в минералах, несмотря на сложную геохимическую обстановку.

15.3. Реконструкция динамики внешней среды на ртутном месторождении по составу минералов

На Чаганузунском месторождении ртути Туркин И.С. установил существование вертикальной зональности элементов (снизу-вверх): Cr-Co, Ni-Zn-Pb-Cu-Sb-As-Hg. Нами рассмотрена связь этой последовательности с изменением атомных параметров рудогенных элементов. Оказалось, что зональность коррелируется со следующими атомными параметрами (по приоритету):

- 1) с ростом атомной массы (M^+),
- 2) с увеличением атомного радиуса (R^+)
- 3) со снижением температуры Дебая (Θ^-),
- 4) с уменьшением расстояния до инертного газа (e^-).

В этом же направлении наблюдается слабый рост электроотрицательности (\mathcal{E}^+) и снижение адаптивности (A^-).

Такая связь атомных параметров с зональностью

позволяет следующим образом интерпретировать осаждение элементов.

На каждом рудогенном уровне в минералах оставались те элементы, Дебаевская температура которых соответствовала температуре внешней среды. Элементы с меньшей Дебаевской температурой переходили во флюиды и уносились вверх.

На нижних этажах рудного тела, в условиях более высокой внутрикристаллической подвижности атомов, в минералах оставались элементы с малым коэффициентом диффузии. А вверх уносились элементы с большим коэффициентом диффузии (M^+ , R^+). Здесь действовали эффекты массы и размера примеси.

Внизу, в условиях более высокого давления, оставались элементы, образующие более плотную упаковку в кристаллах.

Вообще, такая закономерность типична для рудных месторождений.

Для дальнейшего анализа нами использованы приведённые в работе Туркина И.С. [1977г.] данные о содержании рудогенных элементов в руде и боковых породах на пяти горизонтах разработки. Перепад высотных отметок между крайними горизонтами составляет 500 м.

По каждому горизонту вычислялся коэффициент концентрации (К) элементов, а результаты были нанесены на диаграммы V-K, где V - следующие атомные параметры:

Дебаевская температура (Θ),
электроотрицательность (Ξ),

расстояние до инертного газа (e),
атомная масса (M),
адаптивность элемента (A).

Результаты анализа диаграмм представлены в таблице 15.1.

Из таблицы видно, что коэффициент концентрации в первую очередь контролируется 4-мя факторами:

- 1) скоростью твёрдофазной диффузии (M, R);
- 2) интенсивной твёрдофазной диффузией элементов, размер атомов которых близок к размеру атомов кремния ($R_f = R_{Si}$).
- 3) геохимической неоднородностью среды (A);
- 4) температурой внешней среды (Θ).

Различие внешнего давления играло незначительную роль. *Несомненно, что в качестве управляющего фактора выступало отличие температуры рудоконтролирующей зоны от температуры вмещающих пород. Данный фактор действовал на глубине более 200 м. Глубже 400 м длительно удерживалась более высокая температура в проницаемой рудоконтролирующей зоне. В интервале глубин 260-400 м температура в этой зоне была ниже, чем в боковых породах.*

Геохимическая неоднородность, в общем, была сильнее выражена на участках с низкими температурами.

На всех этапах сильно диффундирующие элементы концентрировались в рудном теле. Это объясняется одностадийным рудогенезом. То есть не было повторного разогрева проницаемой зоны.

Из зоны выветривания интенсивно выносились те элементы, атомный радиус которых равен атомному радиусу

Таблица 15.1

Концентрация элементов в связи с их атомными параметрами

Интерпретация	V	+2500		+2680		+2740		+2800		+3000		Руда		Порода	
		Р	П	Р	П	Р	П	Р	П	Р	П	В	Н	В	Н
Геохимическая неоднородность выше	A		+		+		+		+				+		
Высокая температура	Θ		+		+		+								+
Высокое давление	e		+				+								+
Накопление сильно диф-их элементов	R, M						+		+			+			
Удержание элементов с $R_1 = R_{Si}$	R				+							+			
Удержание сильно связанных элементов	Э														+

Примечание: V - атомные параметр; Р - руда; П - порода; В - верхние этажи; Н - нижние этажи месторождения.

кремния. Это обусловлено интенсивной твёрдофазной диффузией этих элементов.

Суммируя полученные нами результаты отметим, что твёрдофазная диффузия играла значительную роль в накоплении рудогенных элементов. Глубже 400 м руды, по сравнению с боковыми породами, обеднены интенсивно диффундирующими элементами; а от поверхности до глубины 300 м обогащены этими элементами. Это указывает на слабый повторный прогрев рудного тела на глубине 500 м и более. Что подтверждается наличием в рудном теле элементов с большой Дебаевской температурой и высоким координационным числом $|e|$.

15.4. Формирование железорудного месторождения как комплекса под влиянием факторов внешней среды

Сухаринское месторождение расположено в Горной Шории в западной части Тельбесского железорудного района. Пространственно железооруденение локализовано в отложениях сухаринской свиты верхнего протерозоя. Рудные тела, как правило, залегают согласно с напластованием карбонатно-вулканогенных пород.

Для месторождения нами был выполнен адаптивный анализ:

- а) выяснялась связь оруденения с интенсивностью магматического воздействия и с составом рудогенных пород;
- б) изучалась связь между качеством и количеством руды по рудным телам месторождения;
- в) определились особенности миграции рудогенных

элементов под влиянием внешних факторов.

Аналитические работы проводились в следующей последовательности:

1. Из множества, включающего более 100 месторождений Сибири, было выделено подмножество месторождений, похожих на Сухаринское по качеству и количеству руд. Для этого на диаграммах K_i-K_{i+1} (где K - содержание химического элемента в руде) ограничивалась локальная область, включающая 5 месторождений. То же самое было выполнено на диаграммах K_i-B , где B запасы руды на месторождении.

Попадание двух месторождений в локальную область на одной диаграмме приравнялось к одному событию, на 2 диаграммах - к двум событиям и т.д. Выделялись события двух типов: по составу руд (C_p), по составу руд плюс по запасам руд (C_3).

Оказалось, что, по принятым критериям оценки, 14 месторождений являются родственными Сухаринскому. Список месторождений приводится в таблице 15.2 в последовательности от большей схожести к меньшей.

Нами установлено, что степень родства месторождений по составу руд (C_p) определяется составом рудогенных и пострудных магматических пород, формировавших рудные тела (рис.15.2). С изменением их состава от основного до среднего степень родства возрастает в 2,5 раза. А при дальнейшем изменении состава до гранитов степень родства уменьшается в 3 раза. Таким образом, наибольшее родство по C_p и C_3 железорудных месторождений с Сухаринским про-

Таблица 15.2

Число попаданий месторождений в одну локальную область с
Сухаринским месторождением

№№ п/п	Месторождения	Рудогенные породы	Степ.сходства		Запасы руд млрд.т	Сод. Fe %	Магм. возд. Q
			С _р	С _з			
1	Ирбинское	Гр.,Га.,Др	7	4	0,12	39	5
2	Березовское	Гр.,Др.,С, Га	6	5	0,084	60	9
3	Самсон	Др.	6	4	0,16	44,3	4
4	Ташелгинское	Га.,Др.,Пи	6	3	0,14	38	6
5	Бурлукское	Га.,Др.,С, Гр.	5	4	0,10	43	9
6	Яковлевское	Га.,Др	5	3	0,02	48,5	4
7	Гематитовое	Гр	4	3	0,16	30,2	2
8	Сндинское	Гр.,Д	4	3	0,1	35	6
9	Тереховское	Га.,С,Др., Д	3	2	0,09	36	9
10	Таштагольское	Га.,Гр	3	0	1,0	42,5	4
II	Озерное	Т	2	4	0,1	31,5	2
12	Одинокое	Гр.,Др,Д,С	2	3	0,1	47	9
13	Абагасское	Га	0	3	0,15	32	2
14	Талое	Тр	0	5	0,15	33	2

Примечание: С_р-число событий по составу руд; С_з-число событий по составу и запасам руд. Гр-гранит, Га-габбро, Др-диориты, Пи-пироксенит, Д-диабаз, С-сиенит, Тр-траппы, Т-туффыты.

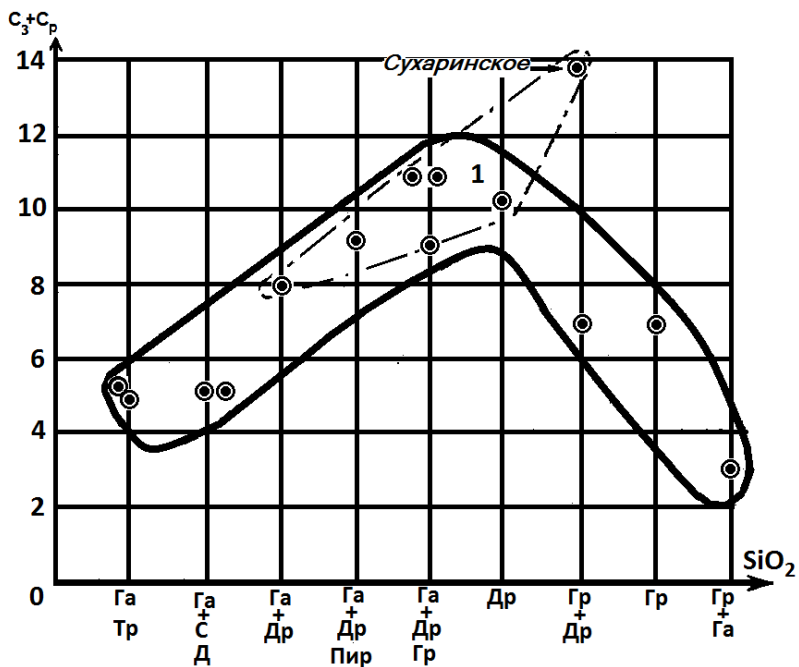


Рис. 15.2. Изменение степени родства железорудных месторождений с Сухаринским. Пояснения в тексте.

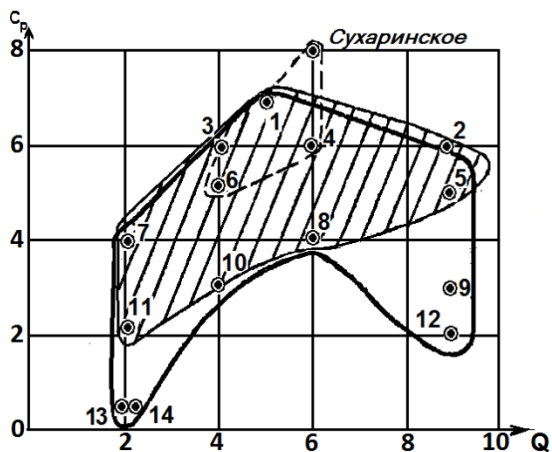


Рис. 15.3. Изменение степени родства железорудных месторождений с Сухаринским в связи с тепловым воздействием Q маг-мы.

является при сходстве рудогенных и пострудных магм, сформировавших все эти месторождения

Другим фактором, определившим степень родства месторождений по составу руд (C_p), является интенсивность магматического воздействия на рудные тела (Q).

Из рис. 15.3 видно, что Сухаринское месторождение относится к подгруппе родственных месторождений, испытавших значительное тепловое воздействие магматических тел ($Q=4\div 6$) и содержащих Pb, Co, Cu, As, Zn, V и др. На рис.15.2 это семейство принадлежит более чем половине всех типов магматических пород.

Внутри списка из табл.15.2 существует обратная связь между интенсивностью магматического воздействия и запасами руд в месторождениях (рис.15.4).

В группе родственных месторождений, при степени сходства $C_p > 3$, существует обратная связь между содержанием железа и запасами руд (рис.15.5).

Таким образом, с увеличением интенсивности магматического воздействия запасы руд уменьшаются, содержание железа незначительно возрастает (на 7%).

Все родственные месторождения располагаются в Алтае - Саянской железорудной провинции.

2.Изучение взаимосвязей между качеством и количеством руд в Большегорской скарново-рудной зоне. Для этого были проанализированы данные по участкам Сухаринского месторождения и по отдельным рудным телам.

В Большегорскую скарново-рудную зону, имеющую длину

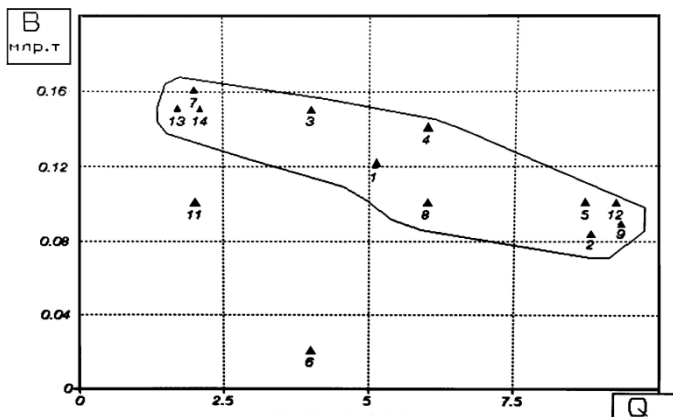


Рис. 15.4. Связь между интенсивностью магматического воздействия Q , и запасами руд в железорудных месторождениях, родственных Сухаринскому.

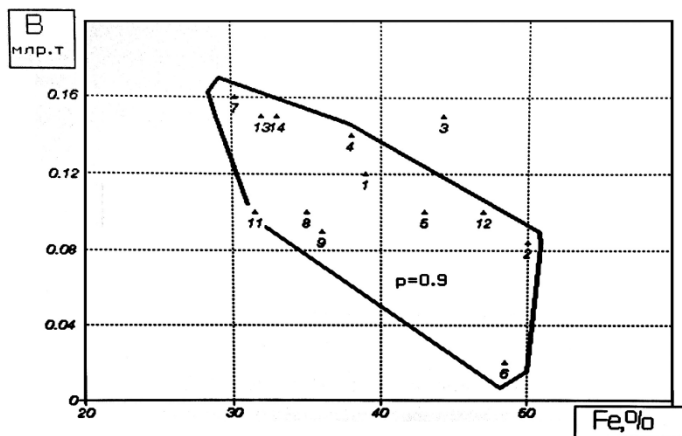


Рис. 15.5. Связь между запасами и качеством руд в железорудных месторождениях, родственных Сухаринскому.

12 км, входят 5 участков, образующих Сухаринское месторождение (таблица 15.3).

Таблица 15.3

Запасы и качество руд на участках
Сухаринского месторождения

№№ п/п	Участок	На I.I.1972 г.		На I.I.1989 г.	
		Запасы млн.т	Содер. Fe, %	Запасы млн.т	Содер. Fe, %
1	Артыштаг	3,1	29,0	4,4	40,3
2	Кедровский	7,0	42,7	4,2	45,0
3	Правосухаринский	1,53	48,2	7,6	45,5
4	Левосухаринский	5,6	41,6	4,05	41,4
5	Самарский	10,0	48,0	10,3	44,0

В скарновой зоне с увеличением среднего содержания железа возрастают запасы руды (рис. 15.6), а также число рудных тел на каждом участке (рис. 15.7).

Таким образом, если в группе родственных месторождений Алтае-Саянской железорудной провинции существует обратная связь между качеством и запасами руд, то внутри Большегорской скарново-рудной зоны эта связь прямая. Причина этого различия заключается в следующем.

Родственные месторождения развивались в неблагоприятных условиях, когда дальнейшее усиление магматического воздействия не обеспечивало поступления новых порций железа в месторождения. Это было вызвано истощением области мобилизации железа. В то же время возникло конкреционное стягивание месторождения, увеличивающее

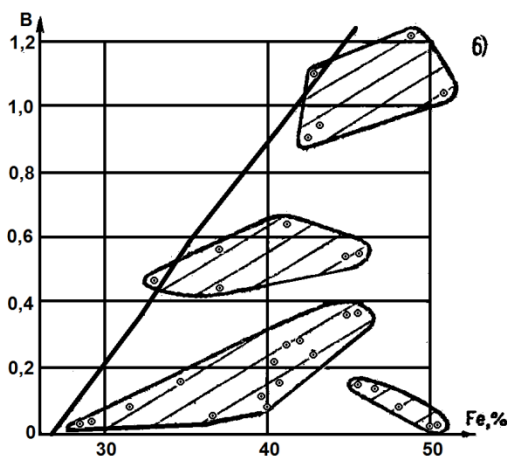
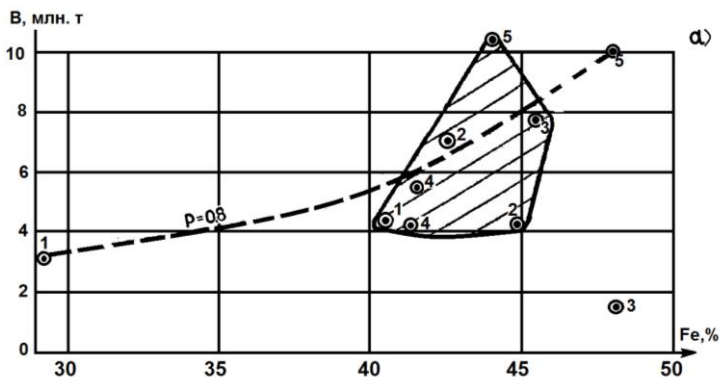


Рис.15.6. Связь между запасами руды B и их качеством в Большегорской скарновой зоне (а) и на Сухаринском месторождении (б)

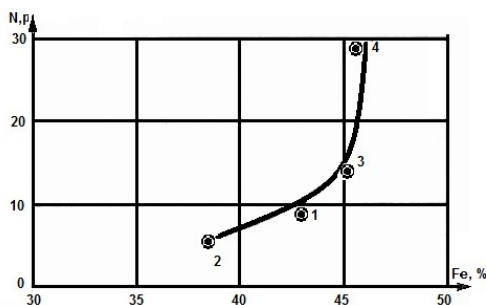


Рис. 15.7. Связь между числом рудных тел и качеством руды в них на Сухаринском месторождении.

содержание железа при одновременном уменьшении объёма месторождения. То есть существовала ремобилизация железа на окраинах месторождения с его переносом в направлении основных рудоконтролирующих трещин. Отсюда обратная связь между запасами и качеством руд.

Развитие участков Сухаринского месторождения происходило в более благоприятных условиях, *поскольку усиление магматического воздействия обеспечивало поступление железа из внешних зон ремобилизации*. В качестве таких зон выступали окраины Сухаринского месторождения. За счёт новых порций железа на новых участках образовались новые рудные тела, а в ранее сформировавшихся увеличивались запасы руд и содержание железа.

Таким образом, изучение взаимосвязей между количеством и качеством руд позволило установить:

а) развитие месторождений, родственных Сухаринскому, соответствует развитию комплексов с уменьшением объёма при одновременном увеличении элементной плотности;

б) формирование участков Сухаринского месторождения соответствует развитию комплексов с увеличением объёма при одновременном росте элементной плотности.

15.5. Генетическая реконструкция рудообразования

Анализ миграции химических элементов на Сухаринском месторождении позволил выполнить генетическую реконструкцию рудообразования. Результаты расчётов коэффициента концентрации представлены в таблице 15.4.

На основании изучения таблицы можно сделать следующие выводы;

1. Твёрдофазная диффузия всех элементов направлена: из скарнов в диориты, из скарнов в средние породы, из магнетитов в известняки, из сульфидов в магнетиты; атомы-электронофобы диффундируют из магнетитов в средние породы, а атомы электронолюбы из средних пород в магнетиты.

2. Причина этого в том, что диффузия направлена в сторону понижения температуры и давления (достоверность $p=0.75$).

Таблица 15.4

Концентрация элементов

Концентрация в породах (минералах)	Вид связи с атомн. параметр.					
	R	M	Θ	e	A	Ξ
В скарнах относительно диоритов	-2	-1	+2	+3	+2	+3
В скарнах относительно средних пород	-1	-1	+2	0	0	0
В магнетитах относительно средних пород:						
а) электронофобы (+e)	-1	-3	+1	0	0	+2
б) электронолюбы (-e)	+1	+1	-1	-2	-2	
В магнетитах относительно известняков:						
а) электронофобы (+e)	-1	-3	+2	+2	0	+1
б) электронолюбы (-e)		-3			-1	-1
В магнетитах относительно сульфидов						
а) электронофобы (+e)		+1	0	-1	-2	+1
б) электронолюбы (-e)	+1	+2			-1	0

Примечание: знак (+) - прямая зависимость, (-) - обратная.

Баллы: 0 - нет связи, 1 - слабая связь, 3 - хорошая связь.

3. Более адаптивные элементы накапливаются в условиях более высоких температур и давления (достоверность $p=0,8$).

4. Более высокая температура и давление преобладали в скарнах относительно вмещающих пород, в магнетитах относительно известняков.

5. Скарны наиболее тесно связаны с диоритами (13 баллов). Связь с другими магматическими породами среднего состава слабее (10 баллов).

Таким образом, рудогенные элементы поступали из глубоких горизонтов диоритового массива и формировали скарны, сульфидные руды, магнетит.

Из результатов адаптивного анализа Сухаринского месторождения следуют практические выводы:

1. На Яковлевском месторождении, в результате доразведки, запасы железных руд могут быть увеличены до 100 млн.т, т.е. в 5 раз. При этом содержание железа уменьшится до 42%, на 6,5%.

2. На участке Артыштаг-2 Сухаринского месторождения запасы руды, вероятно, увеличатся в 1,5 раза и составят 6 млн.т при одновременном снижении железа до 43,8%.

3. На участке Самарский 3-4 возможные запасы могут быть около 4-10 млн.т.

15.6. Основные выводы по главе "Реконструкция условий рудогенеза методом адаптивного анализа"

I. Адаптивный анализ позволяет реконструировать некоторые особенности рудогенеза: восстанавливать палео-

температуру и давление среды по горизонтам, стадии рудогенеза, определять главные рудогенные факторы, источники рудных элементов и т.д.

2. С помощью адаптивного анализа можно установить, к какому типу комплексов относится месторождение и рудное тело: с экспансивным развитием или со сжатием.

3. По результатам адаптивного анализа можно прогнозировать запасы руды и ее качество.

Глава 16. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АДАПТИВНОМУ АНАЛИЗУ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

16.1. Требования к анализируемой информации

Адаптивный анализ рудного месторождения заключается в изучении его развития, под воздействием информационно-вещественно-энергетического потока из внешней среды, в конкретной обстановке.

Инструментом адаптивного анализа является исследование месторождения в фазовом пространстве его состояний и состояний ИВЭ-потока.

Применимость метода адаптивного анализа на производстве гарантируется его относительной простотой, обусловленной, во-первых, последовательным рассмотрением фазовых плоскостей, образующих фазовое пространство. Во-вторых, последовательной редукцией множества состояний или множества объектов. Суть редукции множества состоит в том, что при переходе из одной фазовой плоскости в другую фазовую плоскость из множества M_1 выделяется подмножество M_2 по близости их фазовых состояний; затем из M_2 выделяется подмножество M_3 и т.д.

На каждой фазовой плоскости анализируются отдельно элементы множества M_1 и всех других подмножеств. Перспективность метода адаптивного анализа состоит в возможности его выполнения как без применения ЭВМ, так и на компьютерах.

Минимальные требования к исходной информации следующие:

1. Представительность выборки: изучаются данные по месторождениям одинакового происхождения, в широком понимании, и из одного региона. Количество месторождений от 25 до 100 и более.

2. Полнота информации по месторождению: данные о составе руды, о запасах руды, о рудогенных породах, о рудовмещающих породах, о породах фундамента, о тектоническом строении, о минеральном составе руд.

3. Однородность информации: одинаковый набор данных по всем месторождениям.

По прогнозируемому месторождению данные по запасам руды могут отсутствовать.

16.2. Определение типа развития месторождения

Возможны два основных типа возникновения и развития рудных месторождений:

1. *Развитие с экспансией.* В результате теплового воздействия и поступления флюидов объём месторождения увеличивается и одновременно растёт содержание рудогенных элементов в руде. Оно характерно для тех случаев, когда *с каждой порцией флюидов поступают рудогенные элементы из зоны мобилизации в зону рудогенеза.*

2. *Развитие со сжатием.* В результате теплового воздействия и поступления флюидов объём месторождения уменьшается и одновременно растёт содержание рудогенных элементов в руде. Оно характерно для тех случаев, когда, в результате воздействия среды, рудогенные элементы

мигрируют внутри месторождения, где накапливаются на геохимических барьерах. *Поступление элементов извне отсутствует или несущественно.*

Тип развития месторождений определяется на В-К диаграммах, где В запасы руды на месторождении, *К* содержание рудогенного элемента в руде. На диаграмме месторождение образует фазовую точку. Множество фазовых точек входит в поле существования месторождений на фазовой плоскости **В-К**. Поле существования сверху ограничено линиями прямой и обратной связи. Эти линии, которые могут присутствовать совместно или по отдельности, показывают взаимосвязь, возникшую в наиболее благоприятных условиях.

На **В-К** диаграмме необходимо рассматривать отдельно месторождения той рудной зоны, куда входит изучаемое месторождение. Тип **В-К** связи по региону и по рудной зоне может различаться.

В-К диаграммы строятся для всех рудогенных элементов. Рассмотрим упрощённые изображения основных типов развития месторождений. При развитии с экспансией сопряжённо растут запасы руды и содержание рудогенного элемента (рис. 16.1, а). Развитие со сжатием сопровождается уменьшением запасов руды и увеличением содержания рудогенного элемента (рис. 16.1, б). Возможны ограничения по содержанию рудогенного элемента (рис. 16.1, в), или по запасам руды (рис. 16.1, г).

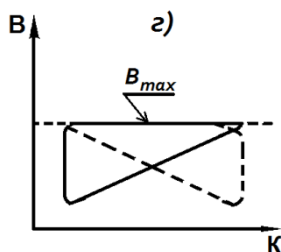
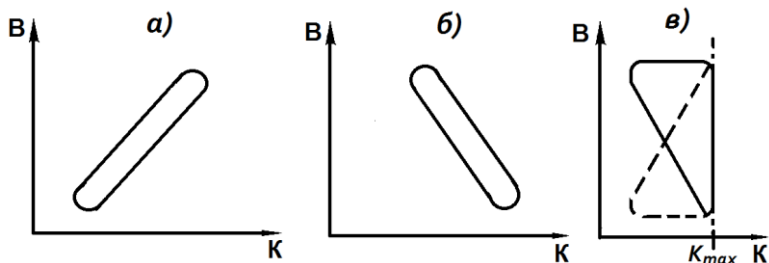


Рис 16.1. Взаимосвязь между запасами руды (B), и содержанием рудогенного элемента (K) в множестве M рудных месторождений: а-развитие с экспансией; б-развитие со сжатием; в-ограничение по содержанию элемента; з-ограничение по предельному размеру месторождения.

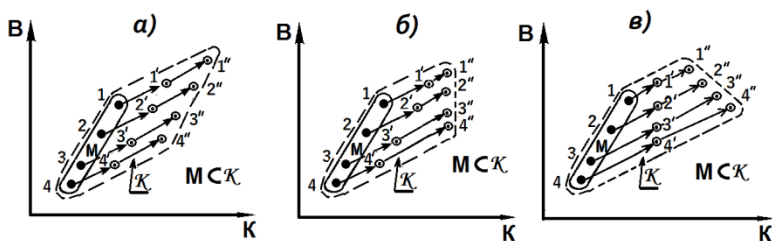


Рис16.2. Преобразование множества M при развитии с экспансией: а-удельное поступление элемента одинаково для всего множества; б-удельное поступление возрастает с уменьшением месторождения; в-то же при длительном развитии. Стрелки показывают направление развития месторождения под действием магматизма.

16.3. Анализ влияния магматизма на развитие месторождения

На оруденение может влиять магматическая деятельность дорудной стадии, насыщающая породы фундамента и рудовмещающей толщи рассеянной рудной минерализацией и формирующая рудное тело. Или же магматическая деятельность в пострудную стадию, способствующая перераспределению рудного вещества внутри месторождения, а также мобилизующая новые порции рудогенных элементов из рудовмещающей толщи и фундамента.

Воздействие магматических тел учитывается в условных баллах. Каждое воздействие приравнивается к одному баллу. Под воздействием понимается магматическая инъекция, которая внутри месторождения образует магматическое тело уникального состава. Магматическое тело может быть крупное или небольшое, пластовое или сложной формы.

На фазовой плоскости **В-К** состояний последовательно оценивается воздействие дорудной магматической деятельности, а затем пострудных магматических инъекций. Для этого каждая фазовая точка, соответствующая одному месторождению, характеризуется суммарным воздействием магматических тел. На первой **В-К** диаграмме значениями Q_1 дорудной магматической деятельности, на второй **В-К** диаграмме значениями Q_2 - пострудной магматической деятельности.

Затем для каждого компактного скопления фазовых точек, т.е. для каждого кластера, вычисляется среднее

значение $\overline{Q_1}$ и $\overline{Q_2}$. По ним на каждой диаграмме проводятся изолинии: строится фазовая поверхность по трём параметрам B, K, Q . Здесь B -запасы руды, K -содержание одного из рудогенных элементов. Такие фазовые поверхности изображаются для всех рудогенных элементов.

По изолиниям для каждой фазовой поверхности проводится основной Q -градиент. В зависимости от пространственного положения градиента по отношению к фазовой поверхности и к системе координат делаются генетические выводы.

Рассмотрим преобразование поля существования (ПС) исходного множества месторождений под воздействием внешней среды. Если месторождение представляет собой открытую систему, и если принос рудного вещества превышает его вынос, то одновременно с увеличением запасов руды будет расти содержание металла в руде. В результате будет происходить заполнение поля существования множества K элементами из множества M вследствие изменения состояния исходных элементов. В свою очередь множество M будет заполняться вновь возникающими элементами. Множество K будет включать в себя множество M ($M \subset K$). Если на единицу объёма месторождения поступление рудогенных элементов одинаковое, независимо от размера месторождения ($\Delta B \bar{E} = \text{const}$), то множество K образуется в результате параллельного переноса множества M (рис. 16.2, а).

Если $\Delta B \bar{E}$ возрастает по мере уменьшения объёма месторождения, то граничная линия справа может образовать

обратную связь между В и К, как при развитии со сжатием (рис.16.2, б-в).

Если месторождение представляет собой условно закрытую систему, куда не поступает рудное вещество, но поступает энергия и флюиды, то будет происходить развитие со сжатием. То же самое будет при превышении выноса металла над его приносом. При неравномерном развитии месторождений, вновь возникшее множество \mathcal{K} будет включать исходное множество А ($A \supset \mathcal{K}$) (рис.16.3, а). В случае равномерного развития возникшее новое множество А' не будет нести следы развития со сжатием. Оно будет напоминать множество, возникшее в результате развития с экспансией (рис. 16.3, б).

Если исходное множество А состоит из условно закрытых систем, со случайным распределением их состояний, то при развитии со сжатием возникнет множество А' с обратной связью между В и К (рис. 16.4). При неравномерном развитии со сжатием из множества А' образуется множество \mathcal{K} ($A' \supset \mathcal{K}$) с обратной взаимосвязью параметров В-К (рис. 16.5).

На фазовой плоскости В-К диаграммы форма поля существования множества зависит также и от интенсивности миграции рудогенного элемента. С ее ростом и при ограничении наибольшего содержания возникает случайное распределение (рис.16.6, множество В). При слабой миграции и неравномерном развитии образуется прямая зависимость между размером месторождения и содержанием металла (рис. 16.6, множество А). Такие фазовые портреты характерны

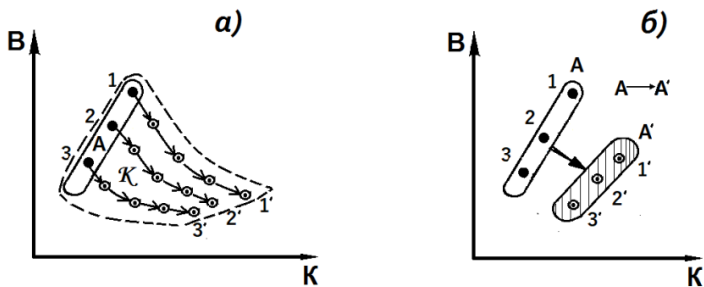


Рис.16.3. Преобразование множества A , когда развитие с экспансией сменяется развитием со сжатием: а-преобразование $A \rightarrow K$, ($A \supset K$) вследствие неравномерного развития месторождений; б-преобразование $A \rightarrow A'$, развитие равномерное.

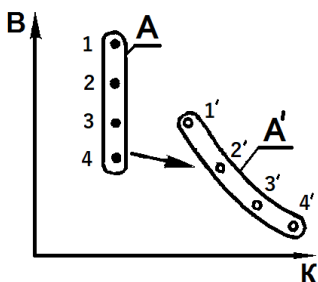


Рис.16.4. Преобразование случайного множества A ($A \rightarrow A'$) в результате развития со сжатием. Удельное поступление рудогенных элементов возрастает с уменьшением размера месторождения.

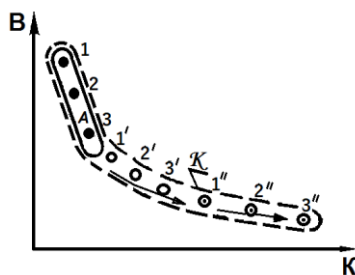


Рис.16.5. Преобразование множества A ($A \rightarrow K$, $A \supset K$) в результате неравномерного развития со сжатием. Поле существования K включает поле существования множества A .

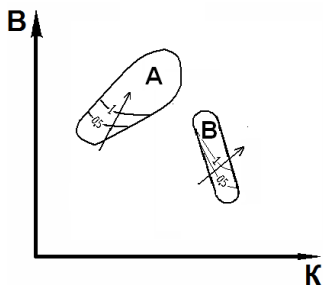


Рис.16.6. Два множества месторождений с ограничением по содержанию металла: A - с экспансией; при малом воздействии магмы миграция элементов слабая; B - с экспансией, с интенсивной миграцией элементов при малом воздействии магмы. Изолинии интенсивности воздействия магмы.

для золоторудных месторождений третичного возраста (см. гл.12). Золото более интенсивно мигрировало на тех месторождениях, где фундамент состоял из экранирующих пород: аргиллитов, соленосных толщ, филлитов и др. Причина этого, видимо, заключается в том, что рудоносные флюиды не рассеивались в отложениях фундамента и в рудовмещающей толще, а локализовались в рудоконтролирующих каналах.

В результате анализа взаимосвязи атомных параметров рудогенных элементов с формой развития их месторождений установлено следующее (табл.16.1):

1. Развитие со сжатием более характерно для месторождений тех элементов, которые более интенсивно диффундируют в твёрдой фазе ($c_{R_{max}}, \Theta_{min}, \mathcal{E}_{min}, e_{min}$).

2. Месторождения слабоадаптивных элементов (A_{min}) развиваются с экспансией, что обусловлено их интенсивным поступлением из магматического очага в зону рудообразования (рис. 16.7).

Кроме того выявлено, что мелкие месторождения чаще развиваются с экспансией. То есть, каждая порция металлоносных флюидов вызывает увеличение размера рудного тела и повышение содержания металла в руде. Месторождения с более богатой рудой тоже развиваются с расширением.

Влияние диффузии объясняется, тем, что интенсивно диффундирующие элементы достаточно быстро уходят из зоны мобилизации и месторождение превращается в условно закрытую систему. То есть в месторождение прекращается поступление металла извне, из зоны мобилизации. Поэтому

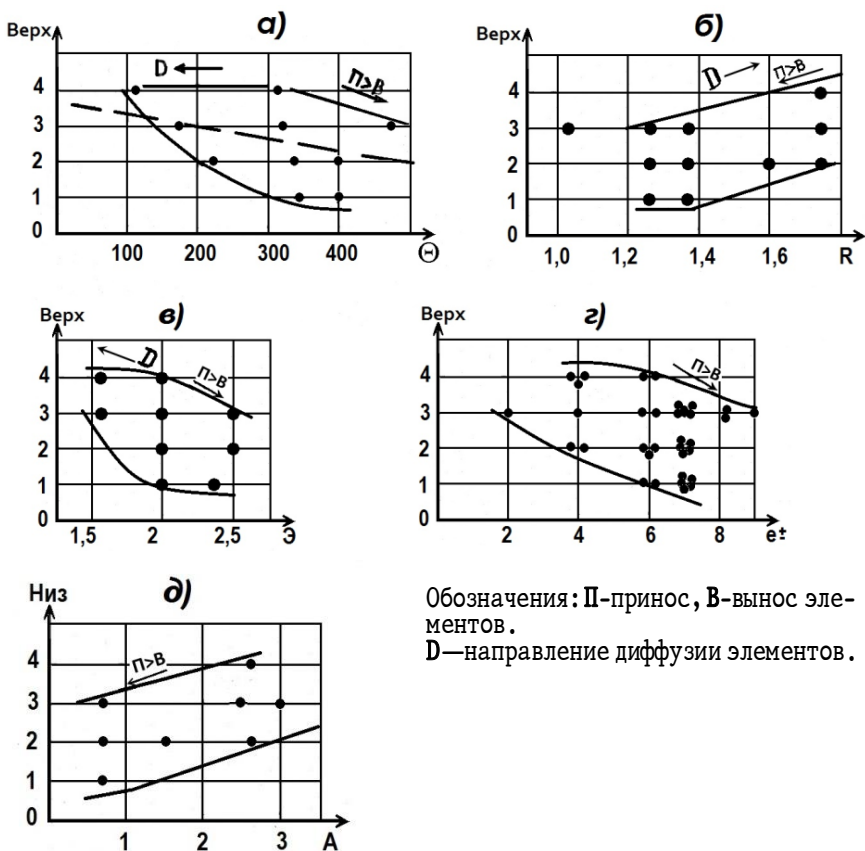


Рис.16.7. Взаимосвязь атомных параметров рудогенных элементов с формой развития их месторождений: Θ -Дебаевской температуры; R-атомного радиуса; Э-электроотрицательности; $e_{г}$ -расстояния до инертного газа. По оси ординат цифры обозначают: 1-экспансия; 2-случайное сжатие; 3-экспансия \rightarrow сжатие; 4-сжатие.

оно развивается со сжатием .

Таблица 16.1

Элементы	Число событий по схемам развития			
	Экспансия	Случайное→ сжатие	Экспансия→ сжатие	Сжатие
S			1	
Mn		1		
Fe			1	
Cu	4	4	3	1
Pb				3
Zn			2	2
Ni			2	
Co			1	
Sn		1		
W	1	1		
Mo	1	2		
Au	1		2	
Ag		1		

Более мелкие месторождения являются частью более крупной системы месторождений, и поэтому восполняют потери металла за счёт близлежащих рудных тел, не входящих в месторождение. Это приводит к тому, что мелкие месторождения развиваются с расширением.

Из приведенного сопоставления теоретически возможных схем развития с реальностью следует, что анализ месторождений в фазовом пространстве «запасы -

качество руды» достаточно информативен. При прочих равных условиях, развитие с экспансией свидетельствует о превышении скорости приноса металла в зону рудогенеза над выносам металла. Причину этого следует искать либо в достаточно богатом источнике мобилизации на глубоких этажах, либо в слабой твёрдофазной диффузии рудогенного элемента внутри месторождения.

16.4. Анализ влияния состава боковых пород на формирование месторождения

Необходимо по всему множеству или подмножеству месторождений отдельно анализировать влияние пород фундамента, рудовмещающей толщи, предположительно рудогенных пород. Для каждой породной толщи надо строить диаграммы: Р - запасы руды; Р - содержание металла. Где Р - следующие параметры толщи:

- 1) доля магматических пород;
- 2) доля интрузивных пород;
- 3) доля пород основного, ультраосновного состава;
- 4) доля пород среднего, кислого состава;
- 5) доля экранирующих пород: аргиллитов, известняков

и других. Здесь известняки создают геохимический барьер.

На некоторых диаграммах каждая точка характеризуется интенсивностью магматического воздействия. Тем самым учитывается комплексное влияние вещественного состава объектов среды и вещественно - энергетического воздействия среды.

16.5. Анализ взаимосвязи между содержанием различных рудогенных элементов

Анализ взаимосвязи между содержанием различных рудогенных элементов в руде позволяет решить следующие задачи:

- а) выявить кластеры (генетические подтипы) рудных месторождений;
- б) установить влияние магматического воздействия на содержание рудогенных элементов;
- в) выяснить возможность прогнозирования масштаба месторождения по химическому составу руды.

Для выявления генетических подтипов на каждой диаграмме содержание i -го элемента - содержание j -го элемента выявляются кластеры. Те месторождения, которые попадают в один кластер, считаются родственными по i - j -му признаку.

Если изучаемые месторождения родственны по многим признакам, то они образуют генетический подтип. Число необходимых признаков определяет исследователь, исходя из генетических предпосылок.

Для оценки магматического воздействия фазовая точка характеризуется значением Q . Для каждого кластера вычисляется средняя величина \bar{Q} , по которой строится изолиния магматического воздействия. Такой фазовый портрет позволяет оценить степень связности для миграции рудогенных элементов в ходе развития месторождения.

Если каждую фазовую точку на диаграмме охарактеризовать запасами руды по месторождению, то это

позволит выяснить взаимосвязь между качеством и запасами руды. Для этого выделяются области диаграммы с различающимися запасами руды по месторождениям. Для каждой выделенной области оценивается вероятность встречи крупных, средних и мелких месторождений. При наиболее благоприятных условиях взаимосвязи проводятся изолинии запасов руды.

16.6. Прогнозная оценка запасов руды на изучаемом месторождении

Запасы руды на месторождении или на участке рудопроявления оцениваются по нескольким ранее подготовленным диаграммам, а также по фазовым портретам различных подмножеств месторождений, включающих изучаемое. Из наиболее достоверных прогнозируемых значений берётся среднеарифметическая величина.

Используются следующие диаграммы:

- 1) запасы руды - магматическое воздействие;
- 2) содержание i -го элемента - запасы руды - магматическое воздействие;
- 3) содержание i -го элемента - содержание j -го элемента - запасы руды;
- 4) состав пород фундамента - запасы руды.

Прогнозируемая величина запасов должна корректироваться с учётом геолого-генетической модели месторождения.

16.7. Изучение направления миграции рудогенных элементов на месторождении

Для составления геолого-генетической модели необходимо изучение миграции рудогенных элементов внутри месторождения.

Наиболее доступным методом исследования миграции является определение коэффициентов концентрации (K_k) элементов в одних породах относительно других пород, или в рудах относительно рудовмещающих пород, или в одной части месторождения относительно другой части.

Для выявления внешних и внутренних факторов, управляющих перераспределением рудогенных элементов, необходимо строить фазовые портреты:

K_k - Θ , (Θ -характеристическая температура Дебая);

K_k - R , (R - атомный радиус);

K_k - \mathcal{E} , (\mathcal{E} -электроотрицательность);

K_k - e , (e - расстояние до инертного газа);

K_k - M , (M -атомная масса элемента);

K_k - A , (A -адаптивность элемента).

Для оценки влияния температуры и давления, коэффициент концентрации необходимо вычислять для различных глубин месторождения.

Если выполняется анализ рудовмещающей толщи по зонам, то информативным является фазовый портрет, построенный по наибольшим содержаниям рудогенных элементов.

Интерпретация фазовых портретов миграции основывается на адаптации устойчивых твёрдофазных

соединений элементов к внешним условиям. Так, в зонах с высокой температурой преобладают элементы с высокой Дебаевской температурой (Θ_{\max}). Высокое давление среды коррелируется с e_{\max} ; большой геохимической неоднородности среды во времени и в пространстве соответствует высокая адаптивность элементов (A_{\max}). Направление твёрдофазной диффузии совпадает с направленным увеличением на фазовом портрете атомной массы (M^+) и атомного радиуса (R^+).

Изменение в процессе рудогенеза внешних условий характеризуется V-t диаграммами, где V-атомные параметры элементов (Θ , R, Э, e, M, A), t-время минералообразования. Эти диаграммы базируются на последовательности минералообразования в рудных телах. Рассматривается последовательность накопления не минералов, а слагающих их элементов. Горизонтальная ось образована временными точками осаждения элементов, а вертикальная ось - значениями того или иного атомного параметра, характеризующего эти элементы.

Строятся диаграммы двух типов:

1) по первому появлению рудогенного элемента. Характеризует эволюцию магматического очага, то есть источника вещественно-энергетического потока;

2) по всем проявлениям элемента. Отражает условия среды в зоне рудообразования.

Собственно изучается не вектор миграции рудогенных элементов, а вектор изменений устойчивости твёрдофазных соединений этих элементов. В первом приближении можно

считать, что с вектором увеличения устойчивости соединений элементов совпадает вектор их миграции.

В основу адаптивного подхода в изучении рудогенеза положено мнение о том, что в тех или иных внешних условиях сохраняются устойчивые твердофазные соединения. В твердофазные соединения входят те элементы, которые способны образовать устойчивые соединения в агрессивной внешней среде. Устойчивость соединений определяется соответствием минералообразующих элементов температуре среды, внешнему давлению, геохимической неоднородности во времени, а также продолжительностью разрушения минерала при несоответствии элементов внешним условиям.

Понятно, что эта связь между средой и минералами не столь прямолинейна, однако объективна и повсеместна. В связи с инерционностью системы среда - минерал, элементный состав в ряде случаев отражает палеоусловия, которые существовали в эпоху активного рудогенеза. А понижение температуры и уменьшение количества горячих флюидов привело к снижению миграционной способности элементов на несколько порядков.

То есть во многих случаях мы имеем замороженную картину изменения параметров той среды, которая существовала в эпоху активного рудогенеза. И которая запечатлена распределением рудогенных элементов в массиве.

Изучение миграции элементов, вместе с оценкой влияния конкретных факторов среда: состава боковых пород, числа магматических инъекций, позволяет создать

вариант геолого-генетической модели, входящей в множество подобных моделей.

16.8. Создание геолого-генетической модели месторождения

Создание геолого-генетической модели начинается с поиска аналогичных месторождений, т.е. с формирования подмножества, соответствующего геолого-генетическому подтипу. Модель в себя включает:

а) форму развития комплекса (с экспансией, со сжатием, с экспансией \Rightarrow сжатием, со случайным распределением \Rightarrow сжатием). Форма развития указывает на изменение во времени степени открытости системы среда-комплекс:

б) источники мобилизации рудогенных элементов, с учётом их возможной ремобилизации из других рудных тел или рудопроявлений данной рудной зоны, из окраинных частей месторождения:

в) форму развития рудных тел изучаемого месторождения;

г) векторы миграции рудогенных элементов в связи с адаптацией их твёрдофазных соединений к условиям внешней среды;

д) учёт влияния отдельных частей фундамента, рудогенной и рудовмещающей толщи в качестве источников вещественно-энергетического потока, как экранирующих слоёв или каналов для поступления флюидов в зону рудогенеза;

е) последовательность поступления химических элементов из внешней среды в зону рудогенеза.

Геолого-генетическая модель месторождения позволяет обосновать прогнозируемые значения параметров месторождения. Модель представляет собой совокупность диаграмм и фазовых портретов с описанием:

- 1) множества M генетически однотипных месторождений;
- 2) подмножества $M_1 \supset M$ генетического подтипа месторождений региона, включающего изучаемое месторождение (рудопроявление);
- 3) подмножества $M_2 \supset M_1$ месторождений рудной зоны, куда входит исследуемое месторождение (рудопроявление);
- 4) подмножество $M_3 \supset M_2$ рудных тел, образующих данное месторождение.

Фазовые портреты включают в себя:

- 1) фазовые портреты развития каждого множества (подмножества);
- 2) фазовые портреты объекта (множества, подмножества, месторождения);
- 3) фазовые портреты адаптации комплекса;
- 4) фазовые портреты миграции химических элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы выяснено, что адаптивный подход позволяет получить новые знания и новые методы прогнозирования состояний неживых объектов. Для проверки положений теории адаптации была выбрана известная автору область – геология.

Исследование геологических объектов одновременно и в связи с внешней средой общепринято. Причина такого подхода в общепризнанности влияния среды на развитие объекта. Однако ранее отсутствовали завершённые исследования состояния геологического объекта в пространстве вещественно-энергетических параметров среды.

Проверка такой связи осложнена тем, что она не описывается простыми уравнениями. Потому что *каждому состоянию среды соответствует целый спектр состояний объекта*. И, в пространстве управляющих факторов среды, состояния объекта образуют поле существования, а не кривую, пусть и размытую. *Поэтому наличие связи и ее вид можно оценить, работая с граничными линиями поля существования, или рассматривая подмножества состояний объекта в фазовом пространстве* путем редукции множества, а затем подмножеств.

Благодаря такому *методическому подходу* удалось выявить применимость к геологическим объектам основных положений разработанной теории адаптации неживых объектов. В частности, это вывод, касающийся возникновения объектов – *о взаимосвязи величины и элементной плотности объекта*. Он был доказан как для угольных, так и для рудных месторож-

дений.

Второй вывод связан с субадаптированностью объектов к воздействию внешней среды. Было выявлено, что *геологические объекты возникают и развиваются, приспособляясь к вещественно-энергетическому влиянию среды*, и были найдены механизмы их адаптации. Адаптация угленосной толщи происходила на уровне элементов ландшафта бассейна седиментации. Адаптация рудных месторождений обязана реагированию химических элементов на уровне их атомных параметров.

Другие положения теории адаптации не изучались в приложении к геологическим объектам.

В ходе адаптивного анализа угольных месторождений выявлено наличие поэтапной адаптации сложных объектов - торфяной залежи и терригенных слоёв к энергетическому воздействию водной среды. По мере роста его значения в осадочных слоях появляются узкие, лентовидные потоковые отложения из более грубого материала. А в самих слоях возрастает размер зерна, проявляются признаки донной эрозии. Текстура меняется от горизонтальной в сторону крупной косой. Причём существует тесная связь между изменением энергетического состояния среды и его значениями с одной стороны, и состоянием объекта с другой. Это позволяет прогнозировать безугольные зоны и морфологию пласта, а также качество угля по данным о кровле и почве пласта.

Было подтверждено теоретическое положение об адаптации *рудного месторождения* к тепловому воздействию среды. Оказалось, что с ростом магматического влияния состояние месторождения связано деформируется. При этом меняются ка-

чество и запасы руды. Что позволяет прогнозировать масштаб оруденения по составу руды с помощью фазовых диаграмм.

Однако важно то, что применяемый методический подход позволил выйти на те внутренние параметры рудного месторождения, которые управляют его формированием. Это - атомные параметры рудогенных элементов. Другими словами, применяемые способы анализа указали на то, что месторождение возникает и развивается в первую очередь в результате реагирования химических элементов на воздействие среды на уровне их атомных свойств.

В качестве управляющих факторов среды выступают тепловое поле, давление и электрохимические условия. А внутренними управляющими факторами являются такие атомные параметры, как радиус, масса, электроотрицательность, Дебаевская частота, число электронов до оболочки инертного газа, адаптивность атома. Причём на тепловое поле реагирует Дебаевская частота; на давление - число электронов до инертного газа; на электрохимические условия - адаптивность атома.

Таким образом, скорость миграции атома, а также возможность его фиксации в минералах является результатом его сложного реагирования на суммарное воздействие факторов внешней среды.

Удалось установить, что *механизм адаптации минерала реализуется через твёрдофазную диффузию его атомов*. Вектор диффузии, а следовательно и векторы геологических процессов, можно определить по изменению во времени и в горном массиве радиуса и массы минералогенных атомов. Это - направ-

ление миграции химических элементов в литосфере, последовательность рудогенеза в пространстве и во времени, и динамика градиентов управляющих факторов среды.

В результате изучения особенностей твёрдофазной диффузии в одноэлементных кристаллах были выяснены основные ее закономерности. Было установлено, что диффузия является кусочной функцией от многих атомных параметров. *А скорость твёрдофазной диффузии атома возрастает, главным образом, с увеличением его радиуса и массы.* Выяснение этого факта позволило объяснить некоторые явления дифференциации вещества в литосфере, ранее не понятые другими исследователям.

Кроме того, были подтверждены взаимосвязи размеров и элементной плотности в природных комплексах - в рудных, в угольных месторождениях и бассейнах. Это позволило дополнить существующие способы прогноза запасов полезных ископаемых новыми, по их составу.

Основные научные выводы работы заключаются в следующем:

1. *Объект - это объединение его составных частей - элементов по каким-либо физическим признакам.* В качестве геологических объектов выступают земной шар, литосфера, рудные и угольные районы, месторождения, рудные тела, минералы и т.д. В качестве одного из геохимических объектов можно рассматривать периодическую систему Менделеева.

Внутри неживого объекта динамично возникает *наиболее целостная часть - комплекс, реагирующий на внешнее воздействие целостным образом.* Во многих случаях, особенно при

росте продолжительности воздействия среды, комплекс совпадает с объектом. Это характерно для геологических объектов.

Таким образом, *комплекс - это объект или его часть, реагирующие на какое-либо воздействие внешней среды целостным образом.* Поэтому комплексы внутри объекта могут взаимно перекрываться.

Химические элементы из периодической системы образуют комплексы при их взаимодействии со средой. Например, при миграции в литосфере, при рудогенезе, при твёрдофазной диффузии в кристаллах. В то же время, литосфера, месторождение и кристалл являются комплексами другого типа.

Комплекс высокого уровня состоит из комплексов нижнего уровня, то есть существует иерархическая вложенность комплексов. Комплекс высокого уровня возникает из комплексов нижнего уровня под влиянием внешней среды в определенных пространственно - вещественно - энергетических условиях. Большую роль играет направление перемещения элементов комплекса. В зависимости от этого существует либо прямая, либо обратная связь между величиной комплекса и его элементной плотностью.

Возникновение комплекса одного типа - это результат адаптации к воздействию внешней среды комплексов других типов, а также их элементов. Адаптация комплекса представляет собой связную деформацию всех его параметров. В ходе роста внешнего воздействия комплекс последовательно проходит три этапа адаптации. Сначала стабильную, с сохранением старой структуры, затем структурную с ее изменением,

и наконец катастрофическую, с разрушением комплекса, что позволяет сохраниться элементам комплекса.

В точке адаптации комплекса его энтропия возрастает, а после адаптации энтропия понижается. Что связано с ростом упорядоченности его элементов и улучшением транспортирующей способности его каналов для вещественно-энергетических потоков из среды,

2. Особенности осадочного слоя являются результатом адаптации ландшафта бассейна осадконакопления к вещественно-энергетическому воздействию среды: к интенсивности твёрдого и жидкого стока. Это такие особенности, как морфология и зольность угольного пласта, отклонения мощности от ее средних значений, размывы и замещения угля пустой породой. А в терригенных слоях - это структура и текстура, наличие базального конгломерата.

По мере роста интенсивности воздействия среды, палеоландшафт испытывает вначале стабильную, затем структурную, и наконец катастрофическую адаптацию.

Анализ особенностей угольного пласта в фазовом пространстве вещественно-энергетического воздействия среды позволяет прогнозировать качество угля, мощность и строение пласта с достоверностью более 0,65.

Угольные пласт, месторождение, район и бассейн являются комплексами, поскольку к ним применим закон взаимосвязи величины и элементной плотности комплекса. Это выражается в связи площади пласта с его мощностью, площади угленосного района и бассейна с коэффициентом угленосности.

3. Рудное месторождение формируется под воздействием

факторов внешней среды и под влиянием атомных параметров минерагенных элементов. В качестве внешних факторов выступают интенсивность магматического воздействия, состав рудогенных и рудовмещающих пород, физические свойства и состав пород фундамента. В качестве внутреннего фактора в первую очередь действует величина атома рудогенного элемента, что обусловлено действием ситового эффекта.

Запасы, состав руды и интенсивность пострудного магматического воздействия взаимосвязаны. С увеличением магматического воздействия запасы снижаются, а химический состав руды связно деформируется. Для любого типа месторождений существует обратная связь между предельными запасами руды и содержанием рудогенного элемента. Это вызвано ремобилизацией элементов на окраинах месторождения и их накоплением в его центральной части.

Взаимосвязь параметров месторождения позволяет прогнозировать его масштаб по составу руды на ранних стадиях геологической разведки.

Степень увеличения содержания элементов, при уменьшении величины месторождения в два раза, чётко контролируется атомным радиусом данного элемента. При этом, чем крупнее атом рудогенного элемента, тем на большую величину возрастает его содержание в ходе конкреционного сжатия месторождения. Это главным образом связано с действием ситового эффекта.

Масштаб золотооруденения уменьшается по мере снижения проницаемости пород фундамента. Чем больше в фундаменте отложений с глинистыми минералами и солей, образующих

непроницаемый барьер; или известняков, образующих геохимический барьер, тем меньше величина золоторудного месторождения. Однако при этом содержание золота повышается.

Причина этого явления в накоплении золотонесущих флюидов под непроницаемым барьером, после дующий сток в зоны кратковременно раскрывающихся тектонических разломов, и рудообразование на верхних этажах, на термо- и баробарьерах.

4. В ходе анализа причин изменения состава железных руд под воздействием магматического тепла было установлено, что на данный процесс влияет размер ребра кристаллической решётки. То есть, здесь несомненна роль твёрдофазной диффузии.

Для уточнения факторов, управляющих твёрдофазной диффузией, данный процесс изучался применительно к одноэлементным кристаллам. Было выяснено, что твёрдофазная диффузия более интенсивна для более тяжёлых и более крупных примесных элементов. *Данные явления были названы эффектом массы и эффектом размера примеси.* Их причина в преимущественно гантельном механизме твёрдофазной диффузии. *Они играют большую роль в определении вектора геологических процессов и объясняют некоторые важные факты, которые при традиционном подходе нельзя обосновать.*

5. Была выяснена решающая роль твёрдофазной диффузии примесных элементов в их миграции и дифференциации в литосфере. Твёрдофазная диффузия предшествует восходящей миграции элементов во флюидах.

Движущей силой дифференциации породобразующих, ши-

роко распространённых элементов является градиент гравитационного поля Земли. А дифференциация примесных элементов происходит за счёт градиентов теплового поля и давления. Пусковым механизмом дифференциации выступает твёрдофазная диффузия элементов, происходящая в результате суммарного воздействия внешней среды на их атомные параметры. *На градиент давления реагирует число электронов, необходимых для изменения конфигурации электронной оболочки до инертного элемента. Градиент температуры воздействует на Дебаевскую частоту колебания примесных атомов в кристаллической решетке минерала.*

Интенсивность твёрдофазной диффузии тем выше, чем тяжелее и крупнее примесный атом, а также чем меньше его электроотрицательность.

6. Минералообразование и миграция элемента - это два противоположных явления. Они являются результатом сложного его реагирования на воздействие управляющих факторов среды: температуры, давления, электрохимической обстановки. На последнее элемент реагирует через окислительно-восстановительные потенциалы своих соединений. Ширина этих потенциалов нами учитывается как адаптивность данного элемента. То есть, как его способность образовать стабильные в твёрдой фазе соединения в различных химических условиях.

Минерагенез и рудогенез являются результатом адаптации химических элементов к управляющим факторам среды - к температуре, к давлению, к геохимической обстановке. Поэтому динамику этих факторов можно реконструировать по хи-

мическому составу минералов и руды, в пространственно-временных координатах в массиве или в месторождении. Это возможно благодаря соотнесению факторов среды атомным параметрам минералообразующих элементов и определению векторов твёрдофазной диффузии.

Основным практическим результатом выполненной работы является разработанная методика адаптивного анализа неживых объектов. А также методические рекомендации по ее применению в исследовании и в прогнозировании состояния рудных и угольных месторождений, породных массивов.

В качестве нерешённых задач следует отметить необходимость применения адаптивной идеологии в исследовании и прогнозировании состояния объектов других типов: из экономической, социальной, производственной, военной и других областей. Кроме того, существует потребность в создании и применении компьютерной программы по адаптивному анализу неживых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Г. И., Гуревич А. В., Захарченко С. И. и др. Исследование неоднородных температурно - электрических состояний в металлах. - Физика тв. тела, т. 27, в. 8, 1985. - с. 2250 - 2257.
2. Алабин Л. В., Митюшин А. М. Рудные столбы и перспективы центрального месторождения. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 136 - 139.
3. Алексеев Б. В., Гришин А. Н. Физическая газодинамика реагирующих сред. - М: Высшая школа, 1985. - 464 с.
4. Альбом течений жидкости и газа: Пер. с англ. /Сост. М. Ван - Дайк/. - М. : Мир, 1986. - 184 с.
5. Анохин П. К. Определяющее отражение действительности. Вопросы философии, 1962, Т7.
6. Афоникова Н. С., Шехтман В. Ш., Шмытько И. Н. Кристалл - геометрические аспекты сопряжения доменов и доменных комплексов и структурная память в BaTiO_3 . - Физ. тв. тела, т. 27, в. 8 - с. 3201 - 3207.
7. Бабкин П. В., Ким Е. П. Типы и генезис рудных столбов ртутных месторождений северо-востока СССР. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 299 - 307.
8. Барабанов В. Ф. Геохимия. - Л. : Недра, 1985. - 423 с.
9. Бартоломью Д. Стохастические модели социальных процессов. - М. : Финансы и статистика, 1985. - 295 с.
10. Барышев А. Н. Модель саморазвития структур колчеданоносных систем в вулканогенных геосинклиналях. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 73 - 86.
11. Башкина Э. Ф. Об условиях локализации свинцово - цинкового оруденения на Садонском месторождении. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 275 - 281.
12. Bergey W. R., Carr J. M., Reed A. J. The Highmont copper - molybdenum deposits, Highland Valley, British Columbia. «Can. Mining and Met. Bull.», 1971, 64, N 716, 68 - 76.
13. Берзина А. П., Нигматулина Е. Н., Сотников В. И. Летучие компоненты рудно - магматических систем (к генетической модели медно - молибденовых месторождений). - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск : Наука, 1987. - с. 44 - 62.

14. Бетгер Х. Принципы динамической теории решётки. - М. : Мир, 1986. - 392 с.
15. Блейкмор Дж. Физика твёрдого тела. - М. : Мир, 1988. - 608 с.
16. Бокий Г. Б. Кристаллохимия. - М. : Наука, 1971. - 400 с.
17. Борисенко А. С., Оболенский А. А., Лебедев В. И. Основные черты генетических моделей эпитермальных серебряных месторождений. В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 107 - 119.
18. Бородаевская Н. Б., Кривцов А. И., Яковлев Г. Ф. Структурные типы колчеданных месторождений. - Разведка и охрана недр, 1978, Т1.
19. Браунлоу А. Х. Геохимия: Пер. с англ. - М. : Недра, 1984. - 463с.
20. Бровков Г. Н., Мирошников А. Е., Охупкин Н. А. Генетические модели формаций полиметаллических месторождений Енисейского кряжа. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 121 - 126.
21. Брюшинкин В. Н. Информативность логических процедур. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. - М. : Наука, 1984. - с. 194 - 205.
22. Булытников В. А., Пономарев В. Н. О закономерностях морфологии и формирования рудных столбов Старо - Берикольского месторождения. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 140 - 146.
23. Буряк В. А. Метаморфизм и рудообразование. - М. : Недра, 1982. - 256с.
24. Буряк В. А. Генетическая модель метаморфогенно - гидротермального рудообразования. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 139 - 145
25. Ведерников П. Г. Рудные столбы в жилах оловорудных месторождений юга Дальнего Востока. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. с. 362 - 370.
26. Верховская Л. А. Использование концепции целостности в дескриптивном моделировании некоторых геологических объектов. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. - М. : Наука, 1984. - с. 339 - 350.
27. Воин М. И. О влиянии диагональных структур и состава вмещающих пород на образование рудных столбов в золотоносных

минерализованных зонах. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 181 - 193.

28. Войткевич Г. В., Закруткин В. В. Основы геохимии. - М. : Высшая школа, 1976. - 368с.

29. Волостных Г. Т. Эволюция пористости и объёмного веса в процессе гидротермальной аргиллизации пород. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 223 - 226.

30. Вольдман Г. Н. Основы экстракционных и ионообменных процессов гидрометаллургии. - М. : Metallurgia, 1982. - 376с.

31. Васильев М. А. Структура и динамика поверхности переходных металлов. - Киев: Наукова думка, 1988. - 248 с.

32. Габуда С. П., Лундин А. Г. Внутренняя подвижность в твёрдом теле. - Новосибирск: Наука, 1986. - 174 с.

33. Галусташвили Н. В., Дрияев Д. Г., Саралидзе З. К. Самопроизвольное выделение преимущественной системы скольжения при одноосном сжатии щелочногалоидных кристаллов. Физика твёрдого тела, т. 27, в. 8, - с. 2320 - 2324.

34. Гапонов - Грехов А. В., Рабинович Н. И. Нелинейная физика. Стохастичность и структуры. - В кн. : Физика XX века: Развитие и перспективы. - М. : Наука, 1984. - 336 с.

35. Гвишиани Д. М. К. Маркс и методологические проблемы системных исследований. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1983. - М. : Наука, с. 7 - 10.

36. Гелейшвили В. И. Роль физико - механических свойств рудомещающих горных пород в формировании структурно - морфологических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. с. 207 - 211.

37. Гибшер Н. А. Поведение флюидов при формировании одного из золоторудных месторождений Енисейского края. - В кн. : Термобарогеохимические исследования процессов минералообразования. - Новосибирск: Наука, 1988. - с. 177 - 185.

38. Гинзбург А. И. Вертикальная зональность редкометалльных месторождений, связанных с гранитоидами. В сб. : Прогнозирование скрытого оруденения на основе гидротермальных месторождений. - М. : 1972, с. 110 - 112.

39. Гладков В. Г., Филонюк В. А. О кинематике формирования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 38 - 47.

40. Голованов И. Н. Об источнике вещества меднопорфировых

месторождений (на примере Алмалыка, УзССР). - Зап. Узб. отд. Всес. минер. о - ва, 1977, в. 30, с. 145 - 149.

41. Гончаров В. И., Сидоров А. А. Образование и развитие сульфидного вкрапленного и жильного оруденения в структурах привулканической зоны. В кн. : Термобарогеохимические исследования процессов минералообразования. - Новосибирск: Наука, 1988. - с. 154 - 165.

42. Горелов А. А. Философские проблемы междисциплинарных исследований. - Вопросы философии, Т9, 1985. - с. 111 - 118.

43. Горелова В. Л., Мельников Е. Н. Основы прогнозирования систем. - М. : Высшая школа, 1986. - 287 с.

44. Горжевский Д. И., Чекваидзе В. Б. Геолого - генетические модели колчеданно - полиметаллических месторождений. В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 69 - 73.

45. Goossens Pierre J. Lithologic, geochemical and metallogenic belts in the northern Andes, and their structural relationships. "Trans. Soc. Mining Eng. AIME", 1976, 260, N1.

46. Hoffman David J. Deformational effects on iron occurrence and ore potential at Queco., Econ. Geol., 1970, 65, N 5, 583 - 587.

47. Гребенников В. И., Прокопьев Ю. И., Туров Е. А. Проблемы магнетизма переходных металлов. - Физика многочастичных систем, 1984, вып. 6, с. 22 - 36.

48. Грибковский В. П. Стримеры в полупроводниках - кооперативные самоорганизованные процессы. - Докл. АН БССР, 1985, т. XXIX, Т 10, с. 895 - 898.

49. Гринберг Б. А., Сюткина В. И. Новые методы упрочнения упорядоченных сплавов. - М. : Металлургия, 1985. - 174 с.

50. Гриненко Л. Н. Генетическая модель формирования сульфидных медно - никелевых месторождений на основании изотопно - геохимических данных. В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 119 - 128

51. Гришин В. М. О закономерностях размещения и образования рудных столбов на месторождениях золота Казахстана. В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. с. 168 - 176.

52. Гумиров Ш. В. Адаптация систем и прогнозирование параметров

месторождений. - В кн. : Системный подход в геологии (теоретические и прикладные аспекты). 2 - я Всес. конф. Тезисы докл. - М. : 1986, с. 175 - 176.

53. Гумиров В. Ш., Гумиров Ш. В. Новые методы системного анализа объекта. - В кн. : Системный подход в геологии. 3 - я Всес. конф. Тезисы докл. - М. : 1989.

54. Гумиров Ш. В. Сингенетические нарушения разрабатываемых угольных пластов в шахтах Восточного Донбасса и прогноз их распространения (на примере Гуково - Зверевского угленосного района). - Дисс. . . . канд. геол. - мин. н. - Новочеркасск, - Л. : 1981. - 251с.

55. Гумиров Ш. В. Накопление осадков над уплотняющимся торфяником в карбоне. - Геол. журнал, 1982, Т3, с. 115 - 120. 56. Гумиров Ш. В. Адаптивный анализ в геологии. - В кн. : Геология, геохимия, минералогия и металлогения юга Сибири. - Томск, 1990, с. 20 - 21.

57. Гумиров Ш. В., Шпайхер Е. Д. Адаптивный подход в анализе генезиса Сухаринского месторождения. - В кн. : Геология, геохимия, минералогия и металлогения юга Сибири. - Томск, 0, с. 138 - 139.

58. Гумиров Ш. В. и др. О факторах локализации рудных месторождений. - В кн. : Актуальные вопросы геологии Сибири (тезисы докладов). Т. 2, Томск, ТГУ, 1988. - с. 32 - 33.

59. Гумиров Ш. В. Пострудное изменение железорудных месторождений. - В кн. : Актуальные вопросы геологии Сибири (тезисы докладов). - т. 2, Томск, ТГУ, 1988. с. 125 - 126.

60. Гумиров Ш. В. Адаптация геологического объекта и прогнозирование его параметров. - В кн. : Актуальные вопросы геологии Сибири (тезисы докладов). Т. 2. - Томск, ТГУ, 1988. - с. 123 - 125.

61. Guimaraes D. Tendencia hodierna no sentido de refo - rmulacao de conceito metalogenetico., «Notas prelim. e estud. Dep. nac. prod. miner. Div. geol. e miner.», 1971, N 151, 9 p. (порт.).

62. Даниэльс Ф., Олберти Р. Физическая химия. - М.: Мир, 1978.- 645 с.

63. Дерни Д., Рамсей Дж. Нарастающие деформации, измеряемые по синтетектоническому росту кристаллов. - В кн. : Сила тяжести и тектоника. - М. : Мир, 1976. - с. 88 - 115.

64. Дистанов Э. Г. Особенности структурных факторов локализации богатых руд на колчеданно - полиметаллических месторождениях

различных формационных типов (на примерах юга Сибири.) - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 211 - 215.

65. Дистанов Э. Г., Оболенский А. А., Сотников В. И. и др. Некоторые итоги изучения эндогенных рудных формаций Сибири. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск: Наука, 1986. - с. 5 - 41.

66. Добровольская М. Г. Генетические особенности свинцово - цинковых месторождений в карбонатных породах и скарнах. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 141 - 152.

67. Дорохова Т. Г. Повышение эффективности прогнозирования и поисков железных руд на основе прямых корреляционных связей запасов с геологическими признаками. - В сб. : Вопр. организ. и экон. геологоразвед. работ и минеральн. сырья. - Алма - Ата, 1971, с. 187 - 196.

68. Дударев А. Н., Сотников В. И. Мобилизация и перераспределение рудного вещества во влажных средах в термоградиентном поле по экспериментальным и геологическим данным (на примере Сорского месторождения). - В кн. : Физ. и физ. - техн. процессы в динамич. рудообразующих системах. - Новосибирск, Наука, 1971. - с. 146 - 165.

69. Епифанов Г. И. Физика твёрдого тела. - М. : Высш. школа, 1977. - 288 с.

70. Еремин Н. И., Кривцов А. И., Шепелев В. М. О формировании руд Октябрьского медноколчеданного месторождения на Урале в связи с распределением рудообразующих элементов. - Вестн. Моск. ун - та. Геология, 1975, Т2, с. 57 - 64.

71. Ермоленко В. А. О новом способе графо - аналитического определения корреляции двух компонентов. В сб. "Материалы 4 Науч. конф. молодых геологов Белоруссии". Минск, 1971, с. 249 - 251.

72. Ермолаев К. Ф. Лениногорское рудное поле - результат проявления сложной термогидроколонны. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 252 - 257.

73. Жариков В. А., Алехин Ю. В., Рысикова В. Т. Некоторые физико - химические закономерности фильтрации растворов через горные породы. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 7 - 25.

74. Желобов П. П. Роль гипербазитов в локализации красичных жил на Березовском рудном поле. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 199 - 204.

75. Зарянов Ю. П. Генезис колчеданных залежей в метатерригенных толщах Кубы (на примере месторождений Карлота). - Тр. ЦНИГРИ, 1977, в. 126, с. 108 - 114.

76. Звягин В. Г., Фаворов В. А. Критерии оценки рудных столбов на Дарасунском месторождении. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 87 - 103

77. Злобин В. А., Цимбалист В. Г. Эффект прокаливания и проблема формирования золотого оруденения в черносланцевых толщах. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука. 1983. - с. 162 - 169.

78. Злобин В. А. О некоторых причинах возникновения рудных столбов в гидротермальноизмененных породах. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 29 - 33.

79. Зобов Н. Е., Курцерайте Ш. Д. Объёмное моделирование внутреннего строения и структуры скарново - магнетитовых месторождений центральной части Алтае - Саянской области с целью прогноза. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 187 - 195.

80. Золотарев В. Г., Гриненко Л. Н., Сухарев Н. Г. Генезис колчеданно - полиметаллических руд Шубинского месторождения (Рудный Алтай) - Вестник Мос. ун - та. Геология, 1976, Т6, с. 41 - 50.

81. Золотухин В. В. Геолого - генетическая модель сульфидного медно - никелевого оруденения. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 55 - 63.

82. Зубков Ю. Д., Денисенко Н. Л. О некоторых закономерных соотношениях бедных и богатых руд на месторождении Темир - Тау. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 281 - 286.

83. Иванкив Л. И., Пенцак А. Н., Тхир С. Г. Эмиссионные явления на начальных стадиях окисления тонких пленок магния. - Изв. АН СССР, сер. физич., т. 49, Т9. - с. 1850 - 1854.

84. Иванов О. П., Ефременко Э. А. Специфические особенности касситерит - силикатно - сульфидной формации и проблема выбора непротиворечивого варианта ее геолого - генетической модели. - В кн. :

Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 24 - 31.

85. Ильенок С. С. Генезис бонанц Знаменитинского золоторудного месторождения. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 153 - 156.

86. Кавардин Г. И. Геолого - генетическая типизация сульфидных медно - никелевых месторождений. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск : Наука, 1983. - с. 63 - 70.

87. Каган М. С. Система и структура. - В кн. : Системное исследование. Методологические проблемы. Ежегодник. - М. : Наука, 1983. - с. 86 - 106.

88. Казанский В. И. Эволюция земной коры и эндогенное рудообразование. - В кн. : Глубинное строение и условия формирования эндогенных рудных районов, полей и месторождений. - М. : Наука, 1983. - с. 5 - 24.

89. Казанский В. И. Условия возникновения анизотропных горных пород в разломах кристаллического фундамента. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. с. 59 - 74.

90. Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. - М. : Metallургия, 1987. 214 с.

91. Калугин А. С. и др. Железородные месторождения Сибири. - Новосибирск : Наука, 1981. - 234 с.

92. Калугин И. А. Железородные осадки как источник вещества при формировании метаморфогенных месторождений. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск : Наука, 1987. - с. 173 - 186.

93. Калугин И. А. Петрохимические критерии подвижности железа при эндогенном рудообразовании. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск : Наука, 1983. - с. 105 - 111.

94. Каменцева З. П. и др. Явление фрагментации в проблеме пластичности и разрушения металлов. - В кн. : Проблемы теории трещин и механика разрушения. - Л. : Изд. ЛГУ, 1986. - с. 52 - 65.

95. Канарчук В. Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. - Киев : Наукова думка, 1986. - 246 с.

96. Канторович М. Е., Плиско В. Е. Системный подход в методологии математики. - В кн. : Системные исследования. Методологические

проблемы. Ежегодник. - М. : Наука, 1983. с. 27 - 41.

97. Карамян К. А., Саркисян С. П. Роль физико - механических свойств горных пород в размещении медно - молибденового оруденения Дастакерского месторождения. - В кн. : Роль физикомеханических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 164 - 171.

98. Карери Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи: Пер. с итал. - М. : Мир, 1985. - 232 с.

99. Касти Дж. Большие системы. Связность. сложность и катастрофы: Пер. с англ. - М. : Мир, 1982. - 216 с.

100. Кемпбел Дж. Современная общая химия. Т.3.-М.:Мир, 1975.-447 с.

101. Кернс - Смит А. Дж. Первые организмы. - В мире науки, Т8, 1985, с. 46 - 55.

102. Климонтович Ю. Л. Энтропия и производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях. - Письма в ЖТФ, т. 10, в. 2. - с. 80 - 82.

103. Климонтович Ю. Л. Уменьшение энтропии в процессе самоорганизации. {S} - теорема (на примере перехода через порог генерации). - Физ. тв. тела, т. 27, в. 11, 1985. с. 1412 - 1414.

104. Клер Дж. Наука о системах: новое измерение науки. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1983. - М. : Наука, с. 61 - 85.

105. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. - М. : Металлургия, 1990. - 216 с.

106. Конников Э. Г., Трунев М. Ф. Факторы локализации медно - сульфидного оруденения в Чинейском габбро - норитовом плутоне. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 71 - 77.

107. Константинов М. Н. Рудоконтролирующие факторы золото - серебряных месторождений. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 151 - 156.

108. Копытин В. И. Условия образования рудных залежей Пламенного ртутного месторождения. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 312 - 320.

109. Королев В. А. Зависимость структур рудных полей и месторождений от сочетания вмещающих толщ. - В кн. : Роль физико -

механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 139 - 145.

110. Косалс Я. А., Колонин Г. Р. Генетические основы модели редкометалльного рудообразования, связанного с многофазными гранитоидальными интрузиями. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 39 - 48.

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

112. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. - М. : Изд. МГУ, 1985. - 336 с.

113. Криштал М. А., Волков А. И. Многокомпонентная диффузия в металлах. - М. : Металлургия, 1985. - 176 с.

114. Кузнецов В. А. и др. Геолого - генетические модели рудных формаций. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 5 - 14.

115. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. - М. : Наука, 1986. - 288 с.

116. Кулагашев А. И. Особенности распределения богатых руд в полиметаллических рудных полях Восточного Забайкалья. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 235 - 239.

117. Лаверов Н. П., Барсуков В. Л. Влияние физико - механических свойств пород на рудообразование в депрессиях вулканического происхождения. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 86 - 95.

118. Лазько Е. М. и др. Термобарогеохимия и прогнозирование постмагматического оруденения. - В кн. : Термобарохимические исследования процессов минералообразования. - Новосибирск: Наука, 1988. - с. 136 - 149.

119. Лапухов А. С. О влиянии внутреннего развития рудообразующих динамических систем на распределение рудных столбов в полиметаллических месторождениях Салаирского кряжа. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 243 - 251.

120. Лебедев В. И. Кобальтовые рудные формации юга Сибири. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск: Наука, 1986. - с. 76 - 84.

121. Лейе Ю. А., Тихоненков Э. П. Структурные условия локализации рудных тел и рудных столбов на некоторых месторождениях линейно -

трещинного типа. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 270 - 274.

122. Леоненко Л. Л., Сараева И. Н. О применении языка тернарного описания к моделированию значений системных параметров и установлению общесистемных закономерностей. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1984. - М. : Наука, с. 181 - 193.

123. Ли В. Г., Митряева Н. М., Паталаха Г. Б. Обобщенная модель стратиформных свинцово - цинковых месторождений Казахстана. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций, т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 95 - 102.

124. Лисовский А. Ф. Миграция расплавов металлов в спеченных композиционных телах. - Киев: Наукова думка, 1984, 256 с.

125. Littleford D. H., Maycock A. R. Kalengwa copper mine is Zambia's mighty midget. «World Mining», 1972, 25, N6, 32 - 37 .

126. Лозовский В. И., Максимов С. С., Никулин В. Н. Методика геометризации и анализа рудных столбов в месторождениях золота Восточного Забайкалья. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 124 - 130.

127. Любов Б. Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах. - М. : Наука, 1981. - 295 с.

128. Мазуров В. П. Формационные типы и генетические модели эндогенных месторождений. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 99 - 105.

129. Мазуров М. П. Структура рудообразующих систем скарново - магнетитовых месторождений. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск: Наука, 1986. - с. 129 - 135.

130. Макеев Б. В, Павловский А. Б., Покалов В. Т. и др. Структура рудных полей и месторождений вольфрама, молибдена и олова. - М. : Недра, 1983. - 234 с.

131. Малиновский Е. П., Онтьев Д. О. Джидинский рудный район. - В кн. : Глубинное строение и условия формирования эндогенных рудных районов, полей и месторождений. - М. : Наука, 1983. - с. 182 - 207.

132. Малыгин А. А. Магматические и другие факторы контроля рудных масс в Лениногорском рудном поле. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 258 - 264.

133. Маннинг Дж. Кинетика диффузии атомов в кристаллах. - М. : Мир, 1971. - 275 с.
134. Марадудин А. Дефекты и колебательный спектр кристаллов. - М. : Мир, 1969. - 431 с.
135. Маракушев А. А., Безмен Н. И. Термодинамика сульфидов и окислов в связи с проблемами рудообразования. - М. : Наука, 1971. - 229 с.
136. Меликян Л. С. Физико - механические свойства рудовмещающих пород и некоторые вопросы локализации гидротермального оруденения на Зодском золоторудном месторождении. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 187 - 195.
137. Миловский А. В. Минералогия и петрография. - М. : Недра, 1973, - 368 с.
138. Миронов К. В. Справочник геолога - угольщика. - М. : Недра, 1982. - 311 с.
139. Михалева Л. А. Латеральная зональность базитов самостоятельных малых интрузий и связанного с ними оруденения в активизированных структурах юга Сибири. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск: Наука, 1986. - с. 185 - 191.
140. Мияки Я. Основы геохимии. - Л. : Недра, 1969. - 324 с
141. Моисеенко В. Г., Фатьянов И. И. Рудные столбы в некоторых месторождениях золота Приамурья. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 61 - 70.
142. Мюкке Г., Меллер П. Не такие уж редкие эти "редкие земли". - В мире науки, 1988, Т3. с. 50 - 56.
143. Налдретт А. Дж. Сульфидные никелевые месторождения. - В кн. : Генезис рудных месторождений. Т. 2. - М. : Мир, 1984
144. Нарсеев В. А., Левин Г. Б., Гражданцев Н. Г. Критерии выделения рудных столбов месторождений золота Казахстана. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 177 - 181.
145. Наумов В. Б., Иванова Г. Ф., Шапенко В. В. Генетические аспекты формирования редкометального оруденения. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 48 - 56.
146. Наумов Г. Б. и др. Геохимическая роль и место рудоподготовительных процессов в моделях эпигенетического рудообразования. - В кн. :

Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 34 - 42.

147. Невский В. А. Влияние геологических условий деформации на изменение физико - механических свойств горных пород. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 52 - 59.

148. Некрасов И. Я. Физико - химические условия образования оловянной минерализации двух геохимически различных типов. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 56 - 62.

149. Некрасов И. Я. Физико - химические параметры и модели минералообразования месторождений серебра. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 34 - 43.

150. Некрасов Е. М. Систематика и особенности образования рудных столбов свинцово - цинковых месторождений трещинного типа. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 215 - 225.

151. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. - Л. : Машиностроение, Ленингр. отд - ние, 1985. - 199 с.

152. Новик И. Б. Системный стиль мышления (особенности познания и управления в сложных системах). - М. : Знание, 1986. - 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Философия", Т1).

153. Оболенский А. А., Оболенская Р. В., Борисенко А. С. Генетические ряды рудных формаций эпитермальных месторождений областей мезозойского дейтероорогенеза и их прогнозно - металлогеническое значение. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск: Наука, 1986. - с. 47 - 58.

154. Овчинников Л. Н. Геохимические аспекты единой генетической модели рудного месторождения. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 26 - 34.

155. Овчинников Л. Н., Челищев Н. Ф., Наджарян В. Н. О физико - химических факторах пространственного разделения металлов в динамических условиях. - В кн. : Кинетика и динамика геохимических процессов. - М. : 1971, с. 144 - 150.

156. Овчинников Л. Н. Геохимические аспекты единой генетической модели рудного месторождения. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 26 - 34.

157. Овчинников Л. Н. Образование рудных месторождений. - М. : Недра, 1988. - 255 с.
158. Онихимский В. В., Гаврилов В. И. Важные факторы построения модели эндогенного рудообразования. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 42 - 46.
159. Орир Дж. Физика. - М. : Мир, 1981. - 336 с. - Т. 1.
160. Осипов А. И. Самоорганизация и хаос. (Очерк неравновесной термодинамики). - М. : Знание, 1986. - 64 с. - (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Физика", Т7).
161. Основные типы рудных формаций: Терминологический справочник/ Под ред. Ю. А. Косыгина, Е. А. Кулиша. - М. : Наука, 1984. - 316 с.
162. Павлова И. Г. Геолого - генетические модели молибдено - медных порфириновых месторождений. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 127 - 135.
163. Парк Ч. Ф., Мак - Дормид Р. А. Рудные месторождения. - М. : Мир, 1966. - 544 с.
164. Pelissonnier H. Les dimensions des gisements de cuivre du monde. Essai de metallogenie quantitative. «Mem. Bur. rech. geol. et minieres». 1972, N57, 405 p., ill., cart. (франц.).
165. Пизнюр А. В. Модель эволюции рудоносных флюидов - основа локальной оценки и прогноза оруденения. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 148 - 153.
166. Покровская И. В., Ковриго О. А. Модель формирования многоэтажного вулканогенного полиметаллического месторождения Рудного Алтая. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 112 - 121.
167. Попов В. С. Геология и генезис медно - и молибден - порфириновых месторождений. - М. : Наука, 1977. - 201 с.
168. Поспелов Г. Л. Статические и динамические факторы локализации рудных столбов и месторождений. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. с. 12 - 22.

169. Потапов А. А. О проявлении рудных столбов на некоторых месторождениях Змеиногорского рудного района. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 264 - 270.

170. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. - М. : Прогресс, 1986. - 432 с.

171. Прокин В. А., Ярош П. Я., Рудницкий В. Ф. Модель формирования медноколчеданных месторождений Уральского типа. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М.: Наука, 1983. - с. 102 - 108.

172. Пуарье Ж. - П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. - М. : Мир, 1988. - 287 с.

173. Пэк А. А., Требухин В. С., Гераков А. Н. и др. Роль фильтрационных свойств пород Гайского рудного поля в локализации медноколчеданного оруденения. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 102 - 118.

174. Рабинович К. Р., Акчурина В. Н., Булытников В. А. Рудные столбы и зональность золоторудных месторождений. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 75 - 81.

175. Рапопорт А. Различные подходы к построению общей теории систем: элементаристский и организмический. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1983. - М. : Наука, с. 42 - 60.

176. Рехарский В. И. Изменение физико - механических свойств пород при формировании метасоматитов и оруденения Каджаранского месторождения. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М.: Наука, 1973. - с. 160 - 164.

177. Розанов Ю. А. Роль физико - механических свойств горных пород в процессах петро - и рудогенеза. - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 25 - 35.

178. Ронов А. Б. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. - М. : Наука, 1990. - 182 с

179. Росляков Н. А., Звягин В. Г. Геохимические поисковые критерии золоторудных столбов в кварц - сульфидных зонах. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 111 - 119.

180. Рослякова Н. В. Зависимость концентрации золота в рудных столбах Старо - Берикольского месторождения от условий их образования. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 146 - 153.
181. Рундквист Д. В. Общие принципы построения геолого - генетических моделей рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск: Наука, 1983. - с. 14 - 26.
182. Ручкин и др. Холоднинское месторождение - представитель докембрийских колчеданно - полиметаллических месторож - дений. - Геолог. рудн. местор., 1975, Т5, с. 3 - 17.
183. Самарский А. А. и др. Нелинейные явления и вычислительный эксперимент. - Вестн. АН СССР, Т9, 1985. - с. 64 - 77.
184. Санин Б. П., Торосян Р. А., Глазунова А. Д. и др. Основные закономерности локализации полиметаллического оруденения Приаргунья. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 226 - 231.
185. Сауков А. А. Геохимия. - М. : Госгеолиздат, 1950. - 347 с.
186. Сахарова М. С. Минералого - геохимические особенности золоторудных столбов на Дарасунском месторождении. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 103 - 111.
187. Сахарова М. С., Кривицкая Н. Н., Роховская С. К. Накопление и перегруппировка вещества в процессе образования золото - сульфидного оруденения в терригено - осадочных толщах. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 227 - 236.
188. Свойства элементов: Справ. изд. - М. : Металлургия, 1985. - 672с.
189. Семинский Ж. В., Филонюк В. А., Черных А. Л. Структуры рудных месторождений Сибири. - М. : Недра, 1987. - 183 с.
190. Сидоров А. А., Найбородин В. И., Еремин Р. А. и др. К вопросу о формировании бонанц в месторождениях золото - серебряной формации Охотско - Чукотского вулканогенного пояса. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 70 - 75.
191. Синяков В. И. Основы теории рудогенеза. - Л. : Недра, 1987. - 192с.
192. Слейбо У., Персонс Т. Общая химия. - М. : Мир, 1979. - 550 с.

193. Смирнов В. И. Согласные и секущие границы рудных тел стратиформных рудных месторождений. - В сб. : Минер. месторождения. - М. : Наука, 1979. - с. 5 - 19.
194. Смирнов В. И. Энергетические основы постмагматического рудообразования. - Геол. рудн. месторожд., 1981, Т1, с. 5 - 17.
195. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. - М. : Недра, 1976. - 688 с.
196. Сотников В. И., Калинин А. С., Берзина А. П. Генетическая модель медно - молибденовой формации. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. - Новосибирск : Наука, 1983. - с. 112 - 127.
197. Сотников В. И. Некоторые проблемы формирования аномальных рудных концентраций на штокверковых месторождениях субвулканического типа. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 370 - 378.
198. Спроул Р. Современная физика. Квантовая физика атомов, твёрдого тела и ядер. - М. : Наука, 1974. - 591 с.
199. Spooner E. T. C., Bray C. J. Hydrothermal fluids of seawater salinity in ophiolitic sulphide ore deposits in Cyprus. - Nature, 1977, 266, N5605, p. 808 - 812.
200. Страйер Л. Биохимия: В 3 - х томах. Т. 3. Пер. с англ. - М. : Мир, 1985. - 400 с.
201. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия. - М. : Высшая школа, 1973. - 480 с.
202. Sullivan C. J. Relative discovery potential of the principal economic metals. «Can. Mining and Met. Bull.», 1970, 63, N699, 777 - 783 (англ.); Repr. - «CIM Trans.», 1970, 73, 163 - 173.
203. Сыромятников А. Л. Структурная многоярусность рудных столбов на Западно - Палянском ртутном месторождении. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 307 - 312.
204. Тананаев Г. А., Голованов И. Н. Алмалыкский рудный район. - В кн. : Глубинное строение и условия формирования эндогенных рудных районов, полей и месторождений. - М. : Наука, 1983. - с. 130 - 151.
205. Тварчрелидзе А. Г. Генетическая модель стратиформного колчеданообразования в вулканогенных и осадочных формациях. - В кн. :

Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 80 - 86.

206. Тверитнев Ю. И. Структурные условия локализации руд скарнового типа на примере месторождений Горного Алтая. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. с. 156 - 160.

207. Thiergartner Hannes. Zur systemgerechten mathematischen Fassung und rechetechischen Behandlung geologischer Stoffbeziehungen. «Ber. Dtsch. Ges. geol. Wiss.», 1971, A 16, N3 - 5, 351 - 363 (нем.).

208. Тимофеевский Д. А. О структурно - морфологических типах рудных столбов в золоторудных месторождениях и соотношении их с зональностью. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 50 - 54.

209. Титов В. Н. Роль физико - механических свойств горных пород в размещении апатитового оруденения Хибинского массива - В кн. : Роль физико - механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. - М. : Наука, 1973. - с. 151 - 160.

210. Томпсон Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике: Пер. с англ. - М. : Мир, 1985. - 254 с.

211. Трошин Ю. П., Гребенщикова В. И., Бойко С. М. и др. Модель формирования геохимического поля вокруг редкометалльных плюмазитовых гранитов. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск: Наука, 1987. - с. 209 - 217.

212. Тугаринов А. И. Общая геохимия. - М. : Атомиздат, 1973. - 288 с.

213. Тычинский А. А. Условия образования руд формации стратиформных сингенетично - эпигенетических свинцово - цинковых месторождений Прибайкалья. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск: Наука, 1986. с. 150 - 156.

214. Уемов А. И. Основы формального аппарата параметрической общей теории систем. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1984. - М. : Наука, с. 152 - 180.

215. Ушаков В. Я. и др. О роли неоднородности полимеров в развитии разрушения под действием электрического поля. - Физ. тв. тела, т. 27, в. 8, 1985. - с. 2361 - 2366.

216. Файзиев А. Р., Искандеров Ф. Ш. Использование декриптофонического метода при поисково - разведочных работах на серебро -

полиметаллическое оруденение. - В кн. : Термобарогеохимические исследования процессов минералообразования. - Новосибирск: Наука, 1988. с. 185 - 194.

217. Ферхуген Дж. и др. Земля. Введение в общую геологию. - М. : Мир, 1974. - 845 с.

218. Философские проблемы теории адаптации. Под ред. Г. И. Царегодцева. - М. : Мысль, 1975. - 277 с.

219. Флеров Б. Л. Рудные столбы на оловянных месторождениях северо - востока СССР. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 346 - 355.

220. Флеров Б. Л. Модель формирования оловорудных формаций. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. с. 17 - 24.

221. Фортескью Дж. Геохимия окружающей среды. - М. : Прогресс, 1985. - 360 с.

222. Франклин Дж. Н., Лайдон Дж. У., Сангстер Д. Ф. Колчеданные месторождения вулканической ассоциации. - В кн. : Генезис рудных месторождений. Т. 2. - М. : Мир, 1984. - 390 с.

223. Хазагаров А. М. Особенности образования и размещения рудных столбов на золоторудных месторождениях Восточного Саяна и Кузнецкого Алатау. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 131 - 136.

224. Харрисон У. Электронная структура и свойства твердых тел: Физика химической связи: Пер. с англ. - М. : Мир, 1983. - Т. 1. - 381 с.

225. Хомич В. Г. Об условиях образования рудных столбов в жилах Балецкого рудного поля. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 81 - 89.

226. Хорн Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы). - М. : Мир, 1972. - 399 с.

227. Хребтов В. М. Роль дизъюнктивных нарушений в локализации оруденения Певекского оловорудного узла. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 355 - 362.

228. Хрусталев Б. П., Балаев А. Д. Обменные взаимодействия в ферромагнитных пленках Fe - SiO с кластерной структурой. - Физ. тв. тела, т. 27, в. 11, 1985. с. 3222 - 3229.

229. Чевычелов В. Ю. Возможный механизм формирования рудоносного (свинец - и цинксодержащего) магматогенного флюида. - В кн. : Построение моделей рудообразующих систем. - Новосибирск : Наука, 1987. - с. 71 - 84.
230. Чекалин В. М. Геолого - генетическая модель полиметаллических месторождений Таловского рудного района. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 87 - 95.
231. Чхартишвили Г. С., Шахин В. А. Машинно - ориентированный подход к исследованию динамических систем. - Электронное моделирование. 1985, т. 7, Т5. - с. 36 - 39.
232. Шарапов В. Н., Черепанов А. Н. Физическая модель генетической связи с интрузивными массивами. - В кн. : Эндогенные рудные формации Сибири и проблемы рудообразования. - Новосибирск : Наука, 1986. - с. 110 - 118.
233. Шафрановский И. И. Симметрия в природе. - Л. : Недра, 1968. - 184с.
234. Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. - М. : Наука, 1984. - 384 с.
235. Шрейдер Ю. А. Особенности описания сложных систем. - В кн. : Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. - М. : Наука, 1983. - с. 107 - 124.
236. Щеглов А. Д. Основные проблемы современной металлогении (вопросы теории и практики). - Л. : Недра, 1987. 231 с.
237. Щерба Г. Н. и др. Геолого - генетические модели главных типов эндогенных редкометалльных месторождений Казахстана. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. - с. 3 - 14.
238. Щербаков Ю. Г., Рослякова Н. В. Золоторудные столбы в скарнах Синюхинского месторождения. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск : Наука, 1972. - с. 160 - 165.
239. Щербаков Ю. Г., Рослякова Н. В. Генетическая модель гидротермального рудообразования на примере золоторудных месторождений. - В кн. : Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. - М. : Наука, 1983. с. 132 - 137.
240. Эбелинг В., Крефт В., Кремн Д. Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твёрдом теле. - М. : Мир, 1979. - 262с.

241. Яковлев Г. Ф. и др. Первичные и преобразованные вулканогенные колчеданно - полиметаллические месторождения Рудного Алтая. - В кн. : Проблемы генезиса колчеданно - полиметаллич. месторождений Рудного Алтая. - Алма - Ата: Наука, 1977. - с. 49 - 61.

242. Яковлев Г. Ф., Хисамутдинов М. Г., Демин Ю. А. Полигенность и полихронность колчеданно - полиметаллических месторождений Рудного Алтая. - Геол. рудн. месторожд., 1976, Т2, с. 66 - 77.

243. Янишевский Е. В. О факторах формирования рудных столбов. - В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 231 - 235.

244. Яновский В. Н. Рудные столбы в боковой структуре Качканарского золото - мышьякового месторождения. В кн. : Проблемы образования рудных столбов. - Новосибирск: Наука, 1972. - с. 193 - 198.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
О структуре работы и благодарности.....	3
Вступительный краткий обзор.....	8
Некоторые термины и сокращения.....	19
Часть 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДАПТИВНОГО АНАЛИЗА	
Глава 1. Анализ объекта в фазовом пространстве	
1.1. Фазовое пространство системы.....	21
1.2. Фазовый портрет адаптации объекта.....	22
1.3. Фазовый портрет развития объекта.....	24
1.4. Основные выводы по главе "Анализ объекта...".....	25
Глава 2. Основы теории адаптации неживой природы	
2.1. Целостно реагирующая часть объекта как комплекс.....	27
2.2. Иерархия комплексов.....	28
2.3. Размер комплекса.....	33
2.4. Соответствие размера и качества комплекса.....	35
2.5. Адаптация как псевдоцелое развитие.....	38
2.6. Способы адаптации комплексов.....	41
2.7. Изменение формы и структуры комплекса в ходе его адаптации.....	46
2.8. Влияние адаптации комплекса на энтропию.....	48
2.9. Основные выводы по главе "Основы теории ..".....	58
Глава 3. Общие сведения о методике адаптивного анализа	
3.1. Особенности адаптивного анализа.....	61
3.2. Ход выполнения адаптивного анализа.....	63
3.2.1. Выделение объекта исследования.....	63
3.2.2. Оценка вещественного, энергетического и информационного потока сквозь комплекс.....	66
3.2.3. Формализация параметров среды и комплекса.....	69
3.2.4. Анализ адаптации объекта по фазовым диаграммам.....	71
3.2.5. Интерпретация результатов анализа.....	74
3.3. Основные выводы по главе "Общие сведения о методике ..".....	85
Часть 2. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Глава 4. Общие сведения об адаптивном анализе угольных месторождений	
4.1. Цель исследований.....	87

4.2.Использованная информация.....	87
4.3.Методика анализа.....	89
4.4.Методика построения фазовых диаграмм.....	92
4.5.Основные выводы по главе «Общие сведения...».....	94
Глава 5.Адаптивный анализ осадочных отложений	
5.1. Общие закономерности адаптации фациальной обстановки	95
5.2.Адаптация фациальной обстановки регрессивного типа.....	97
5.3.Адаптация фациальной обстановки трансгрессивного Типа.....	99
5.4.Адаптация фациальной обстановки трансгрессивно-регрессивного типа.....	99
5.5.Основные выводы по главе «Адаптивный анализ ...».....	102
Глава 6. Адаптивный анализ угленосной толщи	
6.1.Адаптация торфяной залежи средней мощности.....	104
6.2.Структурная адаптация торфяной залежи.....	109
6.3.Адаптация палеоландшафта эпохи захоронения торфяной залежи.....	111
6.4.Структурная адаптация палеоландшафта эпохи захоронения торфяной залежи.....	112
6.5.Основные выводы по главе «Адаптивный анализ Угленосной...».....	113
Глава 7.Адаптивный анализ угольных пластов	
7.1.Изменение торфяника под воздействием водной среды.....	115
7.2. Адаптация торфяной залежи пласта h_{10}^B	116
7.3.Адаптация торфяной залежи пласта i_3^H	119
7.4.Адаптация торфяной залежи пласта i_3^B	120
7.5.Адаптация торфяной залежи пласта k_2^H	121
7.6.Адаптация торфяной залежи пласта k_4^2	122
7.7.Адаптация торфяной залежи пласта k_5^{1B}	123
7.8. Адаптация торфяной залежи пласта l_2	124
7.9.Самоорганизация осадконакопления.....	124
7.10.Основные выводы по главе "Адаптивный анализ угольных ...".....	128

Глава 8.Взаимосвязь между коэффициентом угленосности и площадью угольного бассейна	
8.1.Методика построения диаграмм коэффициент торфосности - площадь бассейна седиментации.....	130
8.2.Взаимосвязь между площадью бассейна и торфоносностью.....	131
8.8.Роль эволюции растений в расширении площади углеобразования от карбона к неогену.	133
8.4.Развитие бассейна углеобразования с расширением и со стягиванием биоценозов-торфообразователей.	135
8.6..Основные выводы по главе "Взаимосвязь ...".	137
Часть 3. АДАПТИВНЫЙ АНАЛИЗ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Глава 9.Общие сведения и оценка воздействия среды	
9.1.Цель исследований и использованная информация	138
9.2.Изученность проблемы взаимосвязи состава руды и запасов руды и металла.	139
9.3.Месторождение как комплекс.....	142
9.4.Оценка теплового воздействия внешней среды.....	144
9.5.Основные выводы по главе "Общие сведения и...".	147
Глава 10.Изменение железорудного месторождения за счёт пострудного магматического воздействия	
10.1.Влияние теплового потока на масштаб железорудения.....	149
10.2.Влияние теплового потока на содержание железа в руде.	151
10.3.Влияние теплового потока на содержание в руде серы, фосфора, марганца и титана.....	154
10.4.Влияние теплового потока на содержание петрогенных элементов в руде.....	159
10.5.Изменение месторождения под воздействием магматических инъекций.....	159
10.6.Основные выводы по главе "Изменение ...".	164
Глава 11.Влияние величины атома рудогенных элементов на адаптацию месторождения	
11.1.Роль атомных параметров элементов в формировании качества руды.....	170
11.2.Сопряженное изменение запасов и качества руд	

11.3.Решающая роль атомного объёма элемента в формировании состава и запасов руды.	187
11.4.Фракционирование элементов в зоне рудогенеза по величине их атома.	190
11.5.Прогнозная оценка запасов руды по ее химическому составу.	205
11.6. Основные выводы по главе "Влияние ..."	211
Глава 12.Влияние магматизма и проницаемости пород фундамента на адаптацию золоторудных месторождений	
12.1.Используемая информация и ее графическое представление.	213
12.2.Влияние магматизма на качество и запасы руды	214
12.3.Влияние проницаемости пород фундамента на величину золоторудного месторождения.	219
12.4.Влияние состава боковых пород на состав руды.	223
12.5.Прогнозирование масштаба оруденения по составу руды.	227
12.6.Некоторые особенности адаптации золоторудных месторождений.	234
12.7.Основные выводы по главе "Влияние магматизма и проницаемости,..."	236
Часть 4. ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОФАЗНОЙ ДИФфуЗИИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИХ АДАПТАЦИЮ В МЕСТОРОЖДЕНИИ И В ЗЕМНОЙ КОРЕ	
Глава 13.Кусочная функциональная зависимость твердофазной диффузии от атомных параметров	
13.1.Твердофазная диффузия в геологических процессах: состояние вопроса.	238
13.2.Изученность проблемы твердофазной диффузии в кристаллах.	240
13.3.Твердофазная диффузия как кусочная функция атомных параметров,	244
13.4.Влияние на твердофазную диффузию температуры Дебая, электроотрицательности, массы атома и плотности электронной плазмы.	253
13.5.Влияние эффекта размера атома примеси на твердофазную диффузию	255
13.6.Влияние ангармоничности колебания атомов на твердофазную диффузию.	260

13.7. Некоторые особенности твердофазной диффузии в металлах.	263
13.8. Механизм твердофазной диффузии в зависимости от электронной плазмы в кристалле.	267
13.9. Основные выводы по главе "Кусочная ..."	268
Глава 14. Твердофазная диффузия химических элементов в процессе дифференциации вещества земной коры	
14.1. Изученность проблемы дифференциации химических элементов в земной коре.	270
14.2. Адаптация породобразующих элементов к гравитационному полю в земной коре.	279
14.3. Адаптация примесных элементов к давлению, температуре и роль твердофазной диффузии.	287
14.4. Адаптивность химических элементов.	292
14.5. Интенсивность восходящего потока элементов в зависимости от их атомных параметров.	300
14.6. Закономерности рудогенеза во времени и по вертикали.	312
14.6.1. Глобальная последовательность рудообразования во времени.	313
14.6.2. Типичная вертикальная зональность рудных месторождений.	315
14.6.3. Последовательность формирования прожилков на медно-молибден-порфировых месторождениях.	318
14.6.4. Вертикальная зональность на месторождениях различных типов.	322
14.7. Роль внешней среды в миграции элементов и в их локализации в месторождениях.	326
14.8. Основные выводы по главе "Закономерности ..."	331
Глава 15. Реконструкция условий рудогенеза методом адаптивного анализа	
15.1. Соответствие атомных параметров минеральных элементов факторам внешней среды.	334
15.2. Решающая роль адаптивности элементов в минерогенезе урана.	335
15.3. Реконструкция динамики внешней среды на ртутном месторождении по составу минералов.	338

15.4.Формирование железорудного месторождения как комплекса под влиянием факторов внешней среды.....	342
15.5.Генетическая реконструкция рудообразования	350
15.6.Основные выводы по главе "Реконструкция.".....	352
Глава 16.Методические рекомендации по адаптивному анализу рудных месторождений	
16.1.Требования к анализируемой информации	354
16.2.Определение типа развития месторождения	355
16.3.Анализ влияния магматизма на развитие месторождения	358
16.4.Анализ влияния состава боковых пород на формирование месторождения.....	365
16.5.Анализ взаимосвязи между содержанием различных рудогенных элементов.	366
16.6. Прогнозная оценка запасов руды на изучаемом месторождении.....	367
16.7.Изучение направления миграции рудогенных элементов.	368
16.8.Создание геолого-генетической модели месторождения.	371
Заключение.....	373
Список литературы	383

ИПК, Зак. 12.08.2017г. Тираж 500

Замеченные опечатки:

к стр. 28 - пропущена табл. 2.1

Таблица 2.1

Соотношения терминов, отражающих ассоциации физических тел

Термин для ассоциации или ее отображения	Элементы ассоциации или отображения	Причина объединения элементов	Размер ассоциации или ее отображения	Определение термина	Соотношения терминов
Объект	Физические тела (ФТ)	Сходство признаков	Меняется при смене признаков	ФТ локализованы в фазовом пространстве объекта	Соответствует самому себе, т.е. объекту
<u>Комплекс</u>	Физические тела (ФТ)	Целостная реакция	Меняется при изменении воздействия среды	Целостно реагирующая часть объекта	Часть объекта
Система	Абстрагированные отражения ФТ	Связное изменение элементов	Меняется от целей исследования или от изученности проблемы	Абстрагированное динамичное функциональное отображение ФТ	Соответствует одной или нескольким функциям объекта
Модель	Искусственные элементы	Участие в одной функции объекта	Меняется от задач исследования	Управляемое отображение функции объекта	Соответствует функции объекта



к стр. 45 - пропущена табл. 2.2.

Таблица 2.2

Условия сохранения элемента (объекта)

№ п/п	Способ сохранения объекта	Механизм сохранения объекта
1	Достаточная прочность связей между элементами объекта	При изменениях внешнего воздействия прочная связь обеспечивает сохранность структуры объекта
2	Достаточно быстрая реакция комплекса	Позволяет создавать новые прочные связи взамен разрушенных старых связей
3	Перемещение объекта под воздействием внешнего поля	Уменьшает градиент внешнего поля вблизи объекта
4	Неоднородность внешней среды	Объект случайно может переместиться в благоприятную среду
5	Изменчивость внешней среды во времени	При быстрой смене неблагоприятных условий благоприятными, объект не успевает разрушиться
6	Сосуществование старой и новой структуры объекта (адаптация по шаблону)	Объект быстро адаптируется при возврате старых условий, если использует старую структуру или её фрагменты
7	Достаточная концентрация элементов в объекте	Замена разрушенных элементов свободными элементами
8	Устойчивость состояния внутренней среды объекта	Элементы объекта находятся в стабильной среде
9	Вынужденная специализация элементов на окраине объекта	Специализированные элементы объекта предохраняют другие его элементы, снижая вредное влияние среды

к стр. 125 - пропущен рис. 7.2

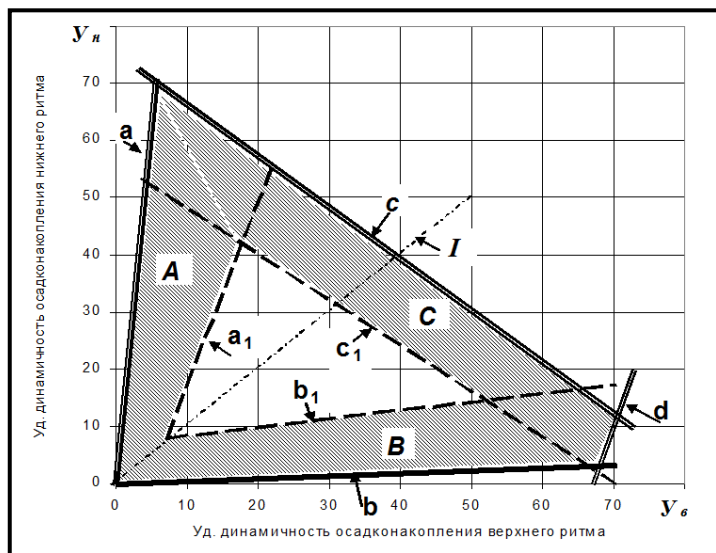


Рис.7.2. Усреднённая типичная диаграмма фазового портрета адаптации обстановки осадконакопления. Обозначения: кластер **A** - наследование водной динамики и морфоструктуры последующего ритма ландшафтов пары от предшествующего ритма; **B** - слабая унаследуемость водной динамики в новой морфоструктуре последующего ритма ландшафтов пары из предшествующего ритма; **C** - изменение устойчивости морфоструктуры предшествующего ритма ландшафтов пары, влекущее за собой изменение ёмкости бассейна седиментации по терригенным отложениям. Показаны граничные линии - по минимальным и максимальным значениям удельной динамичности осадконакопления.