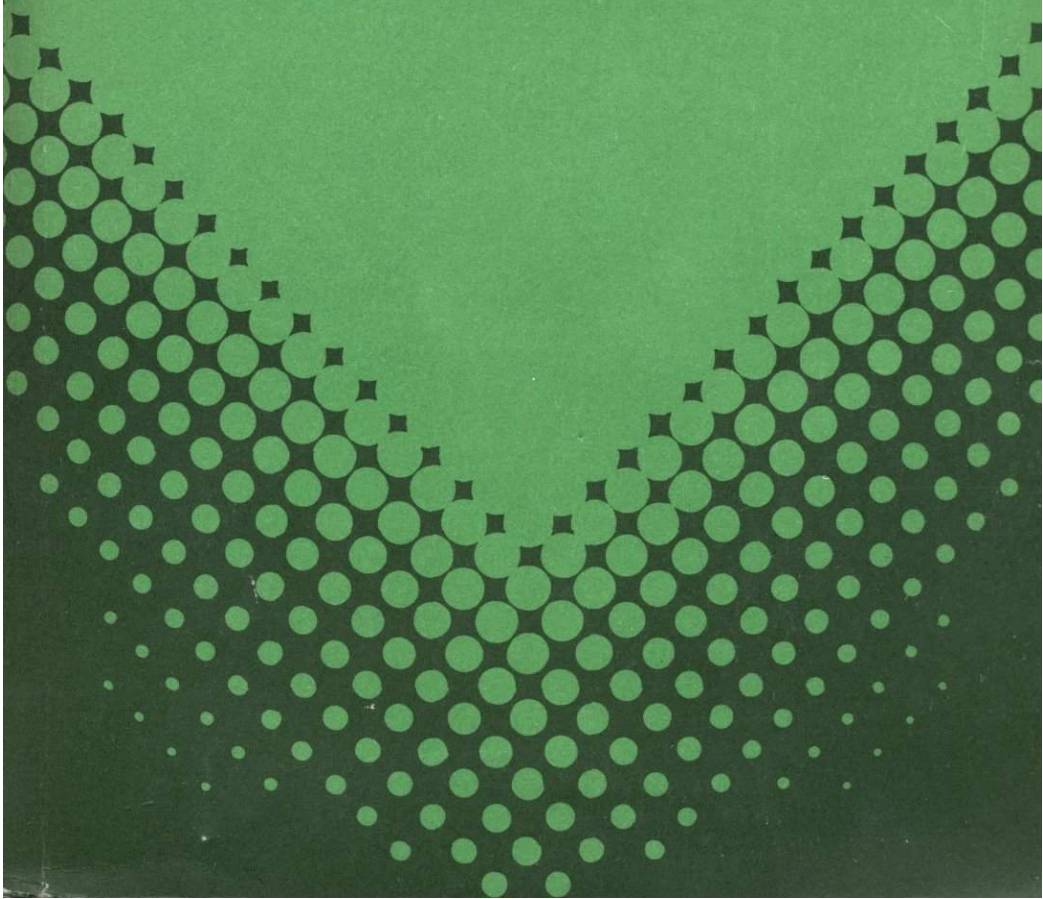


**В.Н. БОНДАРЕНКО**

**АНАЛИЗ  
ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ  
ДАННЫХ  
ПРИ ФОРМАЦИОННЫХ  
И ПРОГНОЗНО-  
МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ**



В. Н. БОНДАРЕНКО

**АНАЛИЗ  
ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ  
ДАНЫХ  
ПРИ ФОРМАЦИОННЫХ  
И ПРОГНОЗНО-  
МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ**

4628



МОСКВА „НЕДРА” 1986





**Бондаренко В.Н.** Анализ петрохимических данных при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях. — М.: Недра, 1986. — 185 с. ил.

Посвящена методологическим принципам и математическим методам анализа петрохимической информации. Предложен набор статистических методов сравнения и классификации объектов исследования. Определены конкретные условия применения методики, сформулированы требования к исходной информации, рассмотрены способы представления и интерпретации результатов. Приведена блок-схема комплекса программ обработки петрохимической информации для специализированных АСОД.

Для специалистов производственных организаций, занимающихся анализом петрохимических данных.

Табл. 27, ил. 30, список лит. — 34 назв.

Рецензент: *Р.И. Коган*, канд. геол.-минер. наук (Всесоюзный научно-исследовательский институт экономики минерального сырья и геологоразведочных работ).

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Работа посвящена рациональному применению математических моделей и методов при анализе петрохимических данных для решения задач формационных и прогнозно-металлогенических исследований. Принципы моделирования и методы анализа петрохимической информации рассматриваются на примерах решения конкретных задач с использованием математических методов сравнения и классификации ретроспективных петрохимических моделей петрогенеза. Обоснование математической корректности применяемых статистик и их вывод в работе не приводятся, так как этим вопросам посвящена монография [10]. Значительное внимание уделено обсуждению применимости и эффективности методики в условиях различной информационной обеспеченности участвующих в процедуре совокупностей (объектов), а также демонстрации соответствия используемых математических методов и процедур содержанию конкретных задач разнообразного типа и направленности. Кроме того, приведенные примеры служат основой для иллюстрации процедуры интерпретации полученных результатов, их петрологического, формационного и металлогенического содержания с учетом рассматриваемых в работе методологических принципов анализа информации. Изложение ориентировано на возможность реализации методики как с помощью ЭВМ, так и без их применения.

Автор надеется, что книга, во-первых, окажет помощь исследователям при анализе петрохимических данных, направленном на решение задач, содержание которых сходно с рассмотренными, во-вторых, позволит более точно выявить наличие и значимость положительного эффекта от применения подхода и методов для решения задач формационного и металлогенического анализа магматических образований и, в-третьих, будет способствовать определению тех областей геологической науки и практики, где применение методики наиболее эффективно.

Автор искренне благодарен за помощь в работе над книгой коллегам и сотрудникам: С.М. Бескину, В.В. Иванову, Э.П. Изоху, В.С. Павленко, Д.А. Родионову, Д.И. Фрих-Хару, В.С. Шеймовичу. Кроме того, автор признателен сотрудникам ИМГРЭ Л.А. Верховской, В.С. Воронову, А.М. Рониной, В.А. Соловьеву, С.В. Яковлевой и И.А. Якшиной, принимавшим участие в создании комплекса программ и осуществлении вычислительных процедур для рассмотренных в работе примеров.

Формационный анализ магматических пород и повышение его роли в прогнозно-металлогенических обобщениях — особенность современного уровня развития геологической науки и практики. Постоянный рост объема и качества количественных измерений признаков при описании свойств объектов изучения всех отраслей и направлений геологии определяет необходимость привлечения формальных методов и вычислительных средств для анализа информации и обоснования выводов. Характерной чертой современного уровня развития геологии следует считать широкое применение математических методов и ЭВМ, которое сопровождается разработкой и внедрением разнообразных автоматизированных систем обработки данных, специализированных на решение конкретных проблем. С этих позиций петрохимические данные — количественные по своему характеру — являются весьма перспективной информационной базой для эффективного применения математических методов и ЭВМ при решении задач, составляющих существо формационного и прогнозно-металлогенического анализа геологических объектов эндогенного происхождения.

Создание и широкое распространение учения о магматических формациях в качестве основного методологического принципа обобщения информации об изучаемых объектах эндогенного петрогенезиса предопределили существенную роль формационного подхода при исследованиях магматических образований и металлогенических построениях. В настоящее время формационный анализ магматических пород — неперенная и важнейшая составляющая металлогенической оценки территорий и объектов относительно проявления процессов эндогенного рудообразования. Современное состояние магматической геологии подтверждает представления А.Н. Заварицкого, по мнению которого решение вопросов о закономерностях распределения, процессах происхождения и металлогении изверженных пород требует прежде всего точного и ясного представления о вещественном составе не только отдельной горной породы, но и их естественных ассоциаций. Причем неперенным условием продуктивности исследований А.Н. Заварицкий считает применение рациональных приемов для сравнения и сопоставления наблюдаемых вещественных свойств изучаемых ассоциаций магматических пород.

Методология и методы формационного анализа при теоретических и практических исследованиях магматических образований послужили эффективным стимулом к повышению роли петрохимической информации и методов ее анализа в региональных и глобальных обобщениях, основанных на изучении продуктов эндогенного петрогенезиса. Хорошо известно, что Ф.Ю. Левинсон-Лессинг и



А.Н. Заварицкий считали петрохимические характеристики пород и их ассоциации непременной составляющей общего петрографического, петрологического и геохимического описания комплексов и формаций магматических пород. В настоящее время практически ни одна работа, посвященная формационным и металлогеническим исследованиям разного уровня и направленности в пределах регионов с широким проявлением эндогенного петрогенезиса не обходится без привлечения для обоснования выводов результатов анализа петрохимической информации. Причем в соответствии с современным уровнем развития науки вообще и геологии, в частности, обработка и анализ такой информации осуществляются с применением математических методов и средств вычислительной техники. Естественно, что особенно важную роль играет петрохимическая информация и методы ее анализа при прогнозно-металлогенических обобщениях, закономерным результатом которых являются прогнозные оценки перспектив изучаемых территорий и объектов. Разработка и применение автоматизированных систем прогнозной оценки территорий существенно повышают требования к методологии и методам количественного анализа петрохимической информации — одной из важнейших составляющих общей характеристики тектоно-магматического развития изучаемого участка земной коры.

Число опубликованных к настоящему времени работ, в которых для анализа петрохимических данных и обоснования выводов в той или иной степени использованы математические методы и ЭВМ, исключительно велико. Современное состояние применения математических методов и вычислительных средств при анализе петрохимических данных в формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях невозможно представить без статей и монографий И.И. Абрамовича, А.Ф. Белоусова, В.В. Грузы, Л.Н. Дуденко, Э.П. Изоха, В.В. Кепежинскаса, И.Г. Клушина, В.А. Кутolina, Б.А. Марковского, Г.Т. Скублова и др.

В то же время роль петрохимических данных и их анализа в обосновании важных теоретических и практических выводов не вполне соответствует информационным возможностям, заключенным в химическом составе наблюдаемых ассоциаций магматических пород. Одной из основных причин этого является недостаточное соответствие методов математической обработки реальной структуре выборочных совокупностей петрохимических анализов пород магматических комплексов (формаций).

Широко применяемые при обработке петрохимической информации методы многомерной статистики (дисперсионный анализ, дискриминантные функции, распознавание образов, факторный анализ, кластер-анализ и т.п.) основаны на априорном требовании независимости и случайности всех эмпирических наблюдений (проб пород). Теоретические и экспериментальные исследования и связанные с ними представления о процессе петрогенезиса, развиваемые советскими и зарубежными специалистами, свидетельствуют о закономерных соотношениях вещественных свойств разновидностей пород

объекта как представителей последовательности состояний полузакрытой термодинамической системы. В соответствии с подобным представлением составы разновидностей пород в наблюдаемом объекте закономерно взаимосвязаны в соответствии с динамикой  $P$ - $T$ -условий при реализации системы и не могут удовлетворять требованиям независимости и случайности, выполнение которых необходимо для эффективного применения перечисленных методов многомерной статистики. Кроме того, широко используемые методы многомерного статистического анализа петрохимических данных, представляемых в виде случайных выборочных совокупностей, существенно снижают информационные возможности и ценность сведений о химическом составе разновидностей пород объектов в генетическом аспекте.

Хорошо известно, что петрохимические данные о составе ассоциаций пород изучаемого объекта являются практически единственной количественно измеримой информацией не только о вещественном составе наблюдаемого состояния объекта (тела, комплекса, формации), но и о характере и условиях проявления петрогенетического процесса.

Представление о процессе петрогенезиса как о реализации термодинамической системы, отображение условий проявления и характера данного процесса в наблюдаемых свойствах пород и их ассоциаций, а также недостаточная эффективность использования для анализа петрохимических данных методов многомерной статистики определяют необходимость поиска иного подхода к моделированию и обработке петрохимических данных. Один из путей реализации процедуры применения математических методов и ЭВМ для анализа петрохимических данных, в большей степени соответствующих их свойствам и структуре выборочных совокупностей, следует из объективного существования закономерного изменения составов последовательно формирующихся в процессе разновидностей пород. Это положение и представления о петрогенезисе как о реализации термодинамической системы определяют правомочность соотношения формирования последовательности разновидностей пород последовательности состояний моделируемой системы.

Следовательно, петрохимическая информация о свойствах разновидностей пород обеспечивает возможность построения ретроспективных моделей петрогенезиса, которые с учетом приведенных предположений представляют собой эмпирическую реализацию процесса перераспределения вещества в период функционирования термодинамической системы. Примером аналогичного подхода к использованию и анализу петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях являются статистико-петрохимические диаграммы, предложенные Э.П. Изохом. Эти диаграммы представляют собой ретроспективные модели петрогенезиса в вещественном выражении.

Формационный анализ магматических объектов на основе вещественных свойств слагающих их ассоциаций пород в содержатель-



ном аспекте представляет собой последовательность задач сравнения и классификации. Объединение магматических тел и определение объема комплекса (конкретной формации), выявление особенностей состава пород однотипных формаций разных регионов, структурных зон и этажей, определение объема абстрактных формаций (формационных типов), установление комагматичности интрузивных и вулканических комплексов и объединение их в единую вулканоплутоническую формацию — все это может быть представлено в математическом аппарате как задачи сравнения и классификации парагенетических ассоциаций магматических объектов. Выявление специфики условий формирования магматических тел и комплексов с известной ассоциированной рудоносностью по сравнению с аналогичными по формационной принадлежности, но безрудными объектами представляет собой задачу сравнения. С тех же позиций прогнозирование рудоносности магматического объекта является задачей определения принадлежности его к одному из альтернативных по рудоносности классов, т.е. относится к задачам классификации.

Особенности петрохимической информации и представление о закономерном изменении признаков при формировании магматических объектов определили необходимость организации петрохимических данных в виде ретроспективных моделей процесса петрогенезиса. Соответственно приведенные выше задачи сравнения и классификации объектов реализуются на основе меры сходства-различия функционального изменения признаков в петрохимических моделях петрогенетических процессов.



СОСТАВ И СВОЙСТВА РАЗНОВИДНОСТЕЙ ПОРОД  
КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О ХАРАКТЕРЕ  
ПРОЦЕССА ПЕТРОГЕНЕЗИСА

Учение о магматических формациях и в большей степени металлогенический анализ представляют собой объективное отражение современного уровня развития геологической науки. Именно эти отрасли геологии, их становление, развитие и все возрастающий авторитет являются красноречивым свидетельством перехода от стадии преимущественного накопления информации и стадии обобщений и теоретических построений. Подобный вывод очевиден, так как формационный и металлогенический анализы основаны не столько на описании наблюдаемых факторов, сколько на научных обобщениях, сформулированных определенными гипотезами и идеями. И это неизбежно для указанных отраслей науки, целью которых является создание научной основы для прогнозирования месторождений при постоянно возрастающей роли их в геологических исследованиях. В самом деле, факт, как бы ни был он интересен сам по себе, не может быть не чем иным, как единичным фактом. В то же время факт, появление которого логически следует из научно обоснованной гипотезы, построенной на результатах научных обобщений, является уже основанием для теоретических выводов, уточнения и развития гипотезы, практических приложений.

Весьма показателен в данном аспекте пример учения о магматических формациях. Понятие "формация" существовало и употреблялось в близком для современного понимания значении многими петрологами и петрографами с начала XX в. Однако практически во всех случаях изучение формаций осуществлялось в аспекте их индивидуализации. И только при накоплении достаточного опыта и теоретических оснований для обобщения его формационный анализ сложился как учение. Причем, обобщающим признаком для магматической формации Ю.А. Кузнецовым был признан парагенезис магматических пород и слагаемых ими тел, обладающий некоторой степенью геохимической связности и выбираемый для целей формационного анализа [21]. Однако в основополагающей работе Ю.А. Кузнецова "Главные типы магматических формаций" при определении формации как парагенезиса магматических пород сделана оговорка о сознательном невключении в формулировку таких понятий, как глубинные магматические очаги, родоначальные магмы и т.п. Это, по мнению Ю.А. Кузнецова, вызвано тем, что перечисленные понятия являются и, вероятно, долго еще будут являться чистой гипотезой. В то же время исключение генетического аспекта

из определения и признаков формаций существенно смягчено расшифровкой содержания термина "парагенезис", который используется в этой работе для обозначения понятия "сопроисхождение". Это уточнение было совершенно необходимым и естественным, поскольку в дальнейшем при характеристике конкретных формаций используются определенные генетические построения. И это не противоречие, так как далее в этой работе Ю.А. Кузнецов четко определяет свое отношение к генетическим проблемам следующим образом: "Это не значит, что генетические вопросы не должны рассматриваться в учении о магматических формациях. Наоборот, постановка их обязательна и целеустремленный сбор материалов, нужных для решения таких вопросов, необходим". Очевидно, что невключение генетического аспекта в явном виде в определение магматической формации практически является следствием невозможности в настоящее время объективно оценить его роль при формировании наблюдаемых парагенетических ассоциаций пород.

Нет сомнения, что привлечение генетического аспекта в той или иной мере при формационном исследовании продуктов эндогенного петрогенезиса совершенно естественно, так как именно генетические представления в наибольшей степени аккумулируют весь накопленный геологией опыт по изучению природных образований. Действительно, иначе как нонсенс нельзя воспринимать отнесение к одной формации гранитных тел стадии инверсии геосинклинали и гранитов, сформированных в результате метасоматического преобразования терригенных толщ в посторогенную стадию, даже если слагающие их ассоциации пород близки по составу и петрографическим особенностям. Можно возразить, что это тела разного возраста. Но нетрудно представить себе ситуацию, когда это нельзя доказать. Кроме того, само утверждение, что магматические тела одной формации должны быть близки по возрасту, имеет достаточно четкий и несомненный генетический смысл. Ведь признак одновозрастности и принадлежности к одной структурно-тектонической единице, несомненно, соответствует признаку совпадения всего многообразия условий генерации исходного материала и условий проявления петрогенетического процесса.

Многие исследователи пишут о необходимости учета генетического аспекта при формационном анализе, однако прямо или опосредованно генетический аспект присутствует практически во всех работах, посвященных формационному анализу магматических пород. К настоящему времени сложилось устойчивое представление о магматических формациях как о геологических телах, отражающих определенный этап геологического развития данного региона. Более того, можно считать доказанным, что однотипные стадии развития разных регионов фиксируются близкими по характеру магматическими формациями, естественно, с поправкой на индивидуальные особенности каждого из участков земной коры. Именно это позволило Ю.А. Кузнецову сформулировать такое понятие, как абстрактная формация, или формационный тип.



Все это с очевидностью свидетельствует о необходимости принятия допущения о том, что образование магматических тел одной формации происходило в близких условиях магмагенерации и проявления процессов петрогенезиса. Иначе не представляется возможным сколько-нибудь убедительно обосновать причины объединения их в одну формацию, т.е. в один парагенезис (сопроисхождение). Примером применения при формационном анализе генетического аспекта в явном виде могут служить принципы объединения вулканической и плутонической составляющих в одну вулканоплутоническую формацию. Например, происхождение из одного магматического очага составляющих вулканоплутонической формации в качестве основного признака фигурирует в работах Е.К. Устиева, В.И. Титова, Н.Т. Кулкашева, А.И. Ивлева, Ю.П. Масуренкова, Т.Н. Далимова, К.Н. Рудича, Е.Е. Миллера и др.

В подавляющем большинстве случаев деятельность петрологов требует разработки методики изучения природных объектов на таких признаках, которые не поддаются ни непосредственному наблюдению, ни воссозданию в лабораторных условиях. Эффективность геологических исследований, в первую очередь, базируется на огромном опыте изучения объектов геологии как науки. Многие поколения геологов немало сил вложили в поиски причинно-следственных связей свойств объектов и всего многообразия окружающей их геологической обстановки. Именно анализ, причем многоаспектный и разносторонний, и позволил с достаточной степенью уверенности обосновывать заключения об условиях и процессах формирования эндогенных объектов.

Сложно и даже практически невозможно восстановить ход процесса петрогенезиса, а тем более всю совокупность условий магмагенерации и его проявления, т.е. определить причины появления в данном участке пространства и в определенный момент геологического времени наблюдаемого сейчас объекта с присущим ему комплексом свойств (форма массива, структура, фазовый и фациальный состав, парагенетическая ассоциация пород и т.п.). Столь же мало надежды на однозначное установление причин, определяющих условия и характер проявления процессов петрогенезиса при образовании объектов разных формаций. Однако и в этой сложнейшей ситуации специалистов выручают огромный опыт, накопленный при изучении объектов эндогенного происхождения, а также наличие методики целенаправленного анализа информации и обобщения ее результатов.

Принципиальным и, без сомнения, плодотворным, как свидетельствует опыт изучения магматических образований, является установление объективных закономерностей в совместном нахождении и последовательной смене монопородных фаз и разновидностей пород в период становления объекта в наблюдаемом виде. Одним из наиболее известных результатов реализации этого первоначально эмпирического правила является создание реакционных серий Боуэна. Схема Боуэна, во-первых, замечательна попыткой



выявления закономерностей в процессе эндогенного породообразования и, во-вторых, она представляет собой модель петрогенезиса, обобщающую накопленный в результате изучения магматических объектов опыт.

Дальнейшее развитие петрологии, с одной стороны, показало определенную схематичность представлений Н. Боуэна, а с другой, — подтвердило принципиальную закономерность в вещественных свойствах продуктов реализации процессов петрогенезиса. Наиболее важным является устоявшееся представление о процессе эндогенного петрогенезиса как о реализации термодинамической системы. Именно оно сближает даже альтернативные точки зрения на процесс формирования гранитоидов: магматическая дифференциация или метасоматическое преобразование. Ведь обе гипотезы едины в одном: они предполагают закономерную изменчивость составов в последовательности продуктов проявления процесса как отражение динамики условий реализации системы при переходе ее от состояния к состоянию.

Представление о процессе эндогенного петрогенезиса как о реализации термодинамической системы привлекательно еще и потому, что с этих позиций наиболее естественно объяснение как наблюдаемых закономерностей в составах ассоциации разновидностей пород объектов, так и типичности-индивидуальности таких закономерностей в объектах одного класса (комплекса, формации, формационного типа).

Следует определить позицию автора в отношении процессов петрогенезиса и влияние ее на процедуру анализа петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях. Естественно, что приведенные ниже представления имеют обобщенный характер, поскольку автор задался целью отобразить лишь принципиальное содержание процесса, не зависящее от исходной гипотезы: магматическая дифференциация или метасоматическое преобразование. Нет сомнения, что проблема распознавания магматического или метасоматического генезиса гранитоидов весьма актуальна и интересна, но она не является предметом настоящей работы. Кроме того, сущность формационного анализа предполагает близость условий проявления процессов петрогенезиса при становлении объектов одной формации и, следовательно, практически отвергает возможность объединения в одну формацию продуктов чисто магматического и метасоматического генезиса. Для объектов разной формационной принадлежности не отрицается возможность принципиальных различий в характере процессов петрогенезиса. Все это служит основанием для рассмотрения обобщенного представления о процессе эндогенного петрогенезиса, ориентированного на решение задач формационного и прогнозно-металлогенетического анализа. Процесс петрогенезиса рассматривается с позиций отображения его характера в вещественных (в частности, петрохимических) свойствах парагенетических ассоциаций.

Для простоты сначала рассмотрим модель петрогенезиса на приме-

ре формирования объектов чисто магматического происхождения, а затем приведем интерпретацию содержания модели процесса с учетом позиции сторонников метасоматической гранитизации.

Пусть в определенный момент геологического времени в некотором, определенном участке пространства существует объем расплавленного материала (магматический очаг). Естественно, что сам факт появления материала в жидкой фазе, его объем, состав, а также время и место его существования однозначно следуют из положения данного момента времени в истории геологического развития определенного региона, точнее — конкретного участка пространства. Причины проявления очага расплавленного материала именно в этой точке пространства и в конкретный момент геологического времени здесь не обсуждаются. Именно этот объем вещества и представляется в виде термодинамической системы; жидкая фаза вещества в нем следует из состава его и  $P$ - $T$ -условий системы в данный момент времени. Примем, что нас интересует период функционирования системы с момента  $t_0$  перехода в твердую фазу первой по времени разновидности пород из наблюдаемых в парагенетической ассоциации объекта до момента  $t_n$  аналогичного перехода последней по времени формирования разновидности. В соответствии с представлениями Д.С. Коржинского [19] о реализации термодинамических систем при формировании минеральных парагенезисов общее динамическое развитие системы определяется в первую очередь экстенсивными факторами (общий объем системы, ее теплосодержание и массы компонентов), а также значениями и динамикой интенсивных параметров, в набор которых для магматических систем входят температура  $T$ , давление  $P$  и химические потенциалы инертных и вполне подвижных компонентов.

Известно [19], что в системах с невыравненными интенсивными параметрами, к которым относятся и системы рассматриваемого типа, основным является процесс выравнивания этих параметров, который определяет необратимость системы. С позиций этой модели петрогенезиса наиболее важными свойствами реализации природных термодинамических систем следует считать, во-первых, их необратимость, и во-вторых, зависимость характера реализации системы от соотношения скоростей: скорости выравнивания параметров в объеме системы при условно устойчивых для конкретного состояния внешних условиях и скорости перехода системы от состояния к состоянию, которая полностью определяется внешними причинами изменения  $P$  и  $T$ . Для магматических систем принимается, что указанное соотношение обеспечивает возможность формирования минерального парагенезиса, соответствующего значениям термодинамических параметров в конкретном состоянии системы. Следовательно, итогом функционирования подобной необратимой системы является набор минеральных парагенезисов, отражающих последовательность ее состояний. Очевидно также, что число минеральных парагенезисов, состав каждого из них и закономерная смена параге-



незисов в общей последовательности определяются совокупностью условий реализации системы. В рассматриваемой модели основное содержание этой совокупности составляют экстенсивные факторы, интенсивные параметры и динамика последних в период реализации системы.

С позиций направленности рассматриваемой модели реализации магматических систем весьма важным следует считать представление Д.С. Коржинского [19] о "мозаичных" равновесиях. В соответствии с этим представлением общий закономерный тренд состава минеральных парагенезисов, соответствующих конкретным состояниям, усложнен локальными участками "мозаичных" равновесий. Естественно, что эта "мозаичность" в объеме системы приводит к флуктуациям состава основного парагенезиса на уровне каждого из состояний.

С учетом приведенных выше представлений о минеральных парагенезисах и развитии термодинамической системы при их формировании функциональное изменение компонентов в процессе реализации магматической системы в обобщенном виде может быть представлено следующим выражением:  $\Xi(t_i) = \Upsilon(t_i) + \varphi(t_i)$ , где  $\Upsilon(t_i)$  — состав минерального парагенезиса, который закономерно изменяется от состояния  $t_i$  к состоянию  $t_{i+1}$ ;  $\varphi(t_i)$  — флуктуации состава минерального парагенезиса, обусловленные неоднородностью термодинамических параметров в объеме системы и соответствующие данному состоянию  $t_i$ . Конкретный вид каждого члена правой части приведенной модели полностью определяется совокупностью условий реализации конкретной системы. В терминах приведенной модели итогом функционирования магматической системы следует считать ассоциацию минеральных парагенезисов, разнообразие составов которых представляет множество  $\{\Xi(t_i)\}$ ,  $t_i \in T$ , где  $T$  — множество состояний, пройденных системой при ее реализации.

Минеральный парагенезис, соответствующий данному состоянию системы, в рассматриваемой проблеме естественно определить как конкретную разновидность парагенетической ассоциации пород изучаемого магматического объекта. Под разновидностью здесь и далее понимается номенклатурная разновидность пород, диагностируемая петрографическими методами. Таким образом, в принятом представлении наблюдаемые и различаемые петрографически разновидности пород (минеральные парагенезисы) парагенетической ассоциации рассматриваются как результат прохождения термодинамической системой последовательности состояний в интервале  $t_0 \div t_n$ . Нетрудно заметить, что с указанных позиций состав и свойства конкретной парагенетической ассоциации полностью определяются как составом исходного материала (экстенсивные факторы), так и совокупностью условий реализации системы (динамика интенсивных параметров). Следовательно, наблюдаемый в полном (идеальном) объеме магматического тела набор разновидностей пород представляет собой вещественное выражение причин появления и совокупности условий функционирования термодинамической системы.



По-видимому, причина дискуссий между сторонниками магматического и метасоматического происхождения гранитоидов кроется в практически неразличающихся представлениях о последовательности изменения состава разновидностей в период реализации столь разных по существу процессов. Наиболее показательны в этом отношении работы П. Лападю-Арга и Д. Рейнольдс, в которых совершенно определенно указывается на динамику составов при нарастании интенсивности процесса метасоматических преобразований при гранитизации, практически не отличающуюся от классической схемы Боуэна. В работах этих авторов, так же как в работах Д.С. Коржинского о сквозьмагматических потоках при гранитизации, конечным состоянием процесса считается гранитная эвтектика — конечная точка процесса дифференциации гранитной магмы.

Таким образом, интенсивность проявления процесса петрогенезиса при становлении тел гранитного ряда, вне зависимости от гипотетических представлений, проявляется в степени близости его к гранитной эвтектике. Причем в любом случае вещественные свойства разновидностей пород данного магматического (в широком смысле слова) объекта определяются не его принадлежностью к магматическим или метасоматическим образованиям, а однозначно следуют из совокупности причин и условий проявления эндогенного петрогенезиса именно в данный момент на конкретном участке пространства. Следует указать, что это положение предназначено лишь для решения задач формационного и прогнозно-металлогенического анализа. Действительно, допущение об уникальности процесса петрогенезиса при становлении каждого объекта, о случайности времени и места проявления процесса петрогенезиса и об отсутствии закономерностей в изменении состава разновидностей пород и их ассоциаций исключает возможность не только каких-либо генетических построений, но и формационного анализа магматических пород вообще. Распространенность и эффективность применения формационного анализа в качестве основы для обобщения информации об объектах эндогенного происхождения, особенно при металлогенических построениях, достаточно убедительно свидетельствуют о закономерных взаимоотношениях таких категорий, как тектоническая позиция, стадия развития региона, строение и состав коры, а также структура, фациальный и фазовый состав, степень дифференцированности (объем ассоциации) и петрохимические особенности продуктов эндогенного петрогенезиса. Именно поэтому формационный анализ магматических пород базируется на типичности условий и характера проявления процессов петрогенезиса при становлении объектов одной формации и соответственно на их существенных различиях — для объектов разной формационной принадлежности.

Из приведенной выше обобщенной модели эндогенного петрогенезиса можно сделать следующие выводы:

1) появление и свойства объектов эндогенного петрогенезиса в данной точке геологического пространства в конкретный момент геологического времени закономерно обусловлены историей геоло-

гического развития региона и, в частности, определенного участка пространства;

2) состав ассоциации разновидностей пород, их особенности и взаимоотношения однозначно определяются составом исходного материала и совокупностью условий проявления петрогенетического процесса как термодинамической системы;

3) последовательность состояний термодинамической системы в процессе ее функционирования фиксируется последовательностью разновидностей пород, представленной наблюдаемой в настоящий момент парагенетической ассоциацией изучаемого объекта;

4) типичность условий проявления процессов петрогенезиса при становлении объектов одной формации, несмотря на специфические индивидуальные черты, отражена в характерных особенностях функционального изменения свойств разновидностей пород во временной последовательности.

Приведенные выводы с достаточной точностью определяют позицию автора в проблеме изучения объектов эндогенного петрогенезиса. Необходимо показать более конкретно связь формационного анализа и металлогенических построений, учитывая эту позицию, а также методологические принципы ее реализации и роль петрохимических данных и их анализа в рассматриваемой проблеме.

Методологическая позиция автора и его представления об отражении процесса петрогенезиса в наблюдаемых петрохимических свойствах пород объектов соответствуют широко распространенной сериальной модели парагенетических ассоциаций. Однако такая модель как основа для сравнения и классификации составов пород магматических объектов подвергается в настоящее время критике, особенно в работах А.Ф. Белоусова и его соавторов [3—6 и др.]. Основаниями для критики являются искусственность, исчерпанность, концептуальная необоснованность представления ассоциаций пород в виде упорядоченных последовательностей (серий), так как в структуре систематики составов ассоциаций магматических пород важно учесть популяционную (устойчиво дискретную) структуру этих ассоциаций [6].

Необходимо указать, что представление о породных группах, положенное в основу популяционной модели ассоциаций и предлагаемое А.Ф. Белоусовым, не противоречит методологическим принципам предлагаемой автором методики анализа петрохимических данных в задачах сравнения и классификации ассоциаций. С достаточной ясностью это следует из некоторых свойств породной группы: "Породная группа хорошо удовлетворяет требованию повышенной связности и переходов пород. Истинные серии, если можно так сказать, это именно породные группы" [6]. Другими словами, применение сериальной модели в принципе не отвергается, но ее использование ограничивается пределами становления одной породной группы. Это представление, за исключением ограничения протяженности серий только породной группой, соответствует принципам построе-



ния методики автора, обобщенным в приведенной выше модели процесса петрогенезиса.

Единственное, но существенное расхождение принципов автора с позицией сторонников популяционной модели состоит в различном методологическом подходе к принципам математического моделирования состава и свойств пород магматических ассоциаций и, как следствие этого, в выборе наиболее соответствующих содержанию смыслу задач сравнения и классификации ассоциаций формальных методов их решения. Несмотря на то что в упомянутых выше работах отсутствует прямое указание на конкретную математическую модель составов пород, объединяемых в породную группу, в работе А.Ф. Белоусова [4] указано, что каждая породная группа имеет, как правило, квазиоднородный характер, т.е. лишена явных признаков дискретности состава (имеет унимодальное распределение по всем признакам и близкие к линейным регрессионные зависимости). С учетом свойств, указанных в скобках, для представления составов пород породной группы в формальном аппарате сравнения и классификации А.Ф. Белоусов использует модель многомерной случайной величины с нормальным распределением вероятностей. Именно такая модель представления свойств пород магматических ассоциаций при решении задач сравнения и классификации с помощью формального аппарата и вызывает некоторые возражения, причины которых заключаются в следующем.

Генеральная совокупность  $m$ -мерной ( $m$  — число петрохимических признаков) случайной величины с нормальным распределением вероятностей может быть сформирована в результате реализации случайного процесса при следующих его свойствах: стационарности (постоянство математического ожидания на всем интервале времени реализации процесса) и регулярности (конечность дисперсии и независимость значения следующего по времени состояния от предшествующего).

Таким образом, из принятой модели петрохимического состава породной группы прямо следуют такие свойства петрогенетического процесса, как постоянство состава расплавленного материала и твердой фазы (в среднем на объем) в каждый момент времени реализации процесса и полное отсутствие зависимости состава разновидностей пород от состава предшествующей по времени формирования, а равно — первой и последней. Подобные свойства процесса петрогенезиса, прямо вытекающие из математической модели породной группы (совокупность случайной величины с единой функцией распределения), не соответствует широко известным и достаточно полно обоснованным представлениям о процессе становления магматических (в широком смысле слова) объектов. Естественно, что с подобной природой процесса и соответственно с моделью нельзя согласиться в связи с тем что в этом случае мы должны предположить случайность составов разновидностей пород, формирующихся последовательно во время реализации процесса петрогенезиса. Можно привести большое число работ, в которых процесс петрогенезиса

4628

представляется как реализация термодинамической системы с закономерным, определенным свойствами системы и динамикой  $P-T$ -условий, изменением составов последовательно формирующихся разновидностей. Наиболее четко и последовательно эти представления отражены в работах Д.С. Коржинского [18, 19]. В качестве примера, иллюстрирующего рассматриваемый вопрос, приведем следующую цитату: "... парагенетические соотношения минералов гранитоидов могут быть изображены на диаграмме  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$  при условии подвижного поведения окисей калия и натрия и содержания в качестве избыточных минералов кварца и магнетита. < . . . > Изучая последовательность кристаллизации минералов в разных типах гранитоидов и взаимосвязь составов одновременно выделяющихся минералов, а также принимая во внимание химические составы разностей, которые могут рассматриваться как эвтектические или же как соответствующие линиям эвтектической кристаллизации, мы можем нанести на диаграммы парагенезисов также пути кристаллизации гранитоидов разных типов" [18] (курсив мой, В.Б.). На рис. 1 приведены участок такой диаграммы кристаллизации для гранитоидов нормальной щелочности. Очевидно, что в данной системе (конкретный тип процесса петрогенезиса) не может после тоналита (132) сформироваться биотитовый гранит (85), а затем гранодиорит (107), равно как и любая другая последовательность разновидностей, возможная в моделях случайной величины, кроме единственной и однозначно определенной развитием системы: тоналит — гранодиорит — гранит. При этом пути кристаллизации не только закономерны, но и непрерывны в последовательной смене составов формирующихся разновидностей.

Генеральная совокупность многомерной случайной величины с нормальным распределением вероятностей может быть сформирована в результате реализации случайного процесса с детерминированной компонентой. В этом случае вектор математических ожиданий процесса закономерно изменяется при переходе к каждому последующему моменту времени в течение всего периода его реализации. Необходимым требованием в рассматриваемых условиях является нормальное распределение вероятностей признаков в каждый момент времени из интервалов  $t_0 \div t_n$ . При выполнении этого условия совокупность состояний процесса будет представлять собой  $(m \times n)$ -мерную случайную величину с нормальным распределением вероятностей. Для данной ситуации очевидна нетривиальность определения числа состояний  $n$ , без знания которого невозможно моделирование результатов реализации изучаемого процесса.

Таким образом, математическую модель  $m$ -мерной случайной величины с нормальным распределением вероятностей (результат реализации стационарного процесса) нельзя признать соответствующей механизму формирования магматических объектов вообще и любых частей ассоциаций, объединяемых в породные группы, в частности. Данная модель не отвечает одному из основных методологических требований математического моделирования — наиболее





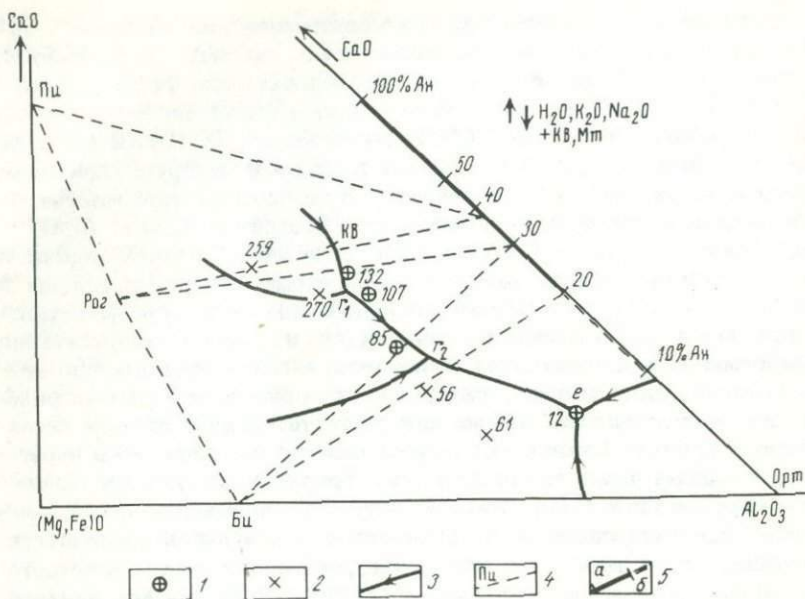


Рис. 1. Диаграмма линий кристаллизации гранитоидной магмы нормального ряда щелочности.

Би — биотит; Кв — кварц; Мг — магнетит; Опт — ортоклаз; Ан — анортит; Пи — пироксен; Рог — роговая обманка.  $e$  — эвтектическая точка;  $r_1$  — состав расплава, при котором пироксен замещается роговой обманкой;  $r_2$  — состав расплава, замещающего роговую обманку биотитом. 1, 2 — составы гранитоидов нормального ряда (номера по Трегеру, 1935 г.: 12 — аплит гранит, 85 — нормальный биотитовый гранит, 107 — гранодиорит, 132 — тоналит, 56 — рибекитовый гранит, 61 — рибекитовый гранофир, 259 — монзонит, 270 — латит); 3 — пути кристаллизации расплава; 4 — предполагаемые границы областей выделения минералов; 5 — проекция на ось  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  областей выделения плагиоклазов разного состава ( $a$  — расчетная,  $b$  — предполагаемая)

точному отражению характерных свойств и признаков природных объектов, и поэтому неадекватна содержательному смыслу задачи сравнения и классификации магматических объектов по вещественному составу слагающих их ассоциаций пород. В то же время математическая модель ( $m \times n$ )-мерной случайной величины, учитывающая закономерное изменение составов пород в ассоциации, не может быть использована на практике вследствие неизвестного числа состояний с различными векторами средних для петрохимических характеристик даже в пределах одной породной группы.

Возвратимся к диаграмме на рис. 1, где на небольшом отрезке общего тренда составов пород в процессе от тоналита (132) до точки эвтектики  $e$  можно выделить практически бесконечное число состояний (при непрерывном процессе). Кроме того, известные методологические принципы применения математических методов

в геологии при математическом моделировании реальных объектов и их свойств требуют применения наиболее простой модели из всех возможных и отвечающих условиям решаемой задачи. С учетом этого требования модель ( $m \times n$ )-мерной случайной величины с нормальным распределением вероятностей не является ни простой, ни практически реализуемой.

Следует указать, что учет закономерной изменчивости свойств разновидностей пород ассоциаций (породных групп), обусловленной процессом их формирования, необходим как при математическом моделировании вещественного состава магматических объектов, так и при выборе формального аппарата, эффективного в задачах сравнения и классификации.

В аспекте рассматриваемой проблемы весьма интересны представления А.Ф. Белоусова, А.П. Кривенко и З.Г. Поляковой [6] о содержании ключевых понятий, участвующих в процедуре формационного анализа магматических пород. Приведенные во введении к работе [6] определения, с одной стороны, обобщают сложившиеся представления о содержании таких понятий, "как ассоциация", "парагенезис", "магматическая формация" и "формационный анализ", а с другой стороны отражают специфику точки зрения этих авторов. Основной целью детального рассмотрения методологических концепций этих исследователей является желание показать близость их к представлениям, на которых базируется настоящая работа, при недостаточной адекватной их содержанию методической реализации этих концепций. Авторы работы [6] определяют "геологическую формацию" как природную ассоциацию (систему) горных пород и слагаемых ими тел, взятую в природных границах для исследования в целом (формационного, системного). Следуя далее логике изложения, мы приходим к толкованию содержания термина "формационный анализ", который в общем виде определяется как "изучение и целостное представление геологических формаций". Среди более конкретных аспектов формационного анализа нас более всего интересует выявление петрогенетических особенностей ассоциации в целом (формационная петрология) [6]. Более того, с учетом приведенных авторами определений парагенезиса: "Понятие парагенез (парагенезис) < . . . > должно обозначать не любую ассоциацию (смесь), а лишь совокупность образований, *первично ассоциированных* в рамках некоторого связного генетического процесса" и магматической формации: "*магматическая формация* — это совокупность *первично ассоциированных* (курсив мой, В.Б.) магматических пород (их тел) регионального и более крупного масштаба, взятая в природных границах для формационного анализа" [6] — мы однозначно, без каких-либо натяжек приходим к приведенному выше определению, данному Ю.А. Кузнецовым в работе "Главные типы магматических формаций". Приведенные выше цитаты должны показать принципиальное соответствие методологических представлений о существовании формационного анализа, на которых базируется настоящая работа. В частности, магматическую формацию можно предста-



вить как совокупность первично ассоциированных магматических пород (и их тел) в природных границах, обусловленную проявлением некоторого связанного генетического процесса. Следует отметить и различия в понимании термина "природные границы" у авторов монографии [6] и принятого в настоящей работе. Если в данной книге под природными границами понимаются временные и пространственные границы распространения индивидуализированных магматических тел, то в понимании авторов работы [6] природные границы — это границы породных групп, выраженные в вещественных признаках. Представляется нецелесообразным расчленение целостной парагенетической ассоциации формации на строго индивидуализированные в процедуре обработки информации породные группы, так как это приводит к потере весьма важной генетической информации. Особенно ощутима эта потеря при анализе информации для решения задач прогнозно-металлогенических исследований (см. гл. 7).

В заключение следует определить принципы применения петрохимических данных и математических методов их анализа при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях. Существующие представления о формационном анализе магматических пород в явном или неявном виде содержат тезис о том, что состав и свойства парагенетической ассоциации пород изучаемой магматической формации полностью определяются совокупностью условий проявления и характером конкретного петрогенетического процесса. Причем совокупность условий проявления процесса определяет не только индивидуальность формации, но и ее типичность для данного тектоно-магматического этапа развития региона. Следовательно, процедура классификации парагенезисов пород по их вещественным признакам (по мнению Э.П. Изоха [14] — это сущность формационного анализа) без искажения смыслового содержания может быть представлена как процедура классификации петрогенетических процессов, относительно типичных для данной формации условий их проявления. Другими словами, следуя пониманию содержания формационного анализа Ю.А. Кузнецовым, сущность формационного анализа состоит в типизации тектоно-магматических условий проявления петрогенетических ассоциаций и конкретные свойства всех слагающих их разновидностей пород. С учетом приведенного понимания сущности формационного анализа и требований современного уровня развития науки, построение количественной меры близости тектоно-магматических условий проявления петрогенетических процессов для прогнозно-металлогенических целей на основе структуры, состава и свойств наблюдаемых парагенетических ассоциаций следует определить как одну из актуальных и фундаментальных проблем геологии.

В проблеме оценки потенциальной рудоносности магматических образований, базирующейся на принципе единства процессов петро- и рудогенеза, весьма важным признаком, по-видимому, является

характер эволюции вещества в течение всего временного интервала реализации петрогенетического процесса. Именно здесь концентрируется доступная изучению и, что особенно важно в рассматриваемом аспекте, количественно измеримая информация об условиях проявления процессов петро- и рудогенеза. Не менее важно следствие из этого положения: лишь анализ структуры и состава парагенетических ассоциаций в целом, со всеми особенностями эволюции состава последовательно формирующихся разновидностей пород, обеспечивают возможность и эффективность определения принадлежности изучаемой формации (комплекса, серии, породной группы) к классу объектов с потенциальной рудоносностью известного типа.

Следует указать, что в дальнейшем под "петрогенетическим" понимается эндогенный процесс, определяющий появление индивидуализированных геологических тел, ассоциации пород которых однозначно соответствуют характеру конкретного (данного) процесса. Магматическими (в широком смысле слова) породами называются породы эндогенного происхождения, структуры и минеральный состав которых в петрологии принято определять этим термином. Под "типизацией" в работе понимается процедура сравнения и классификация магматических тел (комплексов, формаций) по близости (типичности для данной формации или типа ассоциированного рудогенеза) тектоно-магматических условий проявления процесса их формирования.

В соответствии с принципами предлагаемой методики информационной основой, а также объектом математического моделирования, сравнения и классификации в задачах типизации процессов петрогенезиса при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях является магматическая серия — последовательность разновидностей пород, сформировавшаяся в результате реализации единого (функционирующего без разрывов в выбранном интервале времени) петрогенетического процесса. Применение магматической серии в качестве эмпирической реализации процесса основано, как отмечалось выше, на представлении об эндогенном петрогенезисе как о непрерывно (в период динамического развития) функционирующей термодинамической системе, конечным результатом деятельности которой являются наблюдаемые магматические тела (комплексы, формации). Причем каждому состоянию системы соответствует разновидность из полной (идеальной) ассоциации пород сформированного объекта. В соответствии с этим представлением последовательность состояний системы, обусловленная динамикой факторов функционирования, отражена в составе и свойствах последовательности разновидностей пород, функциональное изменение признаков в которой определяется сменой условий реализации системы. Таким образом, последовательное формирование разновидностей пород в наблюдаемом виде рассматривается как петрогенетический процесс, в качестве аргумента которого может быть использовано как абсолютное (физическое) время, так и от-



носительное, определяемое через динамику состояний системы, выраженную в изменчивости свойств разновидностей пород.

Анализ состояния и места петрохимических исследований, применения математических методов и ЭВМ при обработке петрохимической информации, рассматривается лишь в свете сформулированных выше методологических принципов. В данном случае имеются в виду следующие принципиальные положения: 1) отображение совокупности условий проявления и характера реализации петрогенетического процесса в наблюдаемых свойствах парагенетических ассоциаций изучаемых объектов; 2) продуктивность организации петрохимической информации в виде последовательности разновидностей пород, упорядоченной по относительному времени их формирования; 3) адекватность математической модели случайной функции с детерминированной компонентой априорно неизвестного вида для представления функционального изменения признаков в задачах сравнения и классификации; 4) эффективность меры сходства-различия детерминированных компонент для решения задач формационного и прогнозно-металлогенетического анализа магматических пород с использованием петрохимической информации. Существуют и другие точки зрения на роль и место петрохимической информации при формационных исследованиях, но приведенные в работе методы сравнения условных средних во многих ситуациях (особенно при анализе именно петрохимической информации), несмотря на различие в подходе и методологии формационного анализа, являются более эффективными, чем методы дисперсионного, дискриминантного анализа и других традиционных методов, реализующих процедуры сравнения и классификации.

## ГЛАВА 2

### ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ В ФОРМАЦИОННЫХ И ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Значимость и место петрохимической информации при исследовании магматических образований с достаточной четкостью сформулированы Ф.Ю. Левинсон-Лессингом в книге "Петрография": "Исходным материалом, на котором основаны химическая характеристика изверженных пород, сравнение между собою разных пород и возможность тех или иных *петрогенетических выводов и сопоставлений*, является химический анализ породы" (курсив мой, В.Б.).

Аналогичные представления высказывал А.Н. Заварицкий в работах, посвященных петрохимии как равноправной отрасли геологической науки. В частности, среди базовых задач петрохимии и методик анализа петрохимических данных он выделяет задачу установления места конкретной разновидности пород среди других, принадлежащих одной ассоциации, и выявление закономерных со-

отношений составов всех разновидностей пород данной ассоциации, рассматривая их как основу решения важной проблемы сравнения между собой естественных ассоциаций горных пород по их вещественному составу.

Именно в соответствии с этими представлениями Ф.Ю. Левинсон-Лессинга и А.Н. Заварицкого сравнительные петрохимические исследования в современной геологии по праву занимают одно из ведущих мест. Анализ эволюции продуктов интрузивной и эффузивной деятельности в период тектонической активности рассматриваемого региона; решение проблемы определения характера изменения (или неизменности) химического состава исходной породы в процессе метаморфической переработки; определение специфики состава магматических объектов, связь с которыми известных в регионе месторождений не вызывает сомнений; характеристика региональных или формационных особенностей магматических тел и вопросы классификации их в естественные ассоциации, а также исследование многих других проблем нельзя представить себе без привлечения сведений о петрохимических свойствах геологических образований и сопоставления их с целью выявления индивидуальных особенностей объектов. Современные работы, посвященные петрографической, петрологической и металлогенической характеристике отдельных регионов, а также отчеты о геологической съемке обязательно содержат разделы, содержание которых базируется на данных о химическом составе интрузивных массивов, вулканогенных комплексов, метаморфических пород.

Решение перечисленных задач различных отраслей геологии практически во всех случаях осуществляется с применением петрохимической информации. Особенно большое значение петрохимические данные имеют при изучении объектов эндогенного происхождения и слагающих их пород. Вслед за Ф.Ю. Левинсон-Лессингом и А.Н. Заварицким, в работах которых значительная роль в обосновании петрологических, формационных и металлогенических выводов отведена петрохимической информации, исследователи продолжают развивать и совершенствовать методологию и методику применения петрохимии. Особенно четко эта направленность проявилась при широком внедрении в практику геологических исследований формационного анализа магматических пород. Практически во всех работах Ю.А. Кузнецова, посвященных как обоснованию методологии учения о магматических формациях, так и его приложению к решению конкретных задач теоретической и региональной петрологии, петрохимические данные и их целенаправленный анализ несут значительную смысловую нагрузку. Именно петрохимические данные как объективная информация о вещественных свойствах парагенетических ассоциаций магматических объектов определяют возможность уточнения и выявления особенностей магматических формаций различной структурно-тектонической позиции.

Большой интерес представляют работы А.А. Маракушева и



Л.Л. Перчука, посвященные исследованию физико-химической роли петрохимических данных при восстановлении условий формирования магматических объектов, их использованию в качестве основной информационной базы восстановления особенностей проявления процессов петрогенезиса. Интересные результаты получены ими при восстановлении кислотно-основных и температурных условий реализации процессов, а также при определении роли летучих в процессе петрогенезиса. Петрохимическая информация эффективно используется А.А. Маракушевым и Л.Л. Перчуком для обоснования выводов и построения моделей петрогенетических процессов в теоретической и экспериментальной петрологии.

Весьма показательно, что многочисленные работы исследователей, развивающих учение о магматических формациях в понимании Ю.А. Кузнецова, во многом базируются на анализе петрохимической информации. Причем требования современного уровня развития науки определяют и существенную роль количественных методов обработки петрохимических данных, ориентированной на решение задач формационного анализа магматических пород.

Среди специалистов хорошо известны работы А.Ф. Белоусова и его соавторов [3, 4], содержание которых посвящено различным аспектам формационного анализа магматических пород. Необходимо отметить, что значительное число работ этого автора содержит петролого-генетическое, методологическое и методическое обоснование предлагаемого им популяционного подхода к классификации магматических пород и процедуре их формационного анализа. Следует отметить, что базовая для данного подхода процедура выделения породных групп и определения их границ (объема) основана исключительно на анализе петрохимической информации. Другими словами, формационный анализ в свете представлений А.Ф. Белоусова практически неосуществим при отсутствии данных о химическом составе пород изучаемых объектов.

Аналогичный вывод может быть сделан и при рассмотрении работ Э.П. Изоха и др. [14, 23, 33]. Практически все его исследования, посвященные не только формационному, но и прогнозно-металлогенетическому анализу магматических образований, базируются на типизации магматических пород и их ассоциаций с помощью статистико-петрохимических диаграмм. Эти диаграммы демонстрируют динамику изменения некоторых петрохимических характеристик в процессе петрогенезиса, по своей сути они в первом приближении сопоставимы с модернизированными в аспекте решаемых задач диаграммами Харкера. Специфика статистико-петрохимических диаграмм, разработанных Э.П. Изохом, заключается в совмещении диаграмм поведения концентраций петрогенных окислов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , суммы щелочей) с гистограммой частоты встречаемости разновидностей породы, входящих в изучаемую ассоциацию. Следует отметить, что проведенный Э.П. Изохом направленный на прогнозирование рудоносности анализ статистико-петрохими-

ческих диаграмм [14, 23] приводит к весьма интересным результатам. Очевидно, что приведенный в работах Э.П. Исоха подход к представлению петрохимической информации нуждается в количественных методах анализа статистико-петрохимических диаграмм, который в работах [14, 23] осуществляется визуально.

Эффективность применения петрохимической информации и математических методов ее анализа в формационных исследованиях магматических пород и объектов наглядно продемонстрирована в работах В.А. Кутолина. Формационная диагностика вулканических формаций Сибири и Дальнего Востока осуществляется В.А. Кутолиным с применением иерархической процедуры классификации. Информационной основой процедуры является петрохимический состав базальтов в изучаемых формациях, а методическая реализация осуществляется с использованием дискриминантной функции.

Работы И.Н. Абрамовича, опубликованные в соавторстве с В.В. Грузой [1], И.Г. Клушиным и др., посвящены в основном различным аспектам анализа петрохимических данных и поиску эффективного решения комплекса задач формационного, фациально-формационного и петролого-генетического изучения магматических пород и объектов. Во всех ситуациях исследования проведены на современном уровне и базируются на применении широкого спектра математических методов и ЭВМ в соответствии с содержанием конкретных задач.

Приведенный выше обзор применения петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях безусловно может быть продолжен. Однако полный обзор литературы, посвященный рассматриваемой проблематике, не является целью и не соответствует направленности данной работы. Основной целью приведенного обзора работ и содержащихся в них результатов является подтверждение тезиса о том, что роль петрохимической информации и ее анализа в формационных исследованиях магматических пород и объектов исключительно высока. Кроме того, приведенный обзор свидетельствует, что на современном уровне развития науки значимость петрохимических данных при изучении магматических пород и объектов более высока, чем можно было предполагать в момент выхода в свет основополагающих работ Ф.Ю. Левинсон-Лессинга и А.Н. Заварицкого. Подобное положение является следствием некоторых особенностей петрохимической информации, проявление которых естественно для современного уровня развития геологической науки. Отметим некоторые из них, соответствующие обсуждаемой проблематике и направленности работы.

1. Петрохимические данные являются количественно измеримой и устойчивой информацией о вещественных свойствах пород, слагающих изучаемый объект. В частности, несмотря на то что традиционной и наиболее распространенной методикой диагностики



пород по их вещественному составу является петрографическое описание, оно не отвечает требованию устойчивости информации — основы количественного решения задач. Причиной этого являются объективные свойства порообразующих минералов. Все они, кроме кварца, представляют собой изоморфные системы с непрерывным изменением составов отдельных видовых разновидностей. Причем последние не могут диагностироваться с достаточной точностью при массовых петрографических описаниях. Следовательно полное и точное петрографическое описание не позволяет восстановить химический состав породы, и тем более — сравнить количественными методами состав близких по валовому петрографическому составу разновидностей пород.

2. Петрохимическая информация о составах разновидностей пород парагенетической ассоциации в наибольшей степени сохраняет сведения о характере процесса петрогенезиса. Основой для подобного утверждения служат известные положения: 1) петрогенные окислы наиболее инертные компоненты полного химического состава магматических пород, что позволяет им сохранять в наблюдаемых разновидностях пород соотношения, близкие к имевшим место при становлении твердой фазы; 2) постмагматические процессы, кроме процесса метасоматического преобразования, который по сути является петрогенетическим процессом, не могут разрушить этих соотношений во всем объеме изучаемого объекта. Второе свойство не характерно для редких и рассеянных элементов, которые обычно называют геохимическими. Следует отметить, что такие элементы играют большую роль в прогнозировании рудоносности, так как во многих случаях являются индикаторами процесса рудообразования, но в аспекте информации о процессе петрогенезиса они менее информативны, чем петрогенные окислы.

Естественно предположить, что во многом именно эти свойства петрохимических данных определяют их существенную роль при изучении вещественного состава магматических пород и объектов. Особенно очевидно это положение при попытках решения количественными методами задач, содержание которых состоит в сравнении и классификации магматических объектов по их вещественным свойствам. В подобных ситуациях значение петрохимической информации, количественной по своему характеру, исключительно велико. Только приведенными свойствами петрохимических данных можно объяснить возросшее внимание к петрохимическим данным в период широкого внедрения математических методов и ЭВМ во все отрасли геологической науки и практики. Ниже рассмотрены математические методы решения задач сравнения и классификации объектов на основе анализа петрохимических свойств слагающих их пород при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях. Необходимо учитывать, что целью рассмотрения является анализ существующих методик, ориентированный на решение поставленной выше задачи: типизацию условий и характера проявления петрогенетических процессов, отображенных в вещественных

свойствах ассоциаций пород в аспекте проблем формационного анализа и определения потенциальной рудоносности магматических образований.

В связи с тем, что предметом работы является анализ петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях, обзор известных из литературы математических методов сравнительного анализа петрохимических данных может быть осуществлен в обобщенном виде. Основой обобщения послужило их методологическое и методическое содержание и отношение к проблематике формационных и металлогенических исследований.

Анализ петрохимической информации с применением математических методов и ЭВМ осуществляется для решения следующих задач: 1) сравнения петрохимических особенностей пород изучаемых магматических тел (комплексов, серий, формаций); 2) классификации магматических тел (комплексов, серий, формаций) по близости петрохимических особенностей слагающих их пород; 3) выявления направленности эволюции петрохимических свойств пород магматических тел (комплексов, серий, формаций) в возрастном или латеральном аспекте; 4) оценки металлогенической специализации магматических тел (комплексов, формаций, серий).

Эти задачи представляют собой основу для обсуждения методологического и методического содержания их решений, применяемых при анализе петрохимической информации с использованием математического аппарата.

Задача сравнения петрохимических особенностей пород является существенной частью таких проблем теоретической и региональной петрологии, как определение формационной принадлежности магматических объектов; выявление особенностей состава пород одной формации в разных структурных зонах, этажах и регионах, а также различной металлогенической специализации; установление сходства-различия составов пород комплексов, составляющих вулканоплутонические формации; определение динамики свойств в процессе регионального метаморфизма и т.д. Широкий круг и типовой характер задач сравнения петрохимических свойств пород при различных по направленности геологических исследованиях определяют значительную распространенность работ с применением математического аппарата сравнительного петрохимического анализа. Другой причиной обращения исследователей к анализу петрохимических данных с помощью математических методов и ЭВМ является неудовлетворительность результатов применения традиционных методов, таких как диаграммы Харкера, петрохимические пересчеты Ниггли, Барта, Заварицкого, Кузнецова, *CIPW* и т.д. Применение этих методов не обеспечивает достаточной обоснованности выводов по приведенному выше набору задач, которые в общем случае являются задачами сравнения и классификации. В то же время перечисленные выше и аналогичные традиционные методы представления петрохимической информации для ее анализа основаны на визуаль-



ных процедурах сравнения, что, естественно, не может привести к объективным и обоснованным выводам. Именно стремление к объективности и обоснованности результатов при сравнении петрохимических свойств пород и объектов и особенно при применении процедур классификации послужило эффективным стимулом привлечения математических методов и ЭВМ к анализу петрохимической информации в задачах сравнения и классификации магматических объектов.

Необходимо отметить, что использование математических методов при решении задачи сравнения петрохимических особенностей пород объектов основано на двух методологически разных подходах к моделированию петрохимических составов пород. В одних случаях состав ассоциации пород объектах рассматривается в целом и представляется в формальном аппарате сравнения с помощью модели многомерной случайной величины, а петрохимическая информация об ассоциации пород объекта — как выборочная совокупность этой случайной величины. В других случаях методологический подход основан на учете объективно существующего нормального петрохимического тренда, который определяет необходимость подразделения ассоциации пород объекта на равные по длине интервалы дискретизации, ограниченные априорно заданными значениями содержания кремнезема, или на неравные интервалы (породные группы) содержания кремнезема, полученные в результате анализа гистограмм частот встречаемости. При использовании последнего подход разновидности пород каждого из указанных интервалов представляется в формальном аппарате сравнения также с помощью моделей многомерных случайных величин, а петрохимические данные о составе разновидностей пород данного интервала — как выборочные совокупности соответствующих случайных величин. Причем каждый интервал в аппарате сравнения участвует как полностью самостоятельный (индивидуализированный) объект. В таком случае парагенетическая ассоциация пород магматического тела (комплекса, формации) участвует в формальном аппарате сравнения в виде набора совокупностей, а не единого природного объекта.

Во всех указанных ситуациях математическими методами решается идентичная по содержательному смыслу геологическая задача: одинаковы ли средние петрохимические составы ассоциаций пород в целом или каждой из разновидностей пород, принадлежащих одинаковому по содержанию кремнезема интервалу (одной породной группе), для изучаемых объектов? В терминах математических моделей эта задача соответствует нулевой гипотезе о равенстве векторов математических ожиданий случайных величин — моделей вещественных (петрохимических) свойств парагенетических ассоциаций пород объектов в целом или соответственно разновидностей отдельно взятого интервала кремнекислотности (породной группы).

Аналогичные по существу задачи, модели и характер применения математических методов возникают при рассмотрении и сравнении не петрохимических составов пород и объектов в целом, а лишь

отдельных петрохимических характеристик (содержания окислов, значения индексов или показателей).

Применение рассматриваемого подхода к постановке задач сравнения петрохимических свойств, математическому их моделированию и выбору аппарата решения широко распространено. Задача сравнения средних петрохимических составов и соответствующая ей нулевая гипотеза определяют и набор математических методов решения. Это, как правило, однофакторный дисперсионный анализ, реализуемый методами Рао—Уилкса,  $T^2$ -Готелинга, Джеймса—Сю, вычисление обобщенного расстояния Махаланобиса и некоторые аналогичные по существу информационные (критерий Кульбака) и ранговые (критерий Пури—Сена—Тамуры) статистики. В случае сравнения отдельных окислов и показателей — это одномерные аналоги указанных методов (критерий Вэлча, Стьюдента, Пирсона, Фишера и др.). Известны примеры применения к аналогичным задачам и эвристических методов распознавания образов.

Все перечисленные методы сравнения аналогичны как по применяемой математической модели, так и по проверяемой нулевой гипотезе. Необходимо учитывать, что приведенное обсуждение относится к особенностям использования статистик и эффективности методов лишь применительно к анализу петрохимической информации. Смысловое содержание процедуры сравнения во всех рассматриваемых методах предусматривает представление информации в безструктурном виде: как набор случайно отобранных наблюдений без предположения о существовании закономерных взаимоотношений между ними. Так, при представлении всей ассоциации пород гранодиорит-гранитной формации в виде одной случайной величины петрохимические свойства разновидностей пород рассматриваются (в многомерном случае) как случайные представители одной генеральной совокупности, частота появления которых определяется функцией распределения вероятностей и значением единого вектора математических ожиданий. Признание существования закономерности в последовательности их формирования требует увеличения размерности случайной величины — модели их составов — в соответствующее количеству разновидностей число раз.

В гл. 2 на основе принятой модели процесса петрогенезиса было показано, что неизбежно закономерная последовательность разновидностей пород и характер изменения их составов в ней обусловлены комплексом факторов и динамикой параметров, определяющих функционирование термодинамической системы. Очевидно, что и при дискретизации ассоциации на подсовокупности заданными значениями содержания кремнезема (породные группы) аналогичными свойствами обладают последовательности разновидностей пород, входящих в данный интервал (породную группу). В то же время следует учитывать, что при применении рассматриваемых методов сравнения из арсенала многомерной статистики (дисперсионный и дискриминантный анализы и т.п.) вектор средних для данной парагенетической ассоциации (интервала, породной группы) является



обобщенным описанием, усредненным по петрохимическому составу всех разновидностей пород, слагающих изучаемый объект (тело, комплекс, формацию). Во многих задачах особенно связанных с необходимостью учета генетического аспекта, сравнение магматических объектов, участвующих лишь в виде векторов средних петрохимических составов, является заметным и часто неоправданным упрощением совокупности свойств сложных природных образований.

Классификация магматических объектов по близости петрохимических составов ассоциаций пород представляет собой одну из наиболее важных и распространенных задач геологических исследований различной направленности и масштаба. Весьма существенную роль играют процедуры классификации при формационном анализе магматических пород вне зависимости от уровня обобщений.

Наибольший интерес с этих позиций представляют монографии В.А. Кутолина, посвященные проблеме решения задач формационной диагностики на базе петрохимических данных с применением математического аппарата классификации. В этих работах рассматривается возможность применения дискриминантного анализа для решения проблемы классификации вулканических пород и формаций. В качестве информационной основы анализа используется химический состав базальтов, входящих в ассоциацию пород изучаемых формаций и формационных типов. На обширном фактическом материале по химизму базальтов различной формационной и региональной принадлежности демонстрируется возможность применения и эффективность формальных методов классификации при некоторых заданных условиях их использования. Организация дихотомической процедуры на базе дискриминантного анализа позволяет В.А. Кутолину уверенно отнести изучаемый объект к одному из эталонных классов (формаций или формационных типов). Естественно, что процедура классификации в данном случае реализуется на основе среднего петрохимического состава пород, определяемых в литературном источнике материала как базальты. Рассмотрим с методических позиций вклад подобного рода работ в формальное решение проблематики формационного анализа. Несомненно, что решительное привлечение достаточно эффективных и сложных математических методов (какими следует считать формальные методы классификации) для решения задач формационного анализа является заслугой в первую очередь В.А. Кутолина. В то же время рассматриваемые процедуры не могут обеспечить радикального решения ряда важных задач формационного анализа. Очевидно, что несмотря на эффективность метода построения дискриминантных функций для решения проблемы классификации неизвестного объекта к одному из двух эталонных, его возможности для решения всего круга задач формационного анализа по петрохимическим данным существенно ограничены. Не случайно В.А. Кутолин искусственно ограничивает круг анализируемых разновидностей пород формаций базальтами. Ему совершенно ясно, что включение в анализ всех разновидностей пород,

составляющих полную ассоциацию каждой из рассматриваемых формаций, требует применения иных математических методов. В связи с этим В.А. Кутолин указывает на необходимость разработки статистического метода, позволяющего сопоставлять составы пород одной стадии дифференциации, что является и по его мнению необходимым условием сравнительного анализа магматических пород при формационных исследованиях. Кроме того, отсутствие четкой классификации пород на петрохимической основе вынуждает его пользоваться номенклатурными названиями разновидностей и предполагать, что все исследователи, фактический материал которых использовал В.А. Кутолин, действуют по единому правилу при отнесении породы к классу базальтов или долеритов. Эти объективные трудности в реализации применяемых методов приводят к тому, что при рассмотрении петрохимических особенностей базальтов разных формационных типов В.А. Кутолин не всегда получает желаемый результат. Существующие различия в кремнекислотности базальтов разных регионов определяют их несоответствие и в содержаниях других петрогенных окислов ( $MgO$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ), зависящих от содержания кремнезема. Оценивая применяемый В.А. Кутолиным и другими исследователями подход к решению задач классификации пород и магматических формаций с использованием дискриминантных функций, можно отметить следующее. Определение петрохимических особенностей и последующая классификация неизвестных объектов к одному из формационных типов (или конкретных формаций) с помощью дискриминантных функций имеет максимальную эффективность при выполнении некоторых условий. В первую очередь должна быть обеспечена возможность уверенного выделения из полных ассоциаций пород изучаемых объектов отдельных разновидностей и их наборов, соответствующих одинаковой стадии дифференциации. Необходимость в этом не требует доказательств, так как очевидно, что производные одного очага, но в разной степени дифференцированные, т.е. имеющие ряды дифференциации разной длины, и эродированные объекты имеют различные средние составы, обусловленные указанными факторами. Кроме того, и в данном случае петрохимические данные представляются в аппарате классификации с помощью модели случайной величины. Как уже отмечалось, это обстоятельство снижает информационную отдачу петрохимической информации, особенно в генетическом аспекте.

В данной ситуации уместно возвратиться к уже упоминавшимся методикам дискретизации ассоциаций пород формаций на фиксированные интервалы кремнекислотности, или породные группы. Не может ли подобный подход к организации петрохимической информации с последующим применением дискриминантных функций полностью удовлетворить решению приведенных ранее задач формационного анализа? Важность этой проблемы для дальнейшего изложения, а также выход в свет работ А.Ф. Белоусова и др. [3-6] определяют необходимость рассмотрения поставленного вопроса.



Дискретизация ассоциации пород формации фиксированными значениями содержаний кремнезема [1] без сомнения позволит повысить эффективность применения дискриминантных функций для классификации разновидностей пород одинаковой номенклатуры к одной из эталонных формаций. Однако при этом возникают некоторые проблемы. Наиболее известная, но пока не решенная проблема состоит в определении и обосновании оптимальности разбиения оси кремнекислотности на интервалы в аспекте набора задач сравнения и классификации парагенетических ассоциаций. В эту проблему входят следующие задачи: 1) определение длины интервала, которая должна выбираться с учетом как интенсивности перераспределения вещества в процессе, так и общей степени дифференцированности ассоциации; 2) установление точки начала отсчета при разбиении ассоциации на интервалы.

Другая проблема прямо связана с интерпретацией результатов применения дискриминантной функции к классификации объектов, каждый из которых подразделен на интервалы по содержаниям  $\text{SiO}_2$ . Вполне реальна ситуация, когда каждый из интервалов изучаемого объекта будет отнесен к разным эталонным формациям. В таком случае возможность формационной диагностики объекта в целом весьма затруднительна или нереальна вообще.

Разделение парагенетической ассоциации магматических объектов на породные группы основано на анализе гистограмм частоты встречаемости разновидностей пород. В данном случае разбиение осуществляется путем выявления естественных групп пород, соответствующих реализации автономных стадий выплавления. При таком подходе вопрос о длине интервалов кремнекислотности и начальной точке не возникает. Процедура соответствует предположению о дискретности процесса петрогенезиса и реализуется в четком соответствии с ним. Методика описания магматических формаций и их петрохимических особенностей, которая базируется на стадийности процесса петрогенезиса, самостоятельности этих стадий и отражающих эту стадийность породных группах, весьма эффективна [5, 6]. В то же время реализация задач классификации с применением математических методов и ЭВМ на основе подразделения ассоциаций магматических объектов на породные группы сопряжена с существенными трудностями. Индивидуальные особенности (возрастные и региональные) изучаемых формаций приводят к заметным различиям как в границах отдельных разновидностей, так и в протяженности ассоциаций пород по оси содержаний  $\text{SiO}_2$ . Подобные примеры известны даже для объектов одной формационной принадлежности. Кроме того, именно эти различия могут быть усилены степенью эродированности и доступности анализируемых объектов.

Следовательно, даже с учетом закономерных взаимоотношений содержания кремнезема и состава пород в целом далеко не всегда может быть обеспечена равная информационная представительность для породных групп классифицируемых магматических объектов.

В качестве примера подобной ситуации можно привести 95 %-ные квантили содержаний кремнезема [5]. Авторами приведены статистические оценки средних и стандартных отклонений для существенно базальтовых ассоциаций с субмелалапикритоидной и щелочно-салической группами пород. Для указанных ассоциаций геосинклинальных областей содержание кремнезема в базальтовой породной группе колеблется в пределах (в %): 50,4—66,4; 49,4—61,0; 45,9—62,1; 41,3—59,3; 45—63,5; 48,2—55,2; 45,5—58,5 и т.п. Разная протяженность по оси кремнекислотности приведенных представителей группы базальтов может быть обусловлена разным составом исходной магмы и характером процесса петрогенезиса. Другими словами, эти ассоциации имеют различную формационную принадлежность. Однако все приведенное разнообразие ассоциаций может быть обусловлено существенно различающимися условиями эродированности, обнаженности, сохранности и доступности всей истинно природной ассоциации. Причем во многих случаях мы можем иметь дело с одной и той же (в смысле формационного анализа) естественной ассоциацией. Однако совершенно очевидно, что сравнение формальными методами двух из перечисленных выше базальтовых групп, например со средними содержаниями  $\text{SiO}_2 = 58,38$  (интервал 50,4—66,4) и 50,32 (интервал 41,3—59,3), приведет к фиксации существенных различий в петрохимических составах ассоциаций. В то же время не исключена возможность, что данные ассоциации не различаются петрохимическими составами одинаковых по кремнекислотности пород. К сожалению, этот подход не обеспечивает проверки указанной возможности количественными методами.

Таким образом, применение двух рассматриваемых методов дискретизации ассоциаций пород для повышения эффективности классификации с помощью дискриминантных функций все же не в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым содержанием задач сравнения и классификации при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях.

В последние годы в публикациях, посвященных решению задач формационного анализа, для обоснования выводов широко используется метод главных компонент факторного анализа. В приложении к петрохимической информации наиболее часто используется вариант метода главных компонент, основанный на анализе ковариационной матрицы. Применение его позволяет преобразовать исходную информацию и выявить ассоциации петрогенных окислов, определяющие наибольшую изменчивость составов пород анализируемого объекта. Одним из широко распространенных и продуктивных способов интерпретации результатов, полученных с помощью метода главных компонент, является представление их в виде двумерных диаграмм. Причем в качестве координатных осей таких диаграмм используются главные компоненты. Визуальный анализ точечных диаграмм в координатах I—II, I—III, II—III и других компонент по взаимному положению в пространстве диаграммы отдельных фаз, объектов, комплексов и формаций дает возможность



оценить динамику изменения комплексных ассоциаций в изучаемом наборе магматических объектов. Следует отметить, что в данной ситуации несомненно полезным свойством является высокая степень наглядности подобных диаграмм. Это свойство метода главных компонент и, как следствие, возможность обобщений о характере изменения вещественных свойств в сложных магматических объектах наглядно демонстрируется в работах Л.Н. Дуденко, Г.Т. Скублова, М.Д. Белонина, И.Н. Голышко, Ю.Б. Марина, Н.А. Румянцевой и др.

При оценке перспектив применения метода главных компонент для анализа петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях необходимо учитывать следующее. Метод главных компонент представляет собой весьма эффективный и объективный способ преобразования петрохимических данных в наглядный вид для дальнейшего визуального анализа полученных результатов. Однако отсутствие количественных методов и критериев сравнения и классификации объектов не позволяет эффективно использовать данную методику для решения приведенных выше задач формационного анализа на базе петрохимической информации. В то же время она может быть использована при решении некоторых сопутствующих, но достаточно важных, методических задач (см. гл. 7) и, кроме того, с целью наглядной демонстрации результатов применения формальных методов сравнения и классификации при их интерпретации.

Естественно, что рассмотренными выше примерами не ограничивается применение математических методов анализа петрохимической информации. Не ограничивается петрохимической информацией и моделирование процессов петрогенезиса. Значительную роль при математическом моделировании процессов парагенезиса и выявления петрологических особенностей их проявления играет модель субэвтектоидного гранитообразования и сопряженных петрогенетических процессов, разработанная А.Б. Вистелиусом.

Моделирование процесса кристаллизации гранитной магмы с помощью процесса Марковского типа не только достаточно широко распространено среди специалистов-петрологов, но и нашло применение в других отраслях геологии. Построение модели кристаллизации гранитов и проверка соответствия ее наблюдаемым фактам осуществляется на основе изучения характера взаимного расположения зерен породообразующих минералов в линейных сечениях, представляющих общий объем тела. Несмотря на высокую обоснованность и разработанность методики анализа моделей Марковского типа, данное направление здесь детально не обсуждается вследствие нетривиальности перехода от минерального состава пород к петрохимическому их составу (см. выше). Отсюда явно следует наличие существенных трудностей при использовании модели Марковского процесса к анализу петрохимической информации.

Необходимо отметить роль и место петрохимической информации при определении перспективности территорий на основе приме-

нения автоматизированных систем прогнозирования. Разработка и использование автоматизированных систем прогноза являются весьма актуальными направлениями геологических исследований. Несмотря на существенную роль как формационного анализа магматических пород при оценке перспектив территорий с широким развитием проявлений магматизма, так и петрохимической информации для представления вещественного состава формаций, их применение в системах прогноза, как правило, ограничивается участием в информационном массиве лишь в виде отдельных признаков — числовых значений некоторых петрохимических характеристик.

В заключение необходимо акцентировать внимание на некоторых приведенных выше принципиальных положениях: 1) внедрение и применение математических методов и ЭВМ при анализе петрохимической информации в формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях магматических пород позволило существенно увеличить информационный вклад петрохимических данных в обоснование выводов; 2) объективно и эффективно могут быть решены такие важные задачи, как сравнение средних петрохимических составов изучаемых тел, комплексов и формаций. Аналогичное положение отмечается и для возможности сравнения и классификации отдельных разновидностей пород (породных групп); 3) достаточно хорошо разработана методика применения формальных процедур классификации объектов в целом и отдельных разновидностей пород (породных групп) по близости средних петрохимических составов.

В то же время в процедуре перехода от реальных объектов и петрохимической информации о составе и свойствах разновидностей пород, входящих в их парагенетические ассоциации, к математическим моделям и математическим методам решения задач сравнения и классификации происходит нежелательная утечка важной в рассматриваемых задачах магматической геологии информации. В данном случае имеется в виду та часть петрохимической информации, которая отображает в совокупности составов пород ассоциации процесс перераспределения вещества при формировании изучаемых объектов в наблюдаемом виде.

Учитывая исключительную важность информации об условиях проявления и характере процесса петрогенезиса, подобная утечка представляется в высшей степени нежелательной.

Анализ петрохимической информации на основе обобщенной модели процесса петрогенезиса не только позволяет использовать сведения о процессе становления изучаемых магматических объектов в совокупности петрохимических свойств разновидностей пород и их взаимоотношениях во всей наблюдаемой парагенетической ассоциации, но и определяет возможность применения этой генетической составляющей петрохимической информации в математических методах решения задач формационного и прогнозно-металлогенетического анализа магматических объектов. Обзор применяемых в настоящее время формальных методов обработки петрохимических данных наглядно демонстрирует необходимость как иного подхода к орга-



низации петрохимической информации и математическому моделированию ее, так и иных методов сравнения и классификации магматических объектов в свете решения задач формационного и прогнозно-металлогенического анализа.

### ГЛАВА 3

#### ЗАДАЧИ СРАВНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПО ПЕТРОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Вещественный состав пород объектов магматического происхождения представляет собой одну из основных характеристик, определяющих возможность индивидуализации, сопоставления, различения и классификации естественных геологических образований. Устойчивость петрохимических данных к влиянию эпигенетических процессов, а также их высокая информативность о характере и условиях проявления процессов петрогенезиса и числовое выражение признаков определяют предпочтительность использования петрохимической информации в математическом решении типовых задач с привлечением вещественных свойств изучаемых объектов.

Практически все исследования по формационному анализу магматических пород и их металлогенической специализации в качестве основной составляющей в обосновании выводов используют результаты анализа соотношений вещественных свойств пород изучаемых объектов. В то же время при обобщенном анализе существующих постановок задач и методов их решения, используемых при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях с применением петрохимических данных, было указано (см. гл. 2), что по содержанию смысла решаемых задач и принципам математического моделирования информации об исследуемых объектах, известные из литературы подходы не слишком разнообразны.

Однако следует учитывать, что расширение области применения в геологической науке и практике формационного анализа в качестве основы для прогнозно-металлогенических обобщений предъявляет к системе анализа петрохимических данных все более высокие требования. Причем эти требования направлены на повышение информационной отдачи петрохимических данных и их анализа при решении базовых задач формационных и прогнозно-металлогенических исследований. Необходимо указать, что здесь и далее содержание задач формационных и металлогенических исследований рассматривается в аспекте анализа вещественных свойств изучаемых магматических объектов.

Сформулируем основные и наиболее типичные задачи формационного анализа магматических пород, при решении которых существенную роль играет анализ вещественных свойств пород объектов. Основной акцент сделан на соответствие задач анализа петрохимической информации содержанию смысла соответствующих задач формационного изучения магматических образований.

Определения терминов "магматическая формация" и "формационный анализ", а также результаты формационных исследований разнообразных магматических образований с достаточной четкостью свидетельствуют, что базовая единица формационных исследований (фаза, тело, комплекс) в подавляющем большинстве случаев рассматривается как цельный и индивидуализированный объект. При этом в явном или завуалированном виде предполагается, что данный единичный объект обусловлен проявлением одного петрогенетического процесса с характерными для конкретного участка пространства и геологического времени условиями магмагенерации и функционирования. Однако в формационном анализе первым уровнем обобщения можно считать конкретную формацию (в понимании Ю.А. Кузнецова), которая представляет собой класс близких (в соответствии с принятым пониманием содержания термина "формация") единичных магматических объектов. Несмотря на разнообразие определений термина "магматическая формация" и представлений о необходимых и достаточных признаках для объединения объектов в один класс (формацию), можно указать ряд признаков, участвующих в той или иной формулировке практически во всех определениях этого термина и представлениях о соотношениях свойств объединяемых в нее объектов.

К таким признакам в первую очередь следует отнести пространственно-временное положение объектов: время проявления процесса петрогенезиса, в частности принадлежность к одному тектономагматическому циклу (фазе тектогенеза), и пространственная близость объектов, которая непременно включает принадлежность к одной структурно-фациальной зоне. Кроме того, неизменным условием отнесения индивидуализированных магматических тел к одной формации является близость фациально-петрографических особенностей ассоциаций пород объектов. Этот признак принадлежности объектов к одной магматической формации можно интерпретировать как требование близости петрохимических особенностей пород изучаемых объектов.

Признаки, определяющие принадлежность индивидуализированных объектов к одной формации, с достаточной определенностью свидетельствуют, что объединение магматических объектов (фаз, тел, комплексов) в одну формацию предполагает генетическую общность (по крайней мере в части типичности для данной конкретной формации условий магмагенерации и проявления процессов петрогенезиса). Это предположение в явном виде присутствует в определениях термина "магматическая формация" Ф.Ю. Левинсон-Лессинга, Ю.А. Билибина, Г.Д. Афанасьева, Е.К. Устиева и др. Однако те определения этого термина, в которых генетический аспект в явном виде отсутствует, ни в коей мере не исключают его, сохраняя приведенные выше признаки объединения объектов в одну формацию. Действительно, одновременность и единство структурного положения, сходство фациально-петрографического состава, если



не являются непосредственным доказательством происхождения составляющих формации из одного магматического очага, как в определениях указанных выше авторов, то с достаточной убедительностью позволяют предполагать близость условий магмагенерации и проявления процессов становления объектов. Логическим основанием для правомочности этого предположения является не только необходимость, но и продуктивность тектоно-магматических реконструкций и моделирования геологической истории вообще на основе формационного анализа продуктов магматизма. Подобные реконструкции базируются на объективной закономерности существования в одной структурно-фациальной зоне и в один и тот же временной (причем, узкий) интервал ее развития принципиально однотипных и типичных условий зарождения и функционирования петрогенетических процессов.

Таким образом, базовым признаком принадлежности магматических объектов (тел, фаз, комплексов) одной конкретной формации является формирование их в однотипных тектоно-магматических условиях. Именно этот фактор отображен в наблюдаемых сходных пространственно-временных соотношениях, а также близких фациально-петрографических и, как следствие, петрохимических особенностях пород ассоциаций, слагающих изучаемые объекты. В то же время некоторая, возможно излишняя, категоричность приведенных представлений о существе формационного анализа обусловлена спецификой настоящей работы, требующей при переходе к формальному аппарату бóльшей, чем при геологическом стиле изложения, определенности в содержании употребляемых терминов.

Очевидно, что в процедуре формационного анализа магматических образований существенную помощь могут оказать математические методы анализа петрохимической информации. Основанием этому служит положение об отображении условий проявления процесса формирования — типичных для конкретной изучаемой магматической формации — в наблюдаемых вещественных свойствах ассоциации пород объекта.

Выше определены наиболее распространенные и типичные формулировки задач определения сходства-различия петрохимических особенностей пород изучаемых магматических объектов. Наиболее близкими к рассмотренным представлениям о содержании задач анализа петрохимической информации при формационных исследованиях являются, во-первых, задача сравнения и классификации объектов по близости (равенству) средних петрохимических составов ассоциаций пород объектов в целом и, во-вторых, сравнение и классификация по близости средних петрохимических составов отдельных разновидностей пород, принадлежащих одинаковым по кремнекислотности интервалам (породным группам).

В основу первой формулировки положены вполне естественные и непротиворечащие рассмотренным выше представлениям положения о близости условий формирования объектов одной конкретной фор-

магии. В самом деле, если каждый из объектов одной формации формировался в близких тектоно-магматических условиях развития данного региона, то средний петрохимический состав пород, определенный по всему объему каждого объекта, должен быть наиболее близким среди всех однотипных образований или даже одинаковым. Естественно, что данное заключение следует принять с поправкой на возможные локальные и по предположению несущественные различия, которые в данной задаче могут быть отнесены к случайным флуктуациям. Именно это представление реализовано Е.К. Устиевым при сопоставлении средних объемных петрохимических составов вулканических и интрузивных составляющих единой вулканоплутонической формации.

С этих позиций задача сравнения средних петрохимических составов магматических тел для объединения их в одну формацию вполне соответствует существу представлений о содержании анализа вещественных свойств магматических объектов при их формационном анализе. Однако по объективным причинам при решении этой задачи в реальных условиях далеко не всегда можно обеспечить необходимую уверенность в правильности полученного при сравнении объектов результата. Причины этого следующие. В большинстве реальных ситуаций исследователь не имеет возможности получить информацию о вещественном составе пород объекта во всем его объеме. В лучшем в его распоряжении имеется одно сечение изучаемого тела, иногда дополненное точечными данными о более глубоких горизонтах, полученными при бурении скважин. Причем, как правило, глубина скважин явно недостаточна по степени проникновения, а плотность их расположения по площади не обеспечивает возможности уверенного суждения о характере распределения во всем объеме тела разновидностей пород с различным составом и их соотношений в трехмерном пространстве.

Обычной является ситуация, когда изучению и опробованию доступна лишь часть объекта, выходящая на дневную поверхность. Однако и эта возможность часто ограничена лишь обнаженными участками, в то время как остальная часть перекрыта рыхлыми или более поздними отложениями. В этом наиболее распространенном случае возможность получения информации об объеме строения изучаемого объекта еще более ограничена. Кроме того, при сравнительном изучении хотя бы двух объектов по результатам опробования доступных наблюдению и изучению участков выхода их на поверхность исследователь практически никогда не может быть уверен, что наблюдаемое в этих разобщенных обнажениях соотношение разновидностей пород отвечает их соотношениям в идеальном объеме объекта. Естественно предположить, что наблюдаемые соотношения разновидностей являются следствием случайных (для процесса формирования объекта) причин, обусловленных различными для сопоставляемых объектов процессами эрозии, денудации и накопления рыхлого покрова.



В связи с этим сравнение средних петрохимических составов объектов в целом существенно лимитируется условиями получения информации о полном объемном строении объекта и, кроме того, не может обеспечить уверенность в соответствии результатов сравнения природной реальности. Причиной этого является практически неизбежная возможность несовпадения уровня эрозийного среза изучаемых тел, условий их обнаженности и опробования.

При решении подобной задачи для определения близости средних петрохимических составов объектов, предположительно принадлежащих одной вулканоплутонической формации, к указанным выше сложностям добавляется еще одна, аналогичная по результату, но обусловленная достаточно типичным несовпадением степени дифференцированности магматического материала при становлении интрузивной и вулканической составляющих.

Естественно, что в реальных ситуациях на результат применения методов сравнения средних петрохимических составов изучаемых объектов существенно влияют рассмотренные выше факторы. Это влияние практически не поддается контролю. Оно порождено расхождением представления исследователя об объекте и реально существующих объемных соотношений разновидностей пород в идеальном теле. Если учесть, что в двух сравниваемых объектах это несовпадение наблюдаемых и природных соотношений может быть существенным, становится очевидной необходимость осторожного отношения к результатам сравнения средних петрохимических составов формальными методами. Кроме того, существование четкой зависимости содержания всех петрогенных окислов от содержания кремнезема (так называемый нормальный петрохимический тренд [1]) определяет зависимость вычисленных по выборочным данным средних петрохимических составов объектов от степени их дифференцированности, эродированности и обнаженности. Отсюда следует возможность искусственных, порожденных указанными причинами, различий в средних петрохимических составах сравниваемых объектов, принадлежащих одной конкретной формации и (или) даже одному магматическому очагу.

С учетом важности металлогенических построений, базирующихся, как правило, на результатах формационного анализа, и возможности выводов, соответствие которых реальным соотношениям вещественных свойств объектов не поддается контролю, формулировка задачи о равенстве средних петрохимических составов и методы ее формального решения не отвечают в должной мере содержательному смыслу анализа петрохимических данных в формационных и прогнозно-металлогенических целях. Особенно правомерен этот вывод в отношении генетической нагрузки петрохимической информации и генетического аспекта выводов.

Сравнение петрохимических особенностей ассоциаций пород при дискретизации их на интервалы кремнекислотности (разновидности, породные группы) в определенной степени снижает нежелательный

эффект некоторых из указанных факторов. Подобный подход при достаточно узких интервалах кремнекислотности практически исключает влияние петрохимического тренда на результаты сравнения. Однако в данной ситуации ассоциация пород объекта уже не представляет собой цельного природного образования. Каждая часто узкая по интервалу колебаний содержания  $\text{SiO}_2$ , разновидность пород в рассматриваемой постановке задачи сравнения представляет в формальном аппарате и, естественно, в выводах как объект, абсолютно изолированный от других разновидностей пород данной ассоциации.

Подобное разделение природной ассоциации, которая по устоявшейся в петрологии точке зрения представляет собой единый ряд дифференциации магматического расплава (или, что аналогично, ряд последовательных преобразований вещества при метасоматической природе процесса), методологически оправдано с позиций популяционной модели и представления о породных группах [3—6]. А.Ф. Белоусов связывает формирование каждой породной группы с деятельностью самостоятельных магматических очагов котектического, в среднем, состава расплавленного материала. Индивидуализация породных групп предусматривает анализ частот распределения разновидностей пород и разные, а в некоторых случаях значительные по размаху (например, группа базальтов) интервалы кремнекислотности принадлежащих данной группе разновидностей пород. В этом случае, естественно, необходим учет петрохимического тренда, так как влияние его в подобных по размаху интервалах кремнекислотности на содержания остальных петрогенных окислов существенно.

В работах И.И. Абрамовича [1] подобное методологическое обоснование не приводится, и подразделение ассоциации пород объекта на разновидности осуществляется априорно заданными значениями содержаний  $\text{SiO}_2$ . По этой причине сравнение петрохимических особенностей ассоциаций пород объектов по результатам дискретизации их априорно заданными интервалами кремнекислотности для целей формационных исследований представляется недостаточно оправданным. Основанием для этого вывода служит невозможность обосновать по результатам сравнения средних петрохимических составов отдельных разновидностей заключение о сходстве или различии петрохимических особенностей пород ассоциаций изучаемых объектов в целом. Другими словами, полученный подобным способом результат не позволяет с достаточной уверенностью ответить на основной вопрос: можно ли считать сравниваемые объекты по вещественным особенностям всех разновидностей пород ассоциаций принадлежащими одной конкретной магматической формации или нет?

Сложности применения и интерпретации результатов, аналогичные рассмотренным выше, возникают при применении математических методов решения задачи классификации объектов по близости среднего петрохимического состава слагающих их пород. Основ-



ная причина этого — недостаточная обоснованность имеющимся в распоряжении исследователя фактическим материалом объемного представления об изучаемых объектах. Следствием этого является возможность случайных и неконтролируемых результатов применения формального аппарата классификации.

В последние годы для анализа петрохимических данных при формационных исследованиях широко применяется факторный анализ, а частности, одна из его разновидностей — метод главных компонент. Наиболее типичной задачей, решаемой с помощью этого метода, является наглядное изображение динамики изменения петрохимических особенностей пород ряда объектов (тел, комплексов, формаций) в координатах главных компонент. Причем в данной ситуации главные компоненты представляют собой модели типичных для данного ряда объектов ассоциаций петрогенных окислов.

Удобным свойством метода является возможность числового определения вклада каждой из ассоциаций в общую изменчивость петрохимических свойств объектов. Результаты применения факторного анализа используются для визуальной оценки динамики изменения признаков в латеральном или возрастном аспектах. В некоторых важных аспектах анализа петрохимических данных применение метода главных компонент факторного анализа является эффективным и перспективным (см. гл. 7). Однако отсутствие количественной меры анализа изображенной на диаграмме картины соотношения объектов не позволяет относить рассматриваемую методику к количественным методам анализа петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях.

Приведенный выше анализ постановок задач анализа петрохимической информации в формационных исследованиях магматических пород ни в коей мере не имел своей целью противопоставление широко применяемых методов. Очевидно, что в ряде реальных ситуаций решение задач сравнения и классификации в указанном выше виде не только возможно, но и целесообразно. В этой связи необходимо отметить, что в первую очередь следует акцентировать внимание на тех сложностях применения формальных методов, которые могут возникнуть при анализе реальных объектов и, следовательно, должны быть учтены при интерпретации полученных результатов. Кроме того, опыт применения математических методов к анализу петрохимических данных свидетельствует, что решение некоторых важных и распространенных задач (определение обоснованности объединения эффузивных и интрузивных образований в одну вулканоплутоническую формацию, сравнение и классификация объектов при заведомо разной их эродированности и обнаженности, установление различий и построение правила для количественной классификации объектов одной формационной принадлежности, но разной металлогенической специализации) на базе рассмотренных выше постановок недостаточно эффективно. Все это и обусловило необходимость поиска иной постановки задач для анализа петрохи-

мических данных формальными методами. Направление поиска определило учет указанных выше осложняющих изучение реальных объектов условий и необходимость количественного решения прогнозно-металлогенических задач.

Методологические принципы рассматриваемой ниже формулировки задач сравнения и классификации объектов по близости петрохимических особенностей ассоциаций пород непосредственно следуют из приведенной ранее обобщенной модели петрогенезиса и известных в петрологии представлений.

Вся история развития петрологии представляет в виде бесчисленных попыток в том или ином виде оценить, представить и моделировать характерные черты петрогенезиса. С реакционных серий Боуэна до многокомпонентных физико-химических диаграмм петрологии на основе различных принципов и разнообразных посылок используют вещественные характеристики в качестве информационной основы для построения эвристических моделей процесса изменения вещества в период становления исследуемого магматического тела (тел, массивов, комплексов, формаций). Многочисленные петрологические работы базируются на посылке (в явном или неявном виде), что в процессе становления интрузивных тел происходит последовательное изменение их вещественных характеристик. Благодаря широкому внедрению физико-химических и экспериментальных методов в теоретическую петрологию справедливость этой посылки подтверждена экспериментально и доказана для достаточно широкого круга исходных предположений, в частности, работами Г. Йодера, К. Тилли, Г. Уэджера, Л. Брауна, А. Рингвуда, Д. Грина, А.А. Маракушева, Л.Л. Перчука, П.В. Ившина и др.

Сложившиеся в петрологии представления свидетельствуют о том, что в реальных объектах наблюдается закономерная изменчивость свойств пород и что она определена динамикой признаков в процессе их формирования. Именно поэтому она должна быть использована для оценки характера процессов. Естественно, что в настоящей работе имеется в виду отображение процессов формирования в вещественных (в основном, петрохимических) свойствах пород изучаемых объектов. Эти признаки в петрологии являются основой для построения диаграмм различного вида (диаграммы Заварицкого, Харкера, Ларсена, Шеймана, Фрезера, Кураты, Симпсона, Куно, Пальдерваарта, Бородина, Кутolina, Виленского и т.п.). Причем вариационные кривые на таких диаграммах квалифицируются как оценки характера процесса становления рассматриваемого объекта, выраженные через наблюдаемые вещественные характеристики. Следовательно, отмеченная в магматических объектах закономерная изменчивость свойств пород объектов и существующие в петрологии представления о возможности ее генетической интерпретации могут быть охарактеризованы в интересующем нас смысле следующим образом: закономерная изменчивость свойств разновидностей пород, составляющих парагенетические ассоциации магма-



тических объектов, представляет собой количественно измеримую информацию об условиях проявления и характере петрогенетических процессов и служит основой построения моделей процессов их формирования с помощью диаграмм или каким-либо другим способом.

Следствием из приведенного положения является возможность построения на основе информации о составе пород моделей закономерного изменения признаков в процессе формирования магматических объектов. Однако возможность моделирования процессов на базе закономерно изменяющихся составов пород парагенетических ассоциаций представляет собой необходимое, но не достаточное условие решения рассматриваемых в работе задач.

Вне зависимости от способа моделирования петрогенетических процессов (с помощью диаграмм, физико-химических моделей, математического аппарата) постоянными остаются цель и методологический принцип: все наблюдаемые свойства магматического объекта, в том числе и характер закономерной изменчивости составов слагающих его разновидностей пород, обусловлены совокупностью условий проявления и характером процесса его формирования.

Опыт моделирования петрогенетических процессов свидетельствует о том, что невозможно установить однозначное соответствие каждого из наблюдаемых свойств объекта и тектоно-магматического условия, определяющего его появление и характер. Невозможно также по наблюдаемому набору свойств объекта воссоздать полную картину тектоно-магматической обстановки в геологический момент проявления процесса формирования изучаемого объекта. В данном случае автор согласен с точкой зрения А.Ф. Белоусова, который считает, что петрохимическая информация о составах пород и их ассоциациях для изучаемого объекта сама по себе не позволяет утверждать что-либо о конкретных петрологических факторах. Можно говорить лишь, что петрохимия магматических пород отражает результат магматического фракционирования в целом [5]. Отсюда очевидно, что построение теоретических моделей процесса петрогенезиса для каждого изучаемого объекта с воссозданием конкретных петрологических факторов и специфики условий их реализации практически неосуществимо. Существенно более продуктивным представляется построение обобщенных моделей петрогенезиса путем типизации магматических объектов по близости процессов их формирования в аспекте конкретной проблемы формационного, прогнозно-металлогенетического анализа и т.д.

Возможность типизации магматических объектов относительно характера процессов их формирования в настоящее время существует лишь в условиях четко сформулированных целей проводимых исследований. В связи с этим процедура типизации петрогенетических процессов должна быть методологически специализирована на те особенности условий проявления процессов, которые определяют необходимые в конкретной проблеме свойства магматических тел (комплексов, формаций).

Резюмируя приведенные выше достаточно тривиальные положения, можно определить представления о геологическом и, в частности, петрогенетическом процессах. Рассмотренную модель процесса петрогенезиса можно обобщить на весь возможный класс геологических процессов следующим образом. Все без исключения объекты эндогенного происхождения являются результатом проявления неизвестного числа процессов, протекающих в земной коре. Среди множества процессов, участвующих в формировании геологического тела (в широком смысле слова), всегда можно выделить один ведущий. Геологические процессы протекают в геометрическом (географическом) пространстве, в физическом (или в геологическом, в понимании И.В. Круть) времени, а также в пространстве вещественных признаков. Для простоты, но без ограничения общности, примем, что формирование наблюдаемого геологического тела можно приписать действию одного определенного процесса. Все это в равной мере относится и к петрогенетическим процессам. Здесь не рассматриваются все известные и возможные петрологические модели процессов формирования магматических объектов.

Необходимо указать, что сформулированный принцип не накладывает никаких ограничений на принадлежность процесса формирования изучаемого объекта какому-либо конкретному петрологическому типу. Существенно лишь, что концепции исследователя не противоречат следующим, достаточно общим представлениям об условиях проявления и характере петрогенетических процессов: 1) условия петро- и рудогенеза при формировании магматического объекта представляют собой единую систему тектоно-магматических факторов, определяющую совокупность свойств пород магматического тела (комплекса, формации), а также характер ассоциированных с ним проявлений процессов рудообразования; 2) реализация петрогенетического процесса осуществляется при непрерывном функциональном изменении составов последовательно формирующихся разновидностей пород в соответствии с динамикой определяющих петрогенезис и рудообразование факторов. Последнее положение требует пояснения. Проявление процессов с полициклическим или разрывным характером функционирования, что особенно типично для процессов становления вулканических толщ, не исключает принятого представления о процессе петрогенезиса. Принципиальным в данном случае является лишь допущение о существовании при проявлении процесса периодов времени, для которых требование непрерывности выполняется. В подобной ситуации именно результаты функционирования процесса в непрерывном режиме и являются объектом исследований.

Таким образом, в качестве рабочей принимается модель петрогенезиса, при которой вещественные характеристики продуктов процесса изменяются непрерывно, что отобразено в последовательной смене составов разновидностей пород парагенетической ассоциации объекта. Это представление о петрогенетическом процессе



служит основанием для принципиального положения: функциональное изменение компонентов в период реализации процесса формирования магматического объекта достаточно полно отображено в характере закономерного изменения признаков в магматической серии данного объекта. Следовательно, совокупность свойств магматической серии представляет собой наиболее полную и точную модель (из возможных эмпирических моделей процесса формирования конкретного объекта) функционального изменения признаков в петрогенетическом процессе, обусловленного конкретными тектономагматическими условиями его проявления.

Обобщение этого положения на более широкий класс петрогенетических процессов требует определения правомочности его применения при допущении иного, чем собственно магматический, пути формирования объектов, относящихся к магматическим в широком смысле слова. С позиций рассматриваемой в работе проблемы вполне сопоставимы представления сторонников и противников магматической дифференциации о зависимости состава разновидностей пород от времени их формирования в данном процессе. Так, Д. Рейнольдс считает, что процессы гранитизации для какой-либо точки пространства осуществляются с нарастающей степенью метасоматических изменений состава продуктов. Последняя фиксируется степенью преобразования исходной породы. С увеличением интенсивности процесса гранитизации происходит закономерный рост содержания  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и снижение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Определенность и направленность этих преобразований имеет функциональный характер, и даже количественные признаки этих преобразований (в основном в виде соотношений) вполне определимы. Очевидно, что сформулированный выше методологический принцип моделирования функционального изменения вещества в процессе петрогенезиса в полной мере применим и при другой, не магматической природе петрогенетического процесса.

Таким образом, в работе принято, что вне зависимости от петрологической природы процесса наблюдаемая закономерная изменчивость свойств разновидностей пород в магматической серии изучаемого объекта отображает функциональное изменение составов разновидностей пород, последовательно формирующихся в процессе петрогенезиса. Следует указать, что приведенные выше положения принципиально не отличаются от общепринятых петрологических представлений.

Наибольшей трудностью при моделировании петрогенетических процессов, особенно с применением математического аппарата, является идентификация каждой разновидности пород и соответствующего ее формированию временного состояния процесса. Ниже предлагается способ оценки значений временной координаты, соответствующих конкретным разновидностям пород, который обеспечивает организацию информации в магматическую серию.

Естественно, что моделирование и анализ моделей петрогенетических процессов в координатах физического времени, если и могут

иметь место, то в весьма ограниченном числе реальных ситуаций. В петрологических исследованиях, как правило, физическое время заменяется относительным (геологическим, по И.В. Круть), которое позволяет упорядочить продукты изучаемого процесса, используя соотношение "раньше—позже". В качестве примера подобных временных соотношений можно привести работы, посвященные изучению многофазных интрузий, вулканогенных комплексов и т.п. В таком случае с определенной долей уверенности можно указать какой из двух элементов объекта сформировался раньше, а какой — позже. Но практически никогда нельзя установить протяженность временного интервала, отделяющего время образования этих элементов (фаз, стадий, потоков и т.п.). В связи с невозможностью применения координаты физического времени для моделирования процесса перераспределения вещества при становлении объекта прибегают к использованию косвенных оценок координаты времени. Там, где возможно, используются пространственные координаты (в частности, при изучении расслоенных интрузий). В петрологии наиболее часто применяются координатные оси, основанные на соотношениях признаков, составляющих вещественную характеристику объекта.

В соответствии с моделью геологического процесса все конкретные результаты опробования и анализа вещественных характеристик пород объекта представляют собой набор эмпирических данных о вещественных свойствах продуктов различных состояний процесса формирования объекта. В связи с этим в случае ярко выраженной закономерной изменчивости свойств пород для оценки характера процесса эмпирическая информация об их составных должна быть упорядочена в последовательность. Организация информации в последовательность осуществляется в соответствии с временными соотношениями разновидностей пород, рассматриваемых как результат реализации последовательности состояний петрогенетического процесса. Последовательность разновидностей пород, упорядоченная по относительному времени формирования, определяется термином "магматическая серия". Однако в некоторых реальных ситуациях информация о временных соотношениях пород может отсутствовать, поэтому эмпирические данные могут быть упорядочены в соответствии со значениями любого из индексов, заменяющих оценку времени.

Трудности формирования магматических серий в реальных ситуациях предусматривают необходимость определения возможности и принципов выбора параметра, применяемого в качестве ранжирующего при организации магматических серий — моделей процесса становления магматических объектов.

Организация последовательности разновидностей пород, которая наиболее точно отражает относительное время их формирования в процессе становления объекта в наблюдаемом виде, представляется наиболее важной с общегеологических и особенно генетических позиций при решении формационных и прогнозно-металлогенетических задач. Возможность организации и необходимые свойства после-



довательности разновидностей пород подобного характера целиком зависят от подбора параметра (признака, компоненты), определяющего структуру этой последовательности. Выбор подобного параметра в петрологии и геологии не представляет собой неразрешимой проблемы. Можно назвать ряд индексов и показателей, которые дают возможность установить последовательность разновидностей пород, отражающую общую направленность дифференциации магматического расплава. Наиболее распространенными являются содержание кремнезема (диаграммы Харкера), индекс дифференциации Торнтона и Таттла, кристаллизационный индекс Польдерваарта и Паркера, индекс затвердевания Куно, коэффициент фракционирования Уэджера и Дира, индекс кислотности магм Бородина, параметр  $Q$  Заварицкого, коэффициент степени дифференциации Кутolina. К тому же классу параметров относится также коэффициент распределения  $K_i$  — показатель дифференциации, основанный на фракционировании малых элементов и успешно применяемый для моделирования динамики их поведения в процессе петрогенезиса. Подобный подход и показатель  $K_i$  служат основой для построения моделей процесса перераспределения редких и малых элементов при петрогенезисе и для обоснования выводов в работах П. Гаста, С.М. Кравченко, Д. Шоу, С. Аллегре, Дж. Минстера и др. Кроме того, к классу параметров подобного содержания следует отнести показатель степени гранитизации П. Лападю-Арга, который отражает временные соотношения разновидностей пород и строится в предположении о метасоматической природе процесса гранитообразования.

В последние годы, особенно в связи с внедрением математических методов в геологии, широкое распространение получил метод оценки временной координаты при построении моделей процесса петрогенезиса с применением различных вариантов факторного анализа, в частности метода главных компонент. Сущность этой методики основана на выявлении направления наибольшей изменчивости признаков и использование его (в виде линейной комбинации признаков) в качестве оценки временной оси процесса. При этом этому параметру ставятся в соответствие определенные петрологические и физико-химические свойства условий проявления изучаемого процесса. Так, в работах И.Н. Гольинко, В.В. Груза, Б.А. Марковского, Л.Н. Дуденко, Г.Т. Скублова и других первая главная компонента, вычисляемая при анализе ковариационной матрицы, интерпретируется как показатель кислотно-основного взаимодействия. Правомочность рассмотренных и подобных подходов не вызывает сомнений, как и эффективность их применения для решения конкретных задач магматической геологии.

Приведенные подходы к оценке временной оси для моделирования процессов петрогенезиса свидетельствуют, во-первых, о принципиальной возможности такой оценки и, во-вторых, о правомочности представления эмпирической информации в виде последовательности, отражающей последовательность формирования разно-

видностей пород в процессе становления изучаемого объекта (магматической серии).

Необходимо остановиться на некоторых особенностях выбора параметра (аргумента), организующего информацию в магматическую серию. Если существует геологически оправданная возможность ранжирования информации по относительному времени формирования разновидностей, то в соответствии с петрологическими представлениями и спецификой конкретной задачи в качестве ранжирующего параметра можно использовать один из известных индексов (содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $DI$ ,  $CI$ ,  $SI$ ,  $K_f$ ,  $Ac$  и т.п.). Однако нередко возникает ситуация, когда по каким-либо причинам подобная возможность отсутствует. В таких случаях представляется эффективным применение метода главных компонент, однако в ином, чем указанный выше, аспекте. Прежде чем обсуждать этот вопрос, необходимо сформулировать требования к параметру, организующему информацию в магматическую серию. Эти требования должны обеспечивать решение задач типизации условий проявления петрогенезиса и рудообразования по близости функционального изменения признаков в процессе. Первое требование явно следует из существа задачи: изменению значений такого параметра должно соответствовать функциональное изменение признаков. Нет сомнения, что все параметры, отражающие относительное время формирования разновидностей, отвечают этому требованию. Второе требование следует из необходимости классификации изучаемых объектов по характеру закономерного изменения признаков, следовательно, параметр должен обеспечивать возможность сравнения характеристик объектов, т.е. должен существовать общий для всех классифицируемых (типизируемых) объектов интервал значений параметра, выбираемого в качестве аргумента процесса их формирования.

С учетом указанных требований преобразование информации с помощью метода главных компонент, ориентированное на поиск ранжирующего параметра, должно способствовать определению линейной комбинации признаков, обладающей следующими свойствами: сохранением закономерного измерения признаков в координатах его значений и наличием интервала одинаковых значений параметра для всех изучаемых магматических объектов (см. гл. 7).

Таким образом, информационной основой решения задач типизации магматических объектов по близости условий проявления процессов петрогенезиса и ассоциированного с ними рудообразования является магматическая серия. Информация о вещественных войствах пород магматических объектов, функциональное изменение которых в процессе формирования представлено в магматических сериях, может быть организована с помощью любого из соответствующих сформулированных выше требований параметра (аргумента).

Информация о количественных значениях вещественных признаков магматических объектов не свободна от случайных флуктуа-



ций. Причем к суммарной погрешности обработки проб и их анализа необходимо добавить флуктуации значений вещественных признаков, порожденные случайными колебаниями локальных условий формирования объекта в момент реализации каждого временного состояния процесса.

Последовательность наблюдений над вещественными свойствами пород объекта, ранжированная по координате относительного времени (или заменяющему его индексу), представляет собой эмпирическую модель перераспределения вещества в процессе формирования объекта. Конкретные значения вещественных характеристик в точках наблюдения данной последовательности представляют собой сумму двух составляющих: положения траектории закономерной изменчивости признаков, определяемой конкретными условиями проявления процесса формирования объекта, и случайных флуктуаций, обусловленных указанными выше причинами.

В заключение можно сформулировать следующий методологический принцип: совокупность свойств разновидностей пород и их закономерная изменчивость в магматической серии однозначно (с точностью до случайных флуктуаций) отображают функциональное изменение вещественных признаков в период реализации петрогенетического процесса, определяемое конкретными тектоно-магматическими условиями его проявления и закодированное природой в структуре, составе и свойствах парагенетической ассоциации магматического объекта. Необходимо пояснить выражение "однозначно отображает". В аспекте формационных и прогнозно-металлогенетических задач типизация процессов по близости условий их проявления возможна лишь при допущении правомочности следующего предположения: совокупность условий проявления конкретного процесса приводит к формированию объекта с магматической серией, отвечающей только данным тектоно-магматическим условиям реализации процесса петрогенезиса. Именно это положение характеризует принципиальную основу рассматриваемой методики, которая аргументируется результатами решения конкретных задач и их генетической интерпретацией. Вполне закономерен вопрос о правомочности генетической интерпретации результатов при широко проявленных в геологии явлениях конвергентности.

Проблема конвергентности возникает при изучении объектов в фиксированном на наблюдаемый момент времени состоянии. Действительно, структура, состав и особенности объекта (например, гранитного массива), наблюдаемые в настоящий момент, могут быть обусловлены различными по природе и характеру петрогенетическими процессами и (или) разными источниками расплавленного материала (или преобразованием разных по составу исходных пород). На протяжении многих лет продолжается дискуссия между сторонниками собственно магматической и метасоматической природы гранитообразования. Причем часто объектами спора служат одни и те же гранитные массивы (комплексы).

Можно утверждать, что сравнительный анализ магматических

тел (комплексов, формаций), основанный на сопоставлении магматических серий как моделей процессов их формирования, практически свободен от необходимости введения поправок на возможность конвергентных ситуаций (см. ниже). Совпадение состава и свойств всех разновидностей пород (от диорита до аляскита), последовательно формирующихся на одинаковых по относительному времени реализации состояниях петрогенетических процессов, вряд ли может быть интерпретировано с привлечением эффекта конвергентности.

Из приведенного выше изложения очевидно, что наиболее важными являются следующие методологические принципы информационного обеспечения проблемы типизации процессов петрогенезиса: 1) наиболее полная, доступная изучению количественно измеримая информация об условиях проявления и характере петрогенетических процессов содержится в совокупности и закономерных соотношениях свойств сформированных ими ассоциаций пород магматических объектов; 2) закономерное изменение составов разновидностей пород в магматической серии наиболее точно отображает функциональное изменение признаков в петрогенетическом процессе, обусловленное особенностями конкретных тектоно-магматических условий проявления процессов петрогенезиса и ассоциированного с ними рудообразования.

Из определения магматической формации и существа формационного анализа магматических образований, сформулированных и применяемых в работах Ю.А. Кузнецова, Э.П. Исоха и др., известно, что одним из основных признаков принадлежности объектов одной магматической формации (в вещественном выражении) является близость объема, структуры и свойств слагающих их парагенетических ассоциаций. На этом основании принципиальная основа формационного анализа формулируется как классификация магматических объектов по близости совокупности свойств парагенетических ассоциаций, которая отражает объективное существование классов петрогенетических процессов, неразличимых по характеру и условиям проявления. Классы петрогенетических процессов в свою очередь являются отражением типичности тектоно-магматических обстановок на однотипных стадиях геологической истории развития регионов.

Однако богатый опыт изучения магматических объектов, накопленный магматической геологией, свидетельствует о том, что часто встречается ситуация, когда принадлежность одной магматической формации не исключает существенно различного проявления (как по типу, так и по интенсивности) ассоциированного рудообразования. Представление о единстве процессов петро- и рудогенеза определяет необходимость выявления более тонких, чем при формационном анализе, особенностей условий проявления процессов формирования магматических объектов.

Многофакторность влияния конкретных тектоно-магматических



условий и принципиальная невозможность восстановления всех факторов и степени их влияния на совокупность наблюдаемых свойств объектов оставляют мало надежд на возможность моделирования процессов формирования для каждого магматического объекта. Примеры моделирования некоторых классов процессов петрогенезиса свидетельствуют о принципиальной возможности восстановления некоторых наиболее существенных черт совокупности условий петрогенезиса, определяющих наблюдаемый облик объектов.

Однако существующий уровень знаний о глубинных процессах, а также обеспеченность экспериментальной петрологии соответствующей техникой и ее возможности не позволяют надеяться в обозримом будущем на выявление с помощью аппаратного моделирования причин и факторов, обусловивших различную рудоносность объектов одной формации. Хотя совершенно очевидно, что все определяющие петрогенезис и ассоциированный с ним рудогенез особенности условий проявления этих процессов находят отражение в форме, фаціальном и фазовом составе тел, а также в совокупности свойств парагенетических ассоциаций. Следовательно, специфика условий проявления процессов петрогенезиса и рудообразования, отображенная в некоторых (чаще всего априорно неизвестных) особенностях парагенетических ассоциаций, определяет наличие и тип ассоциированных с процессом становления магматического объекта рудопроявлений.

Непосредственной методологической основой формулировки задач в содержательных терминах, выбора адекватных математических моделей и построения математического аппарата типизации условий петрогенезиса и рудообразования является принцип: близость характера функционального изменения признаков в магматических сериях определяет принадлежность изучаемых объектов к одному классу петрогенетических процессов и ассоциированного с ними рудообразования.

Естественно, что приведенный принцип является логическим следствием сформулированных выше методологических положений. Из его формулировки следует, что рассматриваемая методика количественного решения проблемы типизации условий петрогенезиса и рудообразования реализуется на основе определения меры близости функционального изменения признаков в магматических сериях.

С учетом рассмотренных положений и в соответствии с направленностью работы в качестве основы типизации петрогенетических процессов по близости их проявления используется сравнительный анализ моделей петрогенезиса — магматических серий. Выбор такого пути решения определен следующими причинами: во-первых, сравнительный анализ представляет собой основу классификации объектов по близости процессов их формирования и типа ассоциированных с ними проявлений рудогенезиса и, во-вторых, сравнительный анализ

динамики признаков в магматических сериях с использованием математических моделей и методов можно осуществить без применения методов аппроксимации функциональной изменчивости признаков априорно задаваемыми моделями.

Таким образом, сравнительный анализ предназначен для количественного определения меры сходства-различия динамики признаков в магматических сериях. В соответствии с приведенными выше методологическими принципами и представлениями подобная мера отображает близость условий и характера проявления петрогенетических процессов при формировании изучаемых магматических тел (комплексов, формаций). Естественно, что совпадение характера функционального изменения признаков во всех последовательно формирующихся разновидностях пород в аспекте рассматриваемых представлений интерпретируется как следствие максимальной близости условий проявления и характера процессов петрогенезиса при становлении изучаемых объектов.

Задача определения меры сходства-различия условий проявления и характера петрогенетических процессов в соответствующей принятым принципам постановке формулируется следующим образом: процессы формирования магматических тел (комплексов, формаций) признаются близкими по характеру и условиям их проявления, если неразличимы петрохимические составы всех одинаковых разновидностей пород магматических серий.

Как известно, петрохимические составы пород магматических объектов определяются не только типом процесса петрогенезиса, но и конкретными условиями реализации петрогенезиса. Здесь имеются в виду специфика условий проявления процесса в пространственном отношении (региональные особенности) и в конкретный период геологического развития региона (возрастные особенности). В связи с этим петрохимические составы пород сопоставляемых тел (комплексов) одного формационного типа неизбежно различаются, если данные объекты отличаются латеральной позицией или возрастной принадлежностью.

В то же время одной из основных задач металлогенических построений является определение повторяемости широкого круга тектоно-магматических условий проявления процессов формирования магматических тел (комплексов, формаций) определенного типа и связанных с ними рудных месторождений. Анализ процессов формирования объектов с металлогенических позиций (речь идет лишь об объектах эндогенного происхождения) не всегда может быть осуществлен решением задачи сравнения процессов формирования магматических тел (комплексов, формаций). Подобный анализ в целях прогнозирования, как правило, производится для объектов разных регионов и различного возраста, что порождает трудности, обусловленные региональными и возрастными факторами и, следовательно, неизбежными различиями в химизме пород.

Приведенные факторы свидетельствуют, что числовые значения



анализируемой петрохимической информации определяются совокупностью причин. Естественно, что эта многофакторность структуры информации должна быть учтена, особенно при применении математического аппарата решения задач. В работе принято, что наблюдаемый петрохимический состав и особенности пород конкретного объекта представляют собой композицию, во-первых, состава и свойств разновидностей пород, которые отражают специфику и порождены непосредственно данным типом процессов петрогенезиса, и, во-вторых, петрохимических особенностей пород, определяемых региональным и возрастным положением объекта. В эту композицию неизбежно входит и усложняет анализ данных случайная составляющая, обусловленная неконтролируемыми факторами: локальной неоднородностью в точке пробоотбора, особенностями отбора, обработки и анализа проб.

В подобной ситуации именно форма изменения вещественных характеристик в период реализации процесса формирования тел эндогенного происхождения отражает характерные черты условий проявления процессов петрогенезиса конкретного типа. Для выявления этой формы и ее сравнения в объектах необходимо не только ликвидировать влияние случайных флуктуаций, но и исключить региональную и возрастную специфику петрохимических особенностей одинаковых по номенклатурной принадлежности (или по положению в магматической серии) разновидностей пород.

Таким образом, мера близости для формы изменения вещественных характеристик пород в процессе петрогенезиса при становлении изучаемых объектов, исключая влияние на результат возрастных и региональных петрохимических особенностей, дает возможность типизировать петрогенетические процессы в металлогенических целях и определяет широкую применимость методики при прогнозировании типа и масштабов ассоциированного рудообразования.

При абстрагировании от региональных и возрастных особенностей петрохимических составов разновидностей пород информационной основой сравнения и классификации петрогенетических процессов служит скорость (градиент) изменения признаков вдоль оси аргумента, определяемая термином "эволюция".

С учетом приведенных положений и необходимости анализа информации для типизации процессов петрогенезиса с целью прогнозирования типа и масштабов проявлений рудогенеза вне зависимости от возраста и региональной принадлежности объектов задача определения меры близости формулируется следующим образом. Процессы формирования объектов признаются близкими по характеру эволюции составов пород, если неразличимы тенденции изменения признаков в магматических сериях при исключении влияния на результат возрастных и латеральных петрохимических особенностей пород на всем общем для сравниваемых объектов интервале значений ранжирующего параметра (аргумента). Сформулированные задачи сравнения свойств последовательно формирующихся разновид-

ностей пород и характера эволюции их составов ниже определены как задачи первого и второго типа соответственно.

Методологическая основа решения проблемы типизации условий петрогенезиса и рудообразования в принятой постановке определяет магматическую серию как информационную основу, объект математического моделирования, сравнения и классификации. Сформулированные задачи обеспечивают построение математического аппарата определения меры сходства-различия функционального изменения признаков в процессе формирования объектов для целей типизации условий проявления петрогенетических и ассоциированных с ними рудообразующих процессов. Количественные методы сравнения и классификации петрогенетических процессов, основанные на организации петрохимической информации в магматическую серию и ориентированные на анализ функционального изменения признаков при формировании объектов, открывают новые перспективные пути для количественного обоснования выводов при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях. Приведенное утверждение базируется, во-первых, на привлечении количественно измеримой генетической информации, закодированной в наблюдаемых свойствах магматических серий, во-вторых, на возможности объективного анализа генетической информации, основанного на использовании количественной меры сходства-различия в аспекте конкретной задачи, в-третьих, на повышении информационной обеспеченности прогнозно-металлогенических построений за счет привлечения новых признаков (характера эволюции вещественных свойств) и, в-четвертых, на выявлении тонких особенностей условий проявления петрогенетических процессов, различающих петрологически однотипные объекты, но с различной металлогенической специализацией.

## ГЛАВА 4

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕТРОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Решение типовых формационных и прогнозно-металлогенических задач обеспечивается сравнением и классификацией процессов петрогенезиса по близости условий их проявления на основе математических методов сравнительного анализа петрохимической информации, организованной в упорядоченную по относительному времени формирования последовательность разновидностей пород. Условия становления объектов отображены в характере функционального изменения признаков и упорядоченных последовательностях (магматических сериях). Именно в этом аспекте сформулированы приведенные в гл. 3 задачи анализа петрохимической информации. Рас-



смотренные выше методологические принципы не только служат основанием для вывода о возможности и информационной обеспеченности решения, но и достаточно четко определяют направление анализа петрохимических данных для реализации проблемы типизации петрогенетических процессов. Естественно, при ориентации на цели формационных исследований и прогнозирования ассоциированных с петрогенезисом проявлений рудообразования. Необходимо отметить, что каждый из рассмотренных принципов в отдельности хорошо известен и широко применяется в петрологических построениях, но не обеспечивает решения проблемы типизации процессов петрогенезиса на количественной основе. Именно взаимосвязанная последовательность привычных для петрологов принципов и содержание задач типизации петрогенетических процессов в формализуемом виде определяют информационную базу, объект математического моделирования, формулировку задач в терминах моделей и возможность построения математических методов их решения. В настоящей работе основой решения задач является анализ петрохимической информации.

Принципиальным является положение о том, что информационной основой решения задач типизации процессов петрогенезиса и объектом моделирования при переходе к формальным методам сравнения и классификации является петрохимическая информация, организованная в упорядоченную последовательность — магматическую серию. Специфика сформулированных задач и объекта математического моделирования существенно усложняет выбор моделей, адекватно отражающих в математическом аппарате сравнения и классификации признаки реальных объектов, необходимые для решения данных задач.

Очевидно, что при подборе математических моделей для представления петрохимической информации о составах отдельных разновидностей пород и свойствах магматических серий объектов в математическом аппарате сравнения и классификации петрогенетических процессов по характеру динамики признаков необходимо обеспечить выполнение следующих требований: 1) сохранность природного вида и функциональной структуры информации об особенностях закономерного изменения признаков в последовательно формирующихся разновидностях пород, отображающего условия и характер проявления процесса формирования объекта; 2) возможность максимально полного использования имеющейся многомерной информации о процессе формирования объектов в математическом аппарате решения задач; 3) учет всех требований к эмпирической информации, предъявляемых сформулированными задачами сравнения и классификации петрогенетических процессов; 4) построение количественной меры сходства-различия петрогенетических процессов на основе математических моделей петрохимических характеристик, функционально изменяющихся в процессе формирования объектов.

Выполнение перечисленных требований практически соответствует адекватности математической модели реальных признаков и объектов условиям сформулированных задач. Кроме того, эти требования определяют возможность анализа известных и предлагаемых математических моделей петрохимической информации в приложении к решению сформулированных выше задач сравнения и классификации магматических объектов.

Наиболее часто в литературе по применению математических методов и ЭВМ для представления петрохимической информации в формальном аппарате сравнения и классификации используется модель многомерной случайной величины  $\Xi^{(m)} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j, \dots, \xi_m\}$ , где  $\Xi^{(m)}$  — модель петрохимического состава пород объекта;  $\xi$  — модель содержания отдельных окислов [10]. Неадекватность указанной модели перечисленным выше требованиям в условиях сформулированных задач определяется отсутствием функциональной структуры информации (неупорядоченностью ее по аргументу), следовательно, невозможностью сохранения вида природной изменчивости признаков в процессе и, тем более, построения количественной меры сходства-различия процесса петрогенезиса.

Известно, что существенное негативное влияние на результат применения подобных методов оказывает нормальный петрохимический тренд, т.е. закономерная изменчивость содержаний всех петрогенных окислов от содержания кремнезема. В связи с этим для исключения влияния петрохимического тренда используют дискретизацию парагенетической ассоциации пород на подсовокупности с помощью априорно заданных значений  $\text{SiO}_2$  или определений названия пород. Сторонники подобной методики используют также модель многомерной случайной величины, но не для всего объекта в целом, как в предыдущем случае, а для состава каждой из выделенных подсовокупностей в отдельности, справедливо полагая, что подобный подход дает большие возможности. Однако и в этом случае полностью теряется информация о характере функционального изменения признаков в процессе, так как выделенные подсовокупности рассматриваются как вполне самостоятельные объекты, а не как состояния одного процесса [1].

Аналогичную позицию в отношении моделирования петрохимических свойств пород парагенетических ассоциаций объектов занимает А.Ф. Белоусов [3–6]. Он представляет в формальном аппарате сравнения и классификации объектов петрохимические свойства пород в виде набора породных групп. Причем каждая группа и состав всех входящих в нее разновидностей представляются как самостоятельная совокупность, не связанная по вещественным (петрохимическим) свойствам с другими породными группами одной парагенетической ассоциации. Математической моделью породной группы, по представлениям А.Ф. Белоусова, также является многомерная случайная величина. В отличие от исследователей, подразделяющих ассоциацию пород объекта на подсовокупности априорно



заданными значениями содержаний  $\text{SiO}_2$ , он выделяет породные группы из ассоциации по результатам предварительного анализа гистограмм частот встречаемости разновидностей на оси кремнекислотности (и некоторых других признаков). Принцип подразделения ассоциаций и моделирования каждой из породных групп как абсолютно самостоятельных объектов следует из представлений А.Ф. Белоусова о генерации породных групп устойчивыми популяциями магм, каждая из которых обязана автономной стадии выплавления [4].

Свойством выборочных совокупностей парагенетических ассоциаций является неравномерность распределения объемов разновидностей пород, которая и послужила поводом для выделения породных групп. Вполне допустимо, что в процессе становления достаточно сложных по фациальному составу объектов соотношение объемов формирующихся разновидностей пород может быть неравномерным. Это положение согласуется с мнением Д.С. Коржинского о том, что устойчивые закономерности минерального состава большинства горных пород показывают, что минералообразование вообще процесс прерывный, идущий лишь при некоторых благоприятных условиях [19]. В той же работе он указывает, что эта "прерывность" осложняется "мозаичными" равновесиями — неоднородностью значений интенсивных параметров в объеме системы. Именно эти свойства функционирования магматических систем и создают наблюдаемую картину неоднородности распределения объемов минеральных парагенезисов (разновидностей пород) при реализации одного и того же процесса петрогенезиса. Все это обуславливает неоднородность частоты встречаемости отдельных разновидностей пород в пределах общей и достаточно протяженной по оси кремнекислотности ассоциаций пород объектов. Эта неравномерность послужила непосредственным поводом для возникновения представления о породных группах. Тем более, что она может усугубляться (по разным причинам) неравномерными условиями опробования. Основой прогнозирования рудоносности магматических объектов является представление о единстве источника процессов петро- и рудогенеза. Следствием этого является необходимость предположения о генетической взаимосвязи процессов формирования главных фаз интрузии со становления комплексов дополнительных фаз (малых интрузий и пегматитов), часто оторванных и во времени. В связи с этим в настоящей работе принято, что совокупность тектоно-магматических условий проявления процесса формирования всей серии фазовых и фациальных разновидностей, объединяемых в данный магматический объект, определяет преемственность свойств и их динамику в течение всего периода реализации данного петрогенетического процесса. Необходимо отметить, что в работе А.Ф. Белоусова и А.П. Кривенко [5] фиксируется взаимосвязь петрохимических особенностей пород различных породных групп в протяженных магматических ассоциациях. Это явление сторонниками сериального подхода определяется как унаследованность. А.Ф. Белоусов и А.П. Кривенко признают, что рас-

смаатриваемую корреляцию разных групп пород можно объяснить последовательным плавлением одной глубинной массы, несколько отличающейся по химизму в разных ареалах выплавления магм [5]. Такое представление при исключении из обсуждения конкретных указаний на механизм процесса (фракционное плавление, дифференциация магматической массы, палингенез и т.п.) по существу близко к рассмотренному выше пониманию функционирования протяженных процессов петрогенезиса в их вещественном выражении. Отсюда также следует, что в условиях рассматриваемой в работе задачи целесообразно сохранение сериальной модели для информации об объектах эндогенного петрогенезиса. Как будет показано далее, использование сериальной модели представления информации способствует выявлению тонких особенностей условий проявления процессов петрогенезиса при разных типах ассоциированного с ними рудообразования, что закономерно отражено в характере функционального изменения признаков в магматических сериях.

Представление петрохимической информации о составе пород объектов с помощью математической модели многомерной случайной величины применяется при классификации неизвестного объекта к одному из классов. В данном случае используется метод дискриминантных функций, который позволяет при наличии эталонных объектов двух альтернативных классов построить правило классификации. В частности, эта методика в приложении к формационному анализу широко применялась В.А. Кутוליным. Причем в методике, разработанной В.А. Кутוליным, дискриминантная функция строилась лишь на основе той части парагенетических ассоциаций, разновидности которой определяются им как базальты. Сложность определения принадлежности конкретной разновидности пород к номенклатурному классу базальтов, границы которого в количественном выражении не определены, а также невозможность привлечения других разновидностей пород из данной ассоциации не позволяют и в данном случае считать модель многомерной случайной величины адекватной сформулированным выше задачам анализа петрохимических данных.

Модель многомерной случайной величины достаточно широко используется для моделирования процесса петрогенезиса с помощью различных вариантов факторного анализа. Причем в качестве оценки оси времени в модели процесса, как правило, применяется первый фактор (первая главная компонента матрицы ковариации), который в некоторых работах определяется как фактор кислотно-основного взаимодействия. Особенности процесса формирования изучаемых магматических объектов моделируются положением и формой роя реальных наблюдений над свойствами пород объекта в координатах: I—II или I—III, или II—III и другие факторы. Однако подобная методика моделирования, хотя и представляет определенный научный интерес, не может обеспечить эффективного решения сформулированных выше задач типизации петрогенетических процессов, по крайней мере по двум причинам. Первой является априор-



но и жестко заданный методом модели изменения признаков в координатах факторов — модели прямолинейной зависимости, что в значительном числе случаев безусловно и существенно упрощает реальную форму изменчивости содержаний петрогенных окислов в петрогенетическом процессе. Вторая и не менее важная причина — отсутствие количественной меры сравнения и классификации моделей процессов петрогенезиса в факторном представлении. Все это служит основанием для вывода о недостаточной эффективности рассматриваемого метода моделирования процессов петрогенезиса для количественного решения проблемы типизации процессов формирования магматических объектов.

Представление петрохимической информации об объектах в виде магматических серий и формулировка задач о близости функционального изменения признаков в магматических сериях с достаточной очевидностью свидетельствуют о предполагаемом характере математической модели, учитывающей указанные особенности признаков и объектов. Перечисленным в начале главы требованиям к математической модели отвечает модель многомерной случайной функции с детерминированной компонентой априорно неизвестного вида. Обоснование для применения этой модели к представлению магматических серий в аппарате сравнения и классификации, а также математические допущения и предположения более подробно рассмотрены в работе [10].

В дальнейшем в качестве математической модели функционального изменения петрохимических свойств разновидностей пород в упорядоченной по относительному времени формирования последовательности (магматической серии) применяется  $m$ -мерная случайная функция  $\Xi(\delta)$  вида

$$\Xi(\delta) = \Upsilon(\delta) + \varphi(\delta), \delta \in U, \quad (1)$$

где  $\Upsilon(\delta)$  —  $m$ -мерная детерминированная компонента априорно неизвестного вида;  $\varphi(\delta)$  —  $m$ -мерная стационарная случайная функция с нулевым вектором математических ожиданий, диагональной и конечной ковариационной матрицей при счетном числе состояний;  $\delta$  — аргумент случайной функции;  $U$  — множество всех возможных значений  $\delta$ .

В предложенной модели детерминированная компонента  $\Upsilon(\delta)$  представляет собой модель закономерного изменения содержаний всех петрогенных окислов при изменении значений ранжирующего параметра  $\delta$  (аргумента). Случайная функция  $\varphi(\delta)$  отражает всю совокупность случайных флуктуаций содержаний окислов, обусловленных комплексом причин: локальной неоднородностью в точке пробоотбора, случайным влиянием на конкретное значение процедуры обработки и анализа проб. Другими словами, свойства случайной функции  $\varphi(\delta)$  описывают поведение конкретных значений функции  $\Xi(\delta)$  в каждой точке оси аргумента относительно закономерного

изменения признаков в процессе. Принятые представления о свойствах функции  $\varphi(\delta)$  и важные для понимания методики сравнения и классификации петрогенетических процессов можно пояснить на следующем примере. Используя представления Г. Крамера и М. Литбеттера о "вертикальном окне" случайной функции, выберем любой сколь угодно малый интервал значений аргумента  $\delta + \Delta\delta$  (где  $\Delta\delta \rightarrow 0$ ). В соответствии с принятыми предположениями о свойствах  $\varphi(\delta)$  [10] ординаты одномерной функции  $\varphi_j(\delta)$  принадлежат классу случайных величин, распределенных нормально с математическим ожиданием 0 и дисперсией  $\sigma_j^2$ . Многомерная ( $m$ -мерная) случайная функция  $\varphi(\delta)$  имеет аналогичные свойства: ее ординаты в вертикальном окне принадлежат случайной величине с  $m$ -мерным нормальным распределением и параметрами — нулевым вектором математических ожиданий и диагональной ковариационной матрицей. Из приведенных свойств случайной функции  $\varphi(\delta)$ , моделирующей случайные флуктуации, можно сделать важный вывод: при малом интервале значений аргумента  $\delta$ , т.е.  $\delta + \Delta\delta$ , на величину рассеяния значений ординат функции  $\varphi(\delta)$  влияют только случайные флуктуации признаков вокруг значения детерминированной компоненты, соответствующего данному значению аргумента  $\delta$ .

В работе [10] достаточно подробно рассмотрены две математические модели петрохимического состава магматических серий: модель множества многомерных случайных величин, распределение которых определяется значением условия, и модель многомерной случайной функции с детерминированной компонентой априорно неизвестного вида. Там же рассмотрена близость вероятностного смысла этих моделей в условиях сформулированных задач и возможность использования модели случайной функции, несмотря на некоторые свойства параметра  $\delta$ , усложняющие его применение в качестве аргумента случайной функции. Практика применения методики и ее дальнейшее развитие показали, что выражение (1), отражающее содержание модели с достаточной эффективностью, может быть использовано в качестве модели закономерного изменения петрохимических свойств пород в магматических сериях. Именно эффективность данной модели в приложении к анализу петрохимической информации (см. гл. 7) свидетельствует о возможности использования модели случайной функции. В связи с этим в дальнейшем при формулировке задач сравнения и классификации процессов петрогенезиса в терминах моделей применяется математическая модель магматической серии, приведенная в выражении (1).

Таким образом, в выражении (1), используемом в качестве модели для представления магматических серий в математическом аппарате, отражены все участвующие в сформулированных задачах содержательные понятия и термины. Имеются в виду задачи первого типа, определяемые термином "петрохимия". Задачи второго типа будут рассмотрены ниже. Для определения математического аналога



задачам первого типа обозначим соответствующим образом математические модели магматических серий изучаемых объектов.

В качестве математических моделей магматических серий первого и второго объекта примем соответственно  $m$ -мерные случайные функции:

$$\begin{aligned}\Xi(\delta) &= \Upsilon(\delta) + \varphi(\delta), \delta \in U_1 \\ \Xi'(\delta) &= \Upsilon'(\delta) + \varphi'(\delta), \delta \in U_2.\end{aligned}\tag{2}$$

Рассмотрим разность этих случайных функций:

$$\begin{aligned}[\Xi(\delta) - \Xi'(\delta)] &= [\Upsilon(\delta) - \Upsilon'(\delta)] + [\varphi(\delta) - \varphi'(\delta)], \\ \delta &\in U,\end{aligned}\tag{3}$$

где  $U = U_1 \cap U_2$ .

В соответствии с формулировкой первого типа задач сравнения петрогенетических процессов принято, что они не различаются, если не отличаются петрохимические составы всех одинаковых разновидностей пород магматических серий. Принимая  $\delta$  в качестве параметра, определяющего положение породы на оси разновидностей, а множество  $U$  в качестве множества одинаковых для двух объектов разновидностей пород, в условиях неразличимости магматических серий двух объектов члены правой части равенства (3) будут иметь следующие свойства. Первый член, т.е.  $[\Upsilon(\delta) - \Upsilon'(\delta)]$ , будет равен нулевому вектору для всех значений  $\delta$  из множества  $U$ . Член  $[\varphi(\delta) - \varphi'(\delta)]$  представляет собой случайную функцию с нулевым вектором средних и диагональной ковариационной матрицы. Эти параметры являются следствием свойств случайных функций, участвующих в разности второго члена элементов, т.е.  $\varphi(\delta)$  и  $\varphi'(\delta)$ ; каждая из этих функций по условию имеет нулевой вектор математических ожиданий. Ковариационная матрица второго члена равна сумме матриц элементов разности и, так же как они, является диагональной. Этот член отражает случайные флуктуации, суммированные по сравниваемым объектам. Как известно, содержание задач первого типа не включает сопоставление степени рассеяния и случайных флуктуаций, хотя величина их должна быть учтена.

Содержательный смысл задач первого типа относится к сопоставлению петрогенетических процессов по характеру закономерного изменения петрохимических свойств пород, моделью которого служат детерминированные компоненты. В связи с этим рассматриваемый тип задач относится (в терминах моделей) лишь к сопоставлению детерминированных компонент и может быть сформулирован в виде нулевой гипотезы:

$$H_0 : \Upsilon(\delta) - \Upsilon'(\delta) = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \quad (4)$$

для всех  $\delta \in U$  при множестве альтернатив

$$H_1 : \Upsilon(\delta) - \Upsilon'(\delta) \neq \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix}, \quad (5)$$

хотя бы для одного  $\delta \in U$ .

Состоятельность нулевой гипотезы (4) соответствует совпадению с точностью до случайных флуктуаций петрохимического состава любой пары одинаковых разновидностей пород сопоставляемых объектов из всего множества таких разновидностей, одновременно встречающихся в объектах. В условиях любой альтернативы из приведенного множества магматические серии данных объектов отличаются петрохимическими свойствами хотя бы одной разновидности пород.

По результатам проверки нулевой гипотезы (4), в случае ее состоятельности, можно предположить однотипность условий и характера проявления процесса петрогенезиса при становлении двух объектов, поскольку все одинаковые по относительному времени формирования разновидности пород двух объектов не различаются по своему составу и петрохимическим особенностям. Принятие любой из множества альтернатив требует определения, во-первых, тех разновидностей пород, составы и особенности которых в сравниваемых объектах существенно различаются, и, во-вторых, признаков и характера отличий для установления возможного источника различий, а также причин, обусловивших зафиксированные особенности рассматриваемых объектов.

В формулировке задач второго типа, кроме аналогичных задачам первого типа понятий, присутствует требование ликвидации влияния латеральных и возрастных петрохимических особенностей пород изучаемых объектов на результат сравнения магматических серий. По смысловому содержанию данная задача сопоставима с процедурой объединения конкретных магматических формаций в абстрактную формацию (формационный тип, по Ю.А. Кузнецову). Естественно, что однотипные по положению в истории геологического развития регионов магматические формации имеют определенные черты общности, которые, собственно, и необходимо выявить при решении данной задачи. Однако можно утверждать, что конкрет-



ные условия реализации процессов петрогенезиса в разных регионах и в период проявления разновозрастных фаз тектоно-магматической активности приведут к формированию объектов с магматическими сериями, различающимися петрохимическими особенностями одинаковых по относительно времени формирования разновидностей пород. На конкретных петрохимических особенностях отразятся различия в петрохимической специфике как региона, так и времени проявления процесса. Однако, учитывая однотипность (по предположению) процесса петрогенезиса, можно предполагать, что общий характер процесса (последовательность разновидностей пород и скорость изменения их свойств во временном ряду) должен отражать однотипность комплекса условий реализации процесса.

Было предложено определять специфику петрохимических разновидностей пород объекта в целом через математическое ожидание ординат процесса на всем множестве  $U$  [10]. На основании результата, полученного Ю.А. Розановым [30], было показано, что ликвидация влияния возрастных и латеральных петрохимических особенностей пород объектов достигается центрированием детерминированной компоненты вектором безусловных математических ожиданий признаков, т.е.  $M\Xi = \{M\xi_1, M\xi_2, \dots, M\xi_j, \dots, M\xi_m\}$ . Обозначим векторы безусловных математических ожиданий первого и второго объекта соответственно через  $M\Xi$  и  $M\Xi'$ . Используя обозначения, принятые в выражении (2), второй тип задач сравнения петрогенетических процессов в терминах математических моделей можно сформулировать в виде нулевой гипотезы

$$H_0 : [\Upsilon(\delta) - M\Xi] - [\Upsilon'(\delta) - M\Xi'] = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{matrix} \quad (6)$$

для всех  $\delta \in U$  при множестве альтернатив,

$$H_1 : [\Upsilon(\delta) - M\Xi] - [\Upsilon'(\delta) - M\Xi'] \neq \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{matrix} \quad (7)$$

хотя бы для одного  $\delta \in U$ .

С учетом математических моделей магматических серий, определяемых выражениями (2), задачи первого и второго типа представлены нулевыми гипотезами (4) и (6), смысловое содержание которых соответствует определению меры сходства-различия изучаемых объектов в аспекте упомянутых задач. Нужно учитывать, что эта мера

отражает количественно выраженное сходство (или различие) функционального поведения признаков в петрохимических моделях петрогенезиса. В условиях состоятельности нулевой гипотезы (4) следует считать обоснованным вывод о том, что при любом значении ранжирующего параметра (оценки относительного времени формирования разновидностей) и на всем общем интервале его значений петрохимические составы одинаковых разновидностей пород сравниваемых объектов совпадают. Естественно, что в данном и приведенном ниже случаях определение "совпадают" необходимо мысленно дополнять уточнением: с точностью до случайных отклонений. Состоятельности нулевой гипотезы (6) соответствует вывод о совпадении тенденций (градиента) изменения признаков при изменении ранжирующего параметра  $\delta$  на всем общем для сравниваемых объектов интервале его значений (на множестве  $U$ ).

Сравнение процессов становления объектов на основе петрохимических моделей (магматических серий) с помощью меры сходства-различия определяется весьма существенной причиной. Определение меры сходства-различия функционального изменения признаков при становлении объектов позволяет обеспечить сохранность природной формы этой изменчивости. В случае моделирования процесса становления для одного объекта мы вынуждены прибегать к методам аппроксимации детерминированной компоненты для ее оценки. Методы аппроксимации многомерных случайных функций (метод ортогональных полиномов, ряды Фурье и т.п.) могут достаточно хорошо передать общий характер изменчивости, но допускают возможность искажения природной закономерности в деталях. Очевидно, что при определении тонких различий в поведении признаков объектов одной формационной принадлежности, но разной рудоносности эти искажения могут существенно повлиять на результат. Кроме того, подобные искажения практически не поддаются контролю и выявлению. Тем более нельзя определить область значений ранжирующего параметра, в пределах которой имеются искажения, и выявить те признаки, закономерное изменение которых не вполне соответствует природному. В то же время нулевые гипотезы (4) и (6) и методы их проверки не требуют задания вида детерминированных компонент априори и их аппроксимации. Нулевое различие (максимальное сходство) многомерных детерминированных компонент при любом значении  $\delta$  соответствует совпадению закономерного изменения всех признаков вне зависимости от того, известна форма этой изменчивости или нет.

Эффективность использования предлагаемых математических моделей магматической серии (петрохимическая модель петрогенезиса) в задачах формационного и прогнозно-металлогенического анализа объясняется не только возможностью привлечения к обоснованию выводов генетического аспекта, информация о котором содержится в петрохимических данных. Сравнение детерминированных компонент случайных функций имеет и чисто методические преимущества перед традиционно применяемым методом сравнения векто-



ров математических ожиданий случайных величин. Критерии сравнения и процедура классификации, основанные на мере близости (сходства-различия) детерминированных компонент случайных функций, имеют более высокие дискриминационные и классификационные качества, чем аналогичные по содержанию статистики сравнения векторов математических ожиданий и правила классификации на основе их близости (см. гл. 5).

## ГЛАВА 5

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ПЕТРОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Обоснование, принятые предположения и математический вывод критериев для проверки нулевых гипотез (4) и (6) детально рассмотрены в работе [10], поэтому в предлагаемой главе основной акцент сделан на методы, наиболее соответствующие содержанию задач анализа информации при формационных и металлогенических исследованиях.

Сформулированные в предшествующей главе нулевые гипотезы, определяемые выражениями (4) и (6), обеспечивают возможность построения математических методов их проверки. Как следует из предшествующего изложения, при анализе петрохимической информации в задачах сравнения и классификации магматических объектов большое значение имеет характер закономерного изменения признаков в петрохимических моделях петрогенезиса. Основанием для этого является представление об отображении функционального изменения свойств пород при реализации процесса формирования объекта в наблюдаемой закономерной изменчивости признаков в модели петрогенезиса (магматической серии). Отсюда явно следует специфика подхода к анализу петрохимической информации, который рассматривается как анализ функционального изменения составов в последовательности разновидностей пород при неискаженности природной формы этих трендов. Приведенное требование является основополагающим как при подборе математических моделей для магматических серий, так и при построении критериев проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6). Основой для построения критериев и нулевых гипотез служит процедура сравнительного анализа, позволяющая избежать аппроксимации природных трендов и анализировать закономерное их поведение без априорных предположений о форме изменчивости признаков.

С учетом приведенных положений нулевые гипотезы (выражения (4) и (6)), можно рассматривать как гипотезы о случайном характере ординат разностной случайной функции. Эта функция получена

в результате вычитания ординат (при одинаковом значении аргумента) двух изучаемых случайных функций, в значения которых входит и закономерная составляющая. Причем состоятельность проверяемой нулевой гипотезы соответствует отсутствию закономерной составляющей в значениях ординат разностной случайной функции и равенству нулю математического ожидания значений ординат для каждого признака многомерной случайной функции.

Возможность построения статистических методов проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), именно в таком понимании требует обоснования. В связи с этим вводятся предположения, а также некоторые результаты теории вероятностей, необходимые для построения критериев.

Одним из основных предположений, без которого построение статистик следует считать неоправданным, является предположение об эргодичности случайной функции, определяемой выражением (1). Требование эргодичности случайной функции в несколько упрощенном виде можно представить как необходимость выполнения равенства значений любой реализации (например,  $k$ -й), т.е.  $\Xi_k(t)$ , математическому ожиданию  $M[\Xi(t_j)]$  при значении аргумента  $t_j$  и числе наблюдений, стремящемся к бесконечности. Другими словами, мы должны быть уверены, что имеющаяся реализация позволяет уверенно судить о генеральной совокупности данной функции. Естественно, что в теории вероятностей подобное предположение требует доказательства. Однако хорошо известно, что для такого доказательства необходимо, как минимум, неоднократное повторение эксперимента при том же (в точности) комплексе условий. Но в геологических исследованиях, да и не только в геологических, выполнение этого требования практически неосуществимо.

Именно эта особенность решения задач с применением методов теории вероятностей и математической статистики во многих областях наук и определила необходимость появления и развития такой отрасли математики, как прикладная статистика [2]. Отличием прикладной статистики от классической математической является именно анализ информации и обоснование выводов при априорной невозможности обеспечения требования о допустимости многократного повторения эксперимента при одинаковом комплексе условий. Все это позволяет принять без специального доказательства предположение об эргодичности случайной функции, выражаемой формулой (1).

Следующее предположение касается второго члена правой части выражения (3). Также без строг доказательства предполагается, что случайная функция  $[\varphi(\delta) - \varphi'(\delta)]$  принадлежит к классу регулярных стационарных процессов. В соответствии с этим в условиях состоятельности нулевой гипотезы, определяемых выражениями (4) или (6), случайная функция  $[\varphi(\delta) - \varphi'(\delta)]$  имеет нулевой вектор математических ожиданий, диагональную и конечную при счетном числе состояний ковариационную матрицу. Предположение о диагональности ковариационной матрицы проверялось на



нескольких реальных примерах с помощью статистических методов и не было опровергнуто. Это позволяет принять указанное предположение в качестве рабочего.

Построение статистик для проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), кроме рассмотренных выше предположений, основано и на некоторых результатах, полученных при исследованиях в рамках теории вероятностей.

1. Условное математическое ожидание  $M(\xi/\eta)$  существует при любых значениях условия  $\eta$ , если  $M|\xi|$  конечно [30].

2. Если величина  $\xi$  зависит от значений некоторого случайного процесса  $\eta(t)$ , то абсолютно наилучшее приближение величины  $\xi$  обеспечивает условное математическое ожидание

$$\hat{\xi} = M(\xi/\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \quad (8)$$

при фиксированных значениях  $\eta(t)$ , т.е.  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  [30].

3. При определенных условиях регулярности стационарного процесса распределение вероятностей нормированных и центрированных ординат слабо сходится к гауссовскому распределению с нулевым средним и единичной дисперсией [30].

4. В соответствии с результатами, опубликованными И.И. Гихманом и А.В. Скороходом, две случайные функции называются стохастически эквивалентными, если совпадают все конечномерные распределения последовательностей случайных величин при любых значениях аргумента. Этот результат служит основанием для сравнения случайных функций по характеру распределения их реализаций при заданных значениях аргумента.

5. Возможность применения метода максимального правдоподобия для оценки параметров случайных функций и отношения правдоподобия для построения критериев базируется на результатах исследований У. Гренандера.

Совокупность приведенных предположений и результатов позволила построить набор статистических критериев для сравнения детерминированных компонент случайных функций и для классификации объектов по близости функционального изменения петрохимических характеристик в моделях процессов их формирования. Ниже рассмотрены методы без их вывода, но с добавлением необходимых особенностей их применения при решении конкретных задач, соответствующих содержанию анализа петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях.

Методы решения задач рассматриваются в соответствии с масштабом исследований и последовательностью их возникновения при повышении уровня обобщений. Конкретная реализация этих методов рассмотрена в главах 6 и 7.

Первые стадии формационного анализа магматических пород в недостаточно изученном или малоизвестном регионе характеризуются необходимостью объединения всех известных здесь магмати-

ческих выходов, тел, массивов в единый магматический комплекс (конкретную формацию). Альтернативой подобному объединению является выделение двух или более комплексов (формаций). В большинстве подобных ситуаций исследователь располагает ограниченным объемом информации по каждому из объектов (телу, массиву, выходу). Особенно сложное положение с петрохимической информацией наблюдается, как правило, в процессе геологических съемок масштабов 1:200000 и 1:50000 вне районов крупномасштабных геологоразведочных или длительных научно-исследовательских и тематических работ. В таких ситуациях предлагается использовать приведенный ниже метод сравнения условных средних при линейной интерполяции. Он позволяет осуществлять анализ петрохимических данных при решении задачи о принадлежности магматических тел (массивов, выходов) одному или нескольким магматическим комплексам. Применение этого метода на указанной стадии формационного анализа рекомендуется еще и потому, что его реализация может быть осуществлена без применения ЭВМ (это не означает, что метод не может быть реализован на ЭВМ).

Процедура проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), с применением данного метода включает следующие операции.

1. Допустим, что имеется  $k$  объектов (тел, массивов, выходов), которые предположительно принадлежат одному магматическому комплексу. Задача состоит в проверке обоснованности этого предположения. Будем считать, что объекты принадлежат одному комплексу, если все одинаковые номенклатурные разновидности пород объектов не различаются существенно по петрохимическим особенностям. В более общей постановке задача может быть определена так: сколько классов по близости петрохимических особенностей одинаковых разновидностей пород может быть выделено на изучаемой территории? Естественным следствием решения этой задачи является вопрос: какие тела (массивы, выходы) близки по петрохимическим особенностям одинаковых разновидностей пород, т.е. формируют каждый из выделенных классов близости?

Обозначим через множество  $\{\bar{x}_t/\delta = d_i\} = \{\xi_{t1}/\delta = d_i, \xi_{t2}/\delta = d_i, \dots, \xi_{tj}/\delta = d_i, \dots, \xi_{tm}/\delta = d_i\}$  модель петрохимического состава ассоциации пород  $t$ -го объекта ( $t = 1, 2, \dots, k$ ), где  $\delta$  — модель ранжирующего параметра;  $d_i$  — конкретное значение  $\delta$  из множества его значений, возможных для данного объекта ( $d_i \in U_t$ ). Тогда нулевая гипотеза, соответствующая сформулированной задаче, может быть представлена в виде

$$H_0 : M(\bar{x}_t/\delta = d_i) - M(\bar{x}_p/\delta = d_i) = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{matrix} \quad (9)$$



для всех  $d_i \in U$ ,  $U = U_t \cap U_p$ . Нулевая гипотеза проверяется для всех пар  $t$  и  $p$ , причем  $t, p = 1, 2, \dots, k$  и  $t \neq p$ .

Пусть в нашем распоряжении имеется следующая информация:

$$\begin{aligned} X_{11}/d_{11}, X_{12}/d_{12}, \dots, X_{1i}/d_{1i}, \dots, X_{1N_1}/d_{1N_1}, d_{1i} \in U_1; \\ X_{21}/d_{21}, X_{22}/d_{22}, \dots, X_{2i}/d_{2i}, \dots, X_{2N_2}/d_{2N_2}, d_{2i} \in U_2; \\ \dots \dots \dots (10) \\ X_{t1}/d_{t1}, X_{t2}/d_{t2}, \dots, X_{ti}/d_{ti}, \dots, X_{tN_t}/d_{tN_t}, d_{ti} \in U_t; \\ \dots \dots \dots \\ X_{k1}/d_{k1}, X_{k2}/d_{k2}, \dots, X_{ki}/d_{ki}, \dots, X_{kN_k}/d_{kN_k}, d_{ki} \in U_k. \end{aligned}$$

Причем  $X_{ti} = \{x_{ti1}, x_{ti2}, \dots, x_{tij}, \dots, x_{tim}\}$ .

Причем во всех случаях информация о петрохимических составах разновидностей упорядочена по значениям ранжирующего параметра  $d$ , т.е. в соответствии с соотношением:  $d_{t1} \leq d_{t2} \leq \dots \leq d_{ti} \leq \dots \leq d_{tN_t}$ .

II. Строим  $m$  (по числу признаков — петрохимических характеристик) двухмерных графиков, на которые разными цветами наносим информацию об изменении значений признака по каждой из выборок. Точки на графиках, соответствующие значениям признака в каждой пробе из упорядоченной последовательности данной (например,  $k$ -й) выборки, соединяются интерполяционными прямыми. В результате подготовительных операций будет построено  $m$  графиков (по числу признаков) с  $k$  (по числу изучаемых объектов) интерполяционными ломаными линиями каждый.

В соответствии с условиями применения критериев и методики в проверке нулевой гипотезы участвует лишь та информация каждой из выборок (объектов), значения аргумента которой принадлежат общему для всех выборок интервалу его значений. С формальных позиций этот общий для всех выборок интервал значений аргумента представляет собой множество  $U$  в выражениях (4) — (7) и (9), которое в данном случае определяется как

$$U = U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_t \cap \dots \cap U_k. \quad (11)$$

III. На множестве  $U$  определяются  $n$  значений параметра  $d$  с равными расстояниями между ними. Число  $n$  фиксированных значений  $d$  должно быть близко количеству наблюдений в той выборке, число проб которой в общей интервале ранжирующего параметра (на множестве  $U$ ) минимально. Другими словами,  $n \approx N_t'_{\text{min}}$ , где  $N_t'$  число наблюдений  $t$ -й выборки в пределах множества  $U$ . Для каждого

из фиксированных значений  $d_i \in U$  измеряется расстояние между интерполяционными линиями для каждой пары объектов. Измеренное для признака  $j$  в точке оси абсцисс  $d_i$  расстояние обозначим  $z_{ji}$ .

Мера близости петрохимических характеристик одинаковых разновидностей пород двух объектов определяется с помощью статистики:

$$W = \sum_{j=1}^m W_j = \sum_{j=1}^m \frac{\bar{z}_j^2 n}{s_j^2}, \quad (12)$$

где  $\bar{z}_j = \frac{1}{ni} \sum_{i=1}^n z_{ji}$ ;  $s_j^2$  — оценка дисперсии  $z_{ji}$ , вычисленная в предположении, что  $Mz_{ji} = 0$ , т.е. по формуле  $s_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ji}^2$ . В условиях нулевой гипотезы (4) и (9) число  $W$  представляет собой значение случайной величины, распределенной как  $\chi^2$  с  $m$  степенями свободы.

IV. Результаты вычисления статистики  $W$  для каждой пары изучаемых объектов составляют содержание матрицы (табл. 1). Представленные в таблице результаты оценки меры близости петрохимических характеристик ассоциаций пород объектов служат основой классификации их по указанной мере близости. Данная процедура реализуется следующим образом.

Таблица 1

Значения критерия, вычисленного для каждой пары изучаемых объектов, для сравнения условных средних при линейной интерполяции

Объекты	1	2	3	...	$t$	...	$k$
1		$W(1-2)$	$W(1-3)$	...	$W(1-t)$	...	$W(1-k)$
2			$W(2-3)$	...	$W(2-t)$	...	$W(2-k)$
3					$W(3-t)$	...	$W(3-k)$
⋮					⋮		⋮
⋮					⋮		⋮
$t$						...	$W(t-k)$
⋮							⋮
⋮							⋮
$k$							



1. Если в результате анализа матрицы (см. табл. 1) будет установлено, что  $W_{\min} > \chi_{m,q}^2$ , то процедура заканчивается. Результатом является вывод, что объекты существенно различаются петрохимическими составами одинаковых разновидностей пород (при заданном уровне значимости  $q$ ). В случае наличия значений статистики, удовлетворяющих соотношению  $W \leq \chi_{m,q}^2$ , определяется минимальное значение  $W$ , например  $W(t - k)$ . В соответствии с содержательным смыслом нулевой гипотезы объекты  $t$  и  $k$  объединяются как наиболее близкие по петрохимическому составу одинаковых разновидностей пород. Новому объединенному объекту присваивают обозначение  $tk$  и вычисляют значения критерия для него и всех оставшихся после объединения объектов, т.е.  $W(1 - tk)$ ,  $W(2 - tk)$  и т.д. Матрица значений меры близости сокращается на один столбец и на одну строку.

2. Анализ значений новой матрицы повторяется в соответствии с содержанием предыдущего пункта. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет выполняться соотношение  $W_{\min} > \chi_{m,q}^2$ .

3. Если после завершения процедуры объединения число оставшихся объектов более двух, целесообразно построение дендрограммы мер сходства-различия для всех классов (объектов). Построение дендрограммы меры сходства-различия объектов позволяет наглядно отобразить соотношение между классами, сформированными в процессе последовательного объединения исходных тел (массивов, выходов), по близости петрохимических характеристик одинаковых разновидностей пород.

Примеры решения задач объединения магматических объектов (тел, массивов, выходов) в один комплекс (конкретную формацию) с помощью рассматриваемого метода приведены в работах [10, 11, 15]. В связи с этим целесообразно остановиться лишь на некоторых особенностях применения предлагаемой методики.

В первую очередь требует объяснения наличие ограничений на минимальное число наблюдений в исследуемых выборках, которое могло быть признано необходимым и в некотором смысле достаточным для обоснования выводов. Этот вопрос имеет типичный для применения математической статистики ответ: чем больше наблюдений, тем обоснованней вывод. Однако в данном конкретном случае существуют некоторые отличия, которые не позволяют безапелляционно принять это типовое положение. Опыт решения задач, подобных рассмотренной выше, показал, что удовлетворительные результаты могут быть получены при минимальном ( $N = 7-8$ ) числе наблюдений в одной из выборок (в общем интервале значений аргумента, т.е. на множестве  $U$ ). Увеличение минимального по всем выборкам числа проб в указанном интервале до 20-25, естественно, повышает обоснованность выводов по результатам применения рассматриваемой методики. Однако дальнейший рост числа наблюдений в минимальной по объему выборке до 50-100 приводит к снижению эффективности применения данного метода. Причиной этого является нежелательное и неоправданное повышение влияния шумовой составляющей на величину оценки условной дисперсии  $s_j^2$ . В подоб-

ных ситуациях, т.е. при объеме минимальной выборки более 50 наблюдений, следует применять методы проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), с дискретизацией множества значений условия, которые рассмотрены ниже.

Необходимо указать, что проверка нулевой гипотезы (6), т.е. сравнение характера эволюции признаков при исключении влияния возрастных и региональных петрохимических особенностей объектов, может быть осуществлена с применением рассмотренного метода. Для этого значения каждого признака наносятся на график не в абсолютных значениях, а в виде значений, центрированных безусловным средним для данного признака и для данного объекта. Другими словами, вместо  $x_{ji}/d_i$  на график нужно наносить значение  $(x_{ji} - \bar{x}_j)/d_i$ , где  $x$  — конкретное значение содержания каждого окисла;  $d$  — значение ранжирующего параметра для  $i$ -й пробы;  $\bar{x}_j$  — среднее арифметическое  $j$ -го признака, вычисленное с помощью выражения

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji}. \quad (13)$$

Все остальные процедуры не отличаются от описанных выше. Рассматриваемый уровень задач анализа петрохимической информации не соответствует уровню обобщений, для которого проверка нулевой гипотезы (6) наиболее эффективна. В связи с этим сравнение характера эволюции петрохимических характеристик более эффективно при применении методов, описанных ниже. В то же время нельзя игнорировать возможность использования и рассматриваемого метода анализа петрохимической информации.

В реальных исследованиях магматических образований возникают ситуации, когда имеются хорошо обеспеченные информацией эталонные по нескольким различным формациям выборочные последовательности (магматические серии). Магматические серии представляют собой петрохимические модели процессов формирования изучаемых объектов. На основе этой информации может быть проведено сравнение объектов, принятых в качестве эталонных, и выявлено различие этих формаций по характеру поведения признаков при их формировании. Кроме того, должны быть выбраны те признаки, функциональное изменение которых в наибольшей степени различает эталонные формации. В подобных ситуациях часто возникает задача отнесения изучаемого массива (тела, выхода) к одной из эталонных формаций по небольшому числу наблюдений (5—7, возможно несколько больше).

Предположим, что для эталонных совокупностей мы имеем достаточно обоснованные тренды закономерного поведения признаков вдоль оси ранжирующего параметра. Обозначим их через  $\hat{X}_1(d)$ ,  $\hat{X}_2(d)$ , ...,  $\hat{X}_l(d)$ , ...,  $\hat{X}_k(d)$ . Известна (оценена) и условная дис-



персия для всех объектов и каждого из признаков

$$s_{tj}^2(d) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N_t} [x_{tj}(d_i) - \hat{X}_{tj}(d_i)]^2, \quad (14)$$

где  $n$  — число значений аргумента, при которых определяется  $z_{ji}$  (соответствует числу наблюдений изучаемой выборки в пределах множества  $U$ );  $\hat{X}_{tj}(d_i)$  — значение признака в  $t$ -й эталонной формации при том же  $d_i$  значении аргумента. В этом случае определение близости закономерного поведения петрохимических характеристик в магматической серии (петрохимической модели процесса формирования) изучаемого объекта и магматической серии одной из набора имеющихся эталонных формаций может быть осуществлено с помощью следующей статистики:

$$W = \sum_{j=1}^m \frac{n}{2 s_{tj}^2(d)} \sum_{i=1}^n z_{ji}^2, \quad (15)$$

где  $z_{ji} = [x_j(d_i) - \hat{X}_{tj}(d_i)]$  (здесь  $x_j(d_i)$  — значение  $j$ -го признака в объекте при значении аргумента (ранжирующего параметра), равном  $d_i$ ). Как известно, число  $W$  в условиях нулевой гипотезы представляет собой значение случайной величины, распределенной асимптотически, как  $\chi^2$  с  $m \cdot n$  степенями свободы. Изучаемый объект принадлежит эталонному классу (формаций), для критерия сравнения с которым выполняется соотношение  $W_{\min} \leq \chi_{m \cdot n, q}^2$ . В соответствии с принципами построения методики и критериев справедливость нулевой гипотезы свидетельствует об отсутствии существенных различий в закономерном изменении признаков для двух сравниваемых объектов, а минимальное в этих условиях значение критерия — о максимальной близости данных объектов в смысле этой нулевой гипотезы. В ситуации, когда  $W_{\min} > \chi_{m \cdot n, q}^2$  решение может быть лишь относительным, исследователь не может обоснованно (на основании результатов статистического анализа) отнести изучаемый объект к одному из эталонных классов. В подобном случае можно лишь определить, что объект по данному свойству (закономерному изменению петрохимических признаков) ближе всего к одному из эталонных классов (формаций), при сравнении с которым получено минимальное значение критерия  $W$  среди всех  $k$  его значений. В аналогичной постановке метод был применен при формационной диагностике кайнозойских вулканитов Камчатки (см. гл. 6).

Многолетний опыт применения рассматриваемой методики свидетельствует о том, что при использовании петрохимической информации для обоснования выводов при решении задач формационного анализа, наиболее распространенного в геологической науке и практике уровня обобщений (регионального, межрегионального,

глобальн"ого), рассмотренные выше методы недостаточно эффективны. Собенно существенным следует считать их недостаточную эффективность при прогнозно-металлогенических исследованиях, которые являются наиболее распространенными и наиболее важными. В этих случаях значительно более эффективно применение методов анализа петрохимической информации с помощью методов проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), с дискретизацией множества значений аргумента  $U$  на интервалы. Следует учитывать, что применение этих методов требует большей информационной обеспеченности выборочных совокупностей. Однако указанный выше уровень обобщений в большинстве случаев обеспечен достаточным для обоснованного решения объемом информации: не менее 25 наблюдений в минимальной по объему выборке.

Методы определения меры сходства-различия закономерного изменения петрохимических характеристик в магматических сериях с дискретизацией значений ранжирующего параметра на интервалы предполагают необходимость предварительного выявления некоторых важных условий их применимости.

В первую очередь необходимо рассмотреть возможность, правомочность и эффективность дискретизации множества значений аргумента при сравнительном анализе случайных функций. Основанием для перехода к дискретизации множества значений аргумента послужило известное из теории вероятностей представление о "вертикальном окне" случайного процесса, детально рассмотренное Г. Крамером и М. Лидбеттером. В теории случайных процессов понятие "вертикального окна" является основой для представления случайного процесса в виде многомерной случайной величины, размерность которой определяется количеством "вертикальных окон" в области определения аргумента. Следовательно, с этих позиций дискретизация множества значений аргумента является корректной. Однако в данной ситуации более существенно обеспечение сохранности вида детерминированной компоненты. В этой проблеме можно выделить два взаимосвязанных аспекта: 1) возможность сохранения; 2) обеспечение степени сохранности вида природной изменчивости, достаточной для обоснованного решения поставленных задач. Что касается возможности сохранения вида детерминированной компоненты при дискретизации оси значений аргумента, то принципиальное существование ее не вызывает сомнений, по крайней мере для решения обсуждаемых в работе задач. Достаточно убедительно об этом свидетельствует, в частности, критерий правильности аппроксимации нелинейной регрессионной зависимости (по С.А. Айвазяну, 1968). Эталоном зависимости в этом критерии является поведение признака, отраженное в последовательности его средних значений в интервалах дискретизации закрепленной случайной величины (оценки аргумента).

Другим важным аспектом рассматриваемой проблемы является



степень сохранности природного вида изменчивости признаков, которая явно зависит от числа интервалов дискретизации множества значений аргумента. Действительно, при двух интервалах дискретизации любая как угодно сложная зависимость будет сведена к прямой линии, при трех — к параболе. В то же время большое число интервалов, в частности, больше  $N/3$ , существенно повышает влияние шумовой составляющей, что нежелательно. Каким же способом определить число интервалов дискретизации, обеспечивающее как сохранность вида природной изменчивости признаков, так и надежность результатов, зависящих от влияния случайных флуктуаций? С.А. Айвазян рекомендовал формулу для примерной оценки числа интервалов

$$k \approx \log_2 N + 1, \quad (16)$$

где  $N$  — минимальное среди всех выборок число наблюдений в общем интервале значений ранжирующего параметра (в пределах множества  $U$ ). Однако следует отметить, что в приложении к анализу петрохимической информации число интервалов, получаемое в результате применения формулы (15), несколько завышено по сравнению с их количеством, которое устанавливается опытным путем. Причина этого заключается в следующих особенностях петрохимической информации и рассматриваемых задач геологии. Из выражения (16) следует, что количество интервалов зависит только от числа наблюдений в выборке. Однако в приложении к петрохимической информации существенное значение имеет и содержание кремнезема (типовой ранжирующий параметр для серий нормального ряда дифференциации), а в общем случае — объем множества значений аргумента или протяженность отрезка оси его значений. Это положение можно проиллюстрировать, в частности, работами специалистов, развивающих и поддерживающих представление о породных группах. Например, в работе Э.П. Исоха и Б.Ф. Налетова [23] интервал определения основной петрографической единицы (породной группы) определяется в 6 %  $\text{SiO}_2$ , а разновидности, сопровождаемые определяющими приставками мела-, мезо-, лейко-, соответствуют интервалам в 2 % кремнезема. Эти авторы считают петрологически нецелесообразным более короткие, чем длиной в два процента, интервалы кремнекислотности при подразделении пород на разновидности. Автор настоящей работы полностью согласен с этим мнением, в частности, при анализе петрохимической информации в формационных и прогнозно-металлогенических целях. Следует учитывать, что определение числа и, как следствие, протяженности по оси аргумента каждого интервала (особенно при использовании в этой роли содержащий кремнезема) в задачах петрохимического анализа исключительно на основе формулы (16) не всегда целесообразно.

Таким образом, приведенные рассуждения о необходимом и достаточном числе интервалов дискретизации, которое обеспечивает в рассматриваемых задачах сохранение природного вида законо-

мерной изменчивости признаков, позволяют, во-первых, констатировать, что данная проблема не тривиальна, и, во-вторых, предложить обобщенную по результатам опыта автора рекомендацию. Естественно, что данная рекомендация в первую очередь учитывает рассматриваемые в работе задачи.

Подготовка петрохимической информации к сравнительному анализу закономерной изменчивости признаков с применением методов, основанных на дискретизации множества значений аргумента, должна включать следующие последовательные этапы: 1) выбор общего для всех изучаемых объектов интервала значений ранжирующего параметра; 2) определение совокупности с минимальным числом наблюдений в этом интервале; 3) выявление числа интервалов, обеспечивающее решение задачи и соответствующее информационной обеспеченности выборок.

Рассмотрим более детально последний этап, при проведении которого необходимо руководствоваться следующими правилами: 1) число интервалов дискретизации не должно быть меньше четырех; 2) максимальное число интервалов не должно быть больше  $N_{\min}/5$ ; 3) при использовании в качестве ранжирующего параметра содержания кремнезема следует учитывать, что протяженность интервала в содержаниях  $\text{SiO}_2$  должна быть не менее 1,5 %.

В случаях, когда в качестве ранжирующего параметра используется не содержание кремнезема, а какой-либо другой параметр (железистость, индекс дифференциации, щелочность, значение главной компоненты или показатель, соответствующий представлениям исследователя), выполнение двух первых правил необходимо. Третье, естественно, невыполнимо и исследователь в таких случаях должен учитывать его смысл. Как видно из содержания этого правила, при организации интервалов дискретизации желательно, чтобы протяженность интервала была близка к естественному подразделению всей ассоциации пород объекта на группы, соответствующие в первом приближении номенклатурным разновидностям пород. Более дробное подразделение затрудняет петрологическую интерпретацию результатов анализа петрохимической информации.

Рассмотрим особенности применения статистических методов проверки нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), в соответствии с конкретными ситуациями, возникающими при использовании петрохимической информации в формационном и прогнозно-металлогенетическом анализе.

Положим, что в распоряжении исследователя имеется петрохимическая информация в виде, аналогичном приведенному выше [см. выражение (10)]. Имеет смысл объяснить содержание некоторых не участвующих в выражении (10) обозначений:  $X_{ti}/d_{ti} = \{x_{t1}/d_{t1}, \dots, x_{tj}/d_{tj}, \dots, x_{tm}/d_{tm}\}$ , где  $j$  — номер признака ( $j = 1, 2, \dots, m$ );  $i$  — номер анализа ( $i = 1, 2, \dots, N_t$ );  $t$  — номер выборочной совокупности ( $t = 1, 2, \dots, k$ ). Для всех выборочных совокупностей должно выполняться соотношение:  $d_{t1} \leq d_{t2} \leq \dots \leq d_{ti} \leq \dots \leq d_{tN_t}$ , т.е. данные должны быть упорядочены



по возрастанию значений ранжирующего параметра. Информационные массивы каждой совокупности организуются в  $q$  интервалов дискретизации. Необходимо учитывать, что число и границы интервалов для всех совокупностей, участвующих в процедуре сравнения и классификации, должны быть одинаковыми.

Наиболее простая ситуация возникает при необходимости сопоставления двух магматических объектов. Подобные задачи требуют решения для обоснования выводов при выявлении особенностей формирования магматических объектов одной формационной принадлежности, разных зон, структурных этажей, регионов, при определении комагматичности вулканических и плутонических комплексов, при сравнении рудоносных и безрудных объектов и т.д. Во всех случаях подобного типа указанные выше нулевые гипотезы могут быть проверены с помощью следующей статистики:

$$W = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^g \frac{z_{ji}^2 n_{ti} n_{ki}}{s_{tji}^2 n_{ki} + s_{kji}^2 n_{ti}}, \quad (16)$$

где  $z_{ji}$  — разность средних значений  $j$ -го признака в  $i$ -м интервале, т.е.  $z_{ji} = (\bar{x}_{tji} - \bar{x}_{kji})$  при проверке нулевой гипотезы (4) и  $z_{ji} = (\bar{x}_{tji} - \bar{x}_{tj}) - (\bar{x}_{kji} - \bar{x}_{kj})$  (здесь  $\bar{x}_{tj}$  и  $\bar{x}_{kj}$  — средние арифметические значения  $j$ -го признака, вычисленные по  $t$ -й и  $k$ -й выборкам соответственно без учета подразделения на интервалы, т.е. оценки безусловного математического ожидания при проверке нулевой гипотезы (6));  $n_{ti}$  и  $n_{ki}$  — число наблюдений в  $i$ -м интервале для первого и второго объекта соответственно;  $s_{tji}^2$  и  $s_{kji}^2$  — оценки дисперсии  $j$ -го признака в  $i$ -м интервале соответственно для первого и второго объекта. В условиях справедливости нулевой гипотезы, определяемой выражением (4) или (6), число  $W$  представляет собой значение случайной величины, распределенной приблизительно как  $\chi^2$  с  $mq$  степенями свободы.

При региональном уровне формационных и металлогенических обобщений исследователь, как правило, имеет дело с набором объектов изучения. Для областей с широким проявлением эндогенного петрогенезиса при решении таких задач, как определение близости условий проявления магматизма при формировании нескольких интрузивных или вулканических комплексов, при выборе комплексов, составляющих вулкано-плутоническую формацию, и во многих подобных ситуациях возникает необходимость сравнительного изучения и определения возможности классификации набора объектов в группы общности (классы). Необходимость анализа набора объектов при решении одной задачи и следующей за процедурой сравнения задачей классификации по близости изучаемых характеристик предъявляет некоторые специфические требования к методу решения, которым недостаточно полно удовлетворяют приведенный выше критерий и методы его применения.

Применение процедуры классификации при анализе набора объектов с использованием любых количественных мер в первую очередь требует единства меры при измерении расстояния между изучаемыми объектами в пространстве признаков, на котором строится процедура классификации. Именно этому требованию и не отвечает рассмотренный выше критерий, определяемый выражением (17). В каждом из  $k(k-1)/2$  попарных сопоставлений  $k$  объектов изучения величина расстояния, фиксируемая значением  $W$  при данном значении аргумента  $d_i$ , нормируется различным по величине множителем [знаменатель выражения (17)]. Количественное выражение нормирующего для меры сходства множителя определяется величиной условной дисперсии  $s_{tj}^2$ , значение которой для каждого интервала и объекта в целом различно.

В результате попарных сравнений объектов и составления матрицы значений критерия, аналогичной приведенной в табл. 1, анализ полученных значений критерия в единой процедуре классификации затруднен. Причиной этого затруднения является влияние различий в величине нормирующего множителя при сравнении каждой из пар. В связи с этим при сравнительном анализе набора объектов изучения ( $k > 2$ ) рекомендуется использовать следующую статистику:

$$W = \sum_{j=1}^m \frac{1}{s_j^2} \sum_{i=1}^g \frac{z_{ji}^2 n_{ti} n_{ki}}{n_{ti} + n_{ki}}. \quad (18)$$

Для приведения меры сходства-различия закономерного изменения признаков в магматических сериях всех объектов к единой размерности в выражение (18) введена оценка условной дисперсии  $s_j^2$ , обобщенная по всем интервалам дискретизации и участвующим в процедуре объектам. Оценка указанной условной дисперсии осуществляется следующим образом. Сначала устанавливается обобщенная по всем интервалам одной выборки условная дисперсия каждого из  $m$  признаков

$$s_{tj}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^g n_{ti} - 1} \sum_{i=1}^g (n_{ti} - 1) s_{tj}^2. \quad (19)$$

Следующим этапом является вычисление оценки условной дисперсии, обобщенной по всем выборкам, представляющим объекты

$$s_j^2 = \frac{1}{\sum_{t=1}^k N_t - 1} \sum_{t=1}^k (N_t - 1) s_{tj}^2. \quad (20)$$



Вычисление оценки условной дисперсии на основе формул (19) и (20) дает возможность единообразного определения меры сходства-различия и простого перехода к процедуре классификации. В приведенных условиях мера сходства-различия устанавливается с помощью выражения (18). Для всех возможных пар изучаемых объектов определяется мера сходства-различия и на основе результатов этой процедуры составляется таблица значений критерия (18), аналогичная табл. 1 и служащая основой для анализа полученных результатов. Весьма эффективным способом визуализации этих результатов и основой для последующих выводов и обобщений является построение дендрограммы. Метод построения дендрограммы заимствован из работы У. Крамбейна, Р. Кауфмена и М. Мак-Кеммона [20]. Вид дендрограмм и принципы их интерпретации рассмотрены при анализе результатов применения данной методики (см. главы 6 и 7).

Применение критерия, определяемого выражением (18), требует обоснования правомочности вычисления обобщенной оценки условной дисперсии. Переход к обобщенной оценке дисперсии основан на следующих предположениях. При вычислении оценки дисперсии по всем интервалам одной совокупности предполагается, что случайные флуктуации значений около тренда функциональной изменчивости данного признака одинаковы вне зависимости от значения аргумента и выдерживаются на всем интервале его возможных значений. В данном случае проблема рассматривается лишь в отношении петрохимических характеристик разновидностей пород. Правомочность подобного предположения во многом определяется длиной интервала кремнекислотности, в пределах которого измеряется мера сходства-различия. Естественно, что рассмотрение ограниченного по интервалу значений кремнекислотности материала не дает основания считать эту проблему сколько-нибудь существенной, однако при длине интервала кремнекислотности, превышающей 10 %, она становится весьма важной.

Известно, что концентрации окислов таких петрогенных элементов, как магний, кальций, двух- и трехвалентное железо в интервале кремнекислотности от 60 до 75 %, изменяются в 10 раз. Зависимость значения дисперсии от величины среднего определяет существенное изменение дисперсии этих окислов при указанном размахе содержаний кремнезема. Естественно, в подобных ситуациях, т.е. при значительных колебаниях значений ранжирующего параметра (в частности, содержаний кремнезема), рассматриваемое предположение не выполняется. Однако и в таких случаях можно рекомендовать обобщение по всем интервалам для вычисления оценки условной дисперсии, так как опыт работы с этим критерием показал устойчивость соотношений мер сходства-различия при переходе к обобщенной оценке дисперсии. Естественно, что при этом несколько увеличивается чувствительность меры в основной части ряда (60–65 %  $\text{SiO}_2$ ) и снижается ее чувствительность в кислой части магматической

серии (70—75 % SiO<sub>2</sub>). Однако следует отметить, что при использовании указанной меры эту ее особенность обязательно следует учитывать при интерпретации полученных результатов.

Вычисление оценки условной дисперсии, обобщенной по всем совокупностям, предполагает однородность случайных флуктуаций для всех изучаемых совокупностей. Основанием для подобного вывода является формулировка нулевой гипотезы (4), в соответствии с которой процессы формирования объектов изучения не различаются по характеру закономерного изменения вещества при их становлении. Следовательно, предположение о сопоставимости случайных флуктуаций в наблюдаемых объектах следует считать вполне оправданным.

В реальных ситуациях может оказаться нецелесообразным обобщение оценки дисперсии по всем интервалам дискретизации множества значений аргумента. Неоправданность обобщения условий дисперсии для некоторых петрохимических признаков и типов пород продемонстрирована выше. Причина нецелесообразности процедуры обобщения условной дисперсии легко интерпретируется петрологически при использовании содержаний кремнезема в качестве ранжирующего параметра (аргумента). В то же время при изучении набора объектов необходимость сохранения единства масштаба определяемой меры сходства-различия остается актуальной. В таком случае предлагается осуществлять обобщение оценки условной дисперсии по одинаковым интервалам всех выборок с помощью следующего выражения:

$$s_{ji}^2 = \frac{1}{\sum_{t=1}^k n_{ti} - 1} \sum_{t=1}^k (n_{ti} - 1) s_{tji}^2. \quad (21)$$

Для определения меры сходства-различия петрохимических составов одинаковых разновидностей пород используется следующий критерий:

$$W = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^g \frac{z_{ji}^2 n_{ti} n_{ki}}{s_{ji}^2 (n_{ti} + n_{ki})}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^g \frac{z_{ji}^2 n_{ti} n_{ki}}{s_{ji}^2 (n_{ti} + n_{ki})}}. \quad (22)$$

Все обозначения, а также распределение статистики в условиях справедливости нулевой гипотезы аналогичны приведенным ранее [см. выражения (17) и (20)].

Рассматриваемые статистические методы сравнения закономерного изменения петрохимических характеристик в магматических сериях с достаточной полнотой обеспечивают решение задач анализа петрохимических данных при формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях. Естественно, что приведенный набор



критериев не охватывает все множество реальных ситуаций. В связи с этим при необходимости решения задач, требующих применения других методов сравнительного анализа петрохимической информации, читателю можно рекомендовать работу [10].

Полная процедура реализации рассмотренных выше методов демонстрируется на примере решения конкретных задач и на реальном материале (см. главы 6 и 7). Ниже приведен краткий анализ методологических и методических преимуществ (более детально и конкретно этот вопрос также будет рассмотрен при разборе примеров в главах 6 и 7) предлагаемого методологического подхода и формального аппарата анализа петрохимической информации при решении широкого класса задач формационного и прогнозно-металлогенического анализа магматических объектов.

Организация петрохимической информации в виде моделей процессов формирования изучаемых объектов (магматических серий), математические модели и статистические методы сравнения и классификации объектов по характеру закономерного изменения признаков в процессе петрогенезиса существенно повышают как информационную отдачу петрохимических данных, так и количественную обоснованность генетических выводов и обобщений. С этих позиций методологическое значение рассматриваемых в работе подхода и методов анализа петрохимических данных достаточно существенно. Обоснованность этого положения демонстрируется ниже на примере генетической интерпретации результатов применения методики (см. главы 6 и 7). Естественно, что приведенная генетическая интерпретация не является единственно возможной в представлениях о характере изменения вещественных свойств пород в процессе петрогенезиса. Не единственными являются и принципы математического моделирования, сравнения и классификации, составляющие существо предлагаемой методики. В связи с этим приведенную оценку методологического значения подхода и методики можно считать предварительной, основанной на результатах недостаточно широкого применения методики.

Рассмотрим методические преимущества предлагаемой методики по сравнению с другими широко применяемыми в геологии математическими методами анализа петрохимических данных близкого целевого назначения. Естественно, что основным аспектом сопоставления является решение задач сравнения и, особенно, классификации. Именно эти задачи составляют основу содержания процедуры применения петрохимической информации при решении задач формационного и прогнозно-металлогенического анализа магматических объектов.

Одна из наиболее важных и сложных задач — это выявление особенностей магматических объектов одной формационной принадлежности, но различающихся типом или масштабами ассоциированного с их формированием рудогенеза. Очевидно, что решение задач такого класса с использованием количественной информации и математических методов может обеспечить только формальный аппарат

сравнения с высокой различающей способностью (мощностью критерия), поскольку в таких ситуациях трудно ожидать больших различий как в самих объектах, так и в петрохимических свойствах одинаковых разновидностей пород. Можно показать, что мощность предлагаемых критериев\* существенно выше, чем статистических методов сравнения, основанных на анализе неупорядоченной (бесструктурной) петрохимической информации. Здесь имеются в виду известные методы сравнительного анализа объектов: Рао—Уилкса, Хотеллинга, Сиджела—Тьюкки, применения дискриминантных функций, обобщенного расстояния Махаланобиса и др. Вывод о более высокой различающей способности (мощности) критериев сравнения условных средних явно следует из известного для двухмерного случая соотношения условной и безусловной дисперсий, предложенного С.А. Айвазяном

$$\frac{D\xi}{D(\xi/\eta)} = \frac{1}{1 - \rho_{\xi\eta}^2}, \quad (23)$$

где  $D\xi$  — безусловная дисперсия  $\xi$ ;  $D(\xi/\eta)$  — условная дисперсия  $\xi$  при условии  $\eta$ ;  $\rho_{\xi\eta}$  — коэффициент корреляции  $\xi$  и  $\eta$ . Из выражения (23) следует, что при значении коэффициента корреляции, равном 0,8, безусловная дисперсия почти в три раза превышает по величине условную. Усиление зависимости между  $\xi$  и  $\eta$  (положим, что  $\rho_{\xi\eta} = 0,9$ ) приводит к тому, что безусловная дисперсия в 5 раз больше, чем условная. Известно, что близкие к указанным значениям оценок коэффициента корреляции довольно часто фиксируются для содержаний петрогенных окислов. В частности, можно указать такие пары:  $\text{SiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  и т.п. Соотношение величин условной и безусловной дисперсий нелинейно возрастает при переходе от двухмерного случая к многомерному, т.е. при переходе от дисперсии к ковариационной матрице, повышение размерности которой еще более увеличивает разрыв между значениями условной и безусловной мер рассеяния.

Во всех статистических методах и критериях сравнения и классификации мера рассеяния, численно выражаемая через значение дисперсии, является неизменным членом нормирующего множителя. Из этого следует, что как критерии сравнения, так и, что особенно важно, правила классификации, построенные на упорядоченной в магматические серии петрохимической информации, обладают значительно большей различающей способностью (мощностью), чем аналогичные по назначению статистические методы сравнения и классификации, использующие бесструктурную петрохимическую информацию.

Другое свойство, характеризующее предлагаемую методику,

\* Имеется в виду не математически доказанная мощность критериев, а различающая способность, которая в математической статистике отражается в мощности критерия.



следует из способа ее реализации и позволяет существенно расширить информационную базу для выбора информативной в конкретной задаче комбинации признаков. Предположим, что изучается изменение шести признаков, поведение которых характеризуется пятью интервалами дискретизации. Вычисление значения меры сходства-различия представляется, как минимум, на 19 дендрограммах. Дендрограммы строятся для каждого признака (6) и еще одна по суммарному поведению всех признаков. Кроме того, такое же число дендрограмм строится по результатам сопоставления характера эволюции признаков. В дополнение к ним определяется мера сходства-различия по поведению всех признаков в каждом из пяти интервалов дискретизации. Анализ 19 дендрограмм позволяет выбрать признаки (поведение их содержаний или характер эволюции) и интервалы, поведение признаков в которых в наибольшей степени различает изучаемые классы объектов (или сами объекты). Окончательный (для данной задачи и имеющейся информации) выбор наилучшей комбинации признаков и участка оси аргумента, отвечающих решаемой задаче, осуществляется вычислением меры по последовательно изменяющемуся набору признаков и интервалов дискретизации до выполнения условия максимального сходства объектов одного класса при максимальном различии между объектами разных классов (см. гл. 6). Таким образом, вместо шести признаков исследователь имеет значения 19 мер, анализ которых дает большие возможности для выбора информативной комбинации признаков. Кроме того, возможность суммирования мер по каждому признаку и интервалу определяет гибкость процедуры выбора информативной комбинации признаков.

Основой рассматриваемой методики является не только сохранение природного вида закономерной изменчивости признаков в процессе петрогенезиса, но и ее сравнение количественными методами. Следует отметить, что в сферу сравнения и классификации, осуществляемых с помощью этой методики, в первую очередь включается характер закономерного изменения петрохимических характеристик в моделях процессов петрогенезиса. Именно эта ключевая для объектов эндогенного происхождения информация в должной мере не участвует ни в одном из методов сравнения и классификации с применением математических методов.

Одним из важных аспектов применения математических методов и ЭВМ является возможность восприятия и геологическая интерпретируемость всех процедур, входящих в методику формального анализа геологической информации. С этих позиций не менее важными свойствами рассматриваемой методики являются, во-первых, простота интерпретации каждого этапа при реализации процедуры, во-вторых, возможность наглядного изображения как петрохимической информации, так и измеряемой в процедуре меры сходства-различия и, в-третьих, легко анализируемые и интерпретируемые результаты применения методики, которые представляются в виде дендрограмм.

АНАЛИЗ ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ  
ФОРМАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
МАГМАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

При решении задач формационных исследований магматических пород в данной работе существо задач формационного анализа, определение, объем и роль формационных исследований в геологии магматических исследований не рассматриваются. В качестве базовых приняты представления Ю.А. Кузнецова и Э.П. Изоха о магматических формациях, содержании и роли формационного анализа. В связи с методической направленностью работы рассмотрение ограничено только анализом применения количественных методов сравнения и классификации магматических объектов на базе петрохимической информации при решении задач, возникающих в процессе формационного анализа магматических пород.

В соответствии с методологией применения математических методов во всех случаях изложение построено следующим образом: постановка задач, выбор рациональной методики их решения, определение набора эффективных для их решения методов и интерпретация полученных результатов в соответствии с содержанием геологической задачи.

Использование предлагаемой методики анализа петрохимических данных демонстрируется на примерах решения следующих задач: формационной диагностики магматических объектов, выбора составляющих для вулканоплутонической формации, определения объема абстрактной формации (формационного типа), подбора теоретической модели петрогенезиса для описания процесса формирования реальных объектов и некоторых возникающих при этом менее крупных задач.

Необходимость привлечения петрохимической информации и математических методов ее анализа для решения задачи формационной диагностики магматических пород возникает чаще всего в ситуациях, когда в регионе широко и интенсивно проявлена магматическая деятельность (интрузивная, вулканическая или обе одновременно). При определении принадлежности изолированного выхода или небольшого тела магматических пород к одной из известных в регионе формаций возникают неизбежные трудности, связанные с наличием нескольких выделенных и охарактеризованных магматических комплексов (конкретных формаций) разного возраста при близком петрографическом составе слагающих их ассоциаций пород. Например, в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса нередко ситуации, когда необходимо определить формационную принадлежность отдельного выхода эффузивно-пирокластических образований к известным вулканическим комплексам. В связи с этим реализация задачи формационной диагностики осуществлена



на примере кайнозойских вулканитов Центрально-Камчатского вулканического пояса.

В кайнозойский период становления Корякско-Западнокамчатской тектонической зоны существенную роль играли вулканические процессы, область проявления которых выделяется как Центрально-Камчатский вулканический пояс (ЦКВП) [32]. Необходимость изучения процессов петрогенезиса в пределах этого пояса определяется как широкой распространенностью продуктов вулканической деятельностью, так и, что особенно важно, перспективностью в отношении полезных ископаемых территории его распространения, обусловленной проявлением вулканических процессов, и связанных с ними процессов формирования интрузивных формаций и эндогенного рудообразования.

Пространственное положение и этапы тектоно-магматической истории Центрально-Камчатского вулканического пояса, несмотря на некоторые различия, определяются исследователями достаточно четко, так же как и место его в общей металлогении региона. Не наблюдается больших разногласий и в определении стратиграфического положения, структурно-тектонической позиции и металлогении вулканических формаций этого пояса. При сходных представлениях об общей последовательности развития вулканизма в пределах пояса и его петрологическом выражении существенно большее разнообразие во взглядах исследователей отмечается при определении объема, возрастного диапазона проявления, преобладающего характера вулканической деятельности и принадлежности конкретных разрезов и выходов той или иной вулканической формации (свите, серии). Основные разногласия относятся к обоснованности выделения, возрасту и объему вулканических серий в интервале от нижнего миоцена до среднечетвертичного отдела. Причем выделяемые в самостоятельный комплекс (формацию липарито-дацитов) продукты вулканизма предположительно среднемиоценового возраста представляют собой основную рудовмещающую и картируемую единицу. Однако ряд специалистов считает такое выделение необоснованным.

Объективной причиной расхождений во взглядах на возраст и объем формаций в разных пространственных зонах и участках их развития являются трудности картирования, сопоставления и формационной диагностики вулканических пород в регионе: 1) практическое отсутствие в пределах развития вулканических образований палеонтологических остатков существенно усложняет определение возрастного положения и длительности вулканической деятельности при становлении формаций; 2) невозможность надежного визуального, а во многих случаях и микроскопического определения степени диагенетических преобразований и, как следствие, уверенного разделения по этому признаку пород, принадлежащих соседним по стратиграфическому положению формациям; 3) близкие петрографические особенности одинаковых разновидностей пород разных формаций. Определение принадлежности вулканических комплек-

сов одной формации существенно усложняется наличием локальных петрографических и петрохимических особенностей пород, обусловленных спецификой деятельности вулканических центров в период становления каждой из вулканических формаций. Наглядным примером является существенное различие в петрохимических свойствах пород Северного и Южного прорывов Большого трещинного Толбачинского извержения (1975—1976 гг.), разделенных несущественным, с геологических позиций, отрезком времени (около недели) и пространства (сотни метров) [26]. Кроме того, породы всех кайнозойских вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса по классификации Куно принадлежат к одному, гиперстеновому, типу.

Все это свидетельствует об исключительной сложности картирования и формационного анализа кайнозойских образований в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса. Практическая потребность в надежных критериях определения формационной принадлежности вулканических образований определяется необходимостью составления геологической карты региона и оценки степени перспективности групп формаций относительно обнаружения проявлений рудогенеза. Известно, что большинство интересующих промышленность рудопроявлений и месторождений связано с процессами плутонического и эффузивного магматизма, проявленными в рассматриваемом регионе в доверхнемиоценовое время. Формирование рудопроявлений и месторождений ртути, сурьмы, серы и некоторых других видов полезных ископаемых ассоциируется с плиоценовым вулканизмом. Вулканические формации четвертичного возраста следует признать бесперспективными, поскольку в районах развития вулканических образований этих формаций не известны заслуживающие внимания проявления рудогенеза.

С учетом вышеизложенного наиболее важным для обеспечения эффективного картирования и формационного анализа кайнозойских вулканических образований Центрально-Камчатского вулканического пояса в прогнозно-металлогенических целях следует считать решение следующих задач: 1) выявление особенностей магматических серий, отображающих специфику условий формирования кайнозойских вулканических формаций пояса с характерным для них ассоциированным рудогенезом; 2) разработку методики количественной классификации продуктов вулканической деятельности к одной из формаций с целью оценки их металлогенической специализации; 3) тектоно-магматическую интерпретацию различий в условиях проявления процессов формирования кайнозойских формаций этого пояса.

Рассматриваемые ниже результаты получены при анализе петрохимической формации о составе пород пяти вулканических формаций: 1) неогеновой андезитовой АФН; 2) неогеновой липарито-дацитовой ЛДФН; 3) плиоценовой андезито-базальтовой АБФН; 4) древнечетвертичной базальтовой БФQ; 5) средне-верхнечетвертич-



ной андезито-базальтовой АБФQ. Петрохимическая информация представлена анализами пород вулканических комплексов соответствующих формаций, территориально расположенных в пределах Южной Камчатки (южнее широты с. Начики) и принадлежащих Центрально-Камчатскому вулканическому поясу. Перечисленные формации по представлениям автора и некоторых других исследователей (В.С. Шеймович, С.Е. Апрельков, Г.М. Власов и др.) соответствуют следующим свитам и сериям Центральной Камчатки: АФN — крапивинской, или паратунской, свите ( $Pg_3 - N_1^1$ ); ЛДФN — березовской свите ( $N_1^2$ ); АБФN — алнейской серии ( $N_1^3 - N_2$ ); БФQ — древнечетвертичным платобазальтам ( $Q_1$ ); АБФQ — образованиям средне-верхнечетвертичных стратовулканов ( $Q_{2-3}$ ). Выборочные совокупности, характеризующие состав пород каждой из формаций, достаточно представительны и имеют следующий объем: неогеновая андезитовая 34; неогеновая липарито-дацитовая 77; неогеновая андезито-базальтовая 75; четвертичная базальтовая 83; четвертичная андезито-базальтовая 61 (всего 330).

Следует учитывать, что указанный объем выборок включает только анализы разновидностей пород, принадлежащих общему для всех формаций интервалу кремнекислотности 49–70 %. Породы, содержание  $SiO_2$  в которых не принадлежит этому интервалу, в исследовании не включены. Рассмотренные выше трудности формационного и металлогенического анализа кайнозойских вулканических образований Камчатки, а также имеющийся фактический материал обеспечивают наглядную демонстрацию применимости и эффективности применения разработанной методики типизации петрогенетических процессов при формационно-металлогенических исследованиях вулканических образований. Однако рассматриваемые результаты нельзя считать окончательным решением поставленных проблем. Подобные исследования требуют значительных по объему и тщательных полевых исследований по выбору эталонных разрезов формаций, аналитических данных высокого качества, а также представительных выборок с примерным соответствием относительных объемов аналитических данных по разновидностям пород их доле в общем объеме формации. Выполнение этих требований при организации эталонных совокупностей позволит на базе методики типизации петрогенетических процессов построить критерии для количественной классификации изучаемого объекта (лавовый комплекс, отдельный разрез, выход) к одной из вулканических формаций. Безусловно, подобные исследования послужат существенным дополнением критериев металлогенической и прогнозной оценки территорий Центрально-Камчатского вулканического пояса.

Эпохи кайнозойской вулканической активности в пределах современного Центрально-Камчатского вулканического пояса приурочены к разным этапам истории развития Курило-Камчатской геосинклинальной системы. Естественно, что конкретные тектоно-магматичес-

кие условия проявления вулканических процессов не могли оставаться неизменными и эволюционировали в соответствии с динамикой геосинклинальной системы. Следовательно, основываясь на принятом принципе отображения условий проявления петрогенетического процесса в свойствах сформированных им ассоциаций пород, определение стабильности условий проявления процессов формирования вулканических формаций может быть осуществлено с помощью рассмотренного выше аппарата типизации процессов петрогенезиса на основе сходства-различия петрохимических свойств пород, соответствующих одинаковым состояниям процесса, и характера эволюции их составов.

Решение сформулированных выше задач осуществлялось сравнением между собой всех пяти изучаемых формаций с целью определения меры сходства-различия функционального изменения признаков в процессе становления вулканических комплексов. Проверка гипотезы (4) позволяет установить близость петрохимического состава всех одинаковых разновидностей пород. Результаты проверки этой гипотезы ниже в таблицах и рисунках обозначаются термином "петрохимия". Сравнение характера изменения составов пород в процессе петрогенезиса при исключении влияния возрастных петрохимических особенностей осуществлялось проверкой гипотезы (6), результаты которой в дальнейшем обозначаются термином "эволюция".

Из приведенного выше объема выборок и общего интервала кремнекислотности следует, что сравнение и классификация вулканических серий могут быть осуществлены с помощью критерия при дискретизации множества значений условия (аргумента).

В рассматриваемом случае общий интервал кремнекислотности (49—70 %) подразделен на семь интервалов по 3 %  $\text{SiO}_2$  каждый. Выборочные наблюдения распределяются по интервалам в соответствии со значением содержания кремнезема. На основе этих наблюдений в каждом из интервалов определяются по известным формулам значения оценок среднего и дисперсии для каждого из признаков (содержаний окислов). Как известно в процедуре участвуют пять объектов, в связи с чем для определения единой для всех меры сходства-различия оценки условной дисперсии обобщаются как по всем интервалам, так и по всем объектам. В табл. 2, необходимой для вычислений без помощи ЭВМ, а также для лучшего понимания процедуры с целью возможного составления алгоритма для ЭВМ приведены значения оценок условных средних, число наблюдений в каждом из интервалов, а также значения оценок условной дисперсии каждого из признаков, обобщенные по всем интервалам дискретизации данной выборки. Пример исходной информации для определения меры сходства-различия характера эволюции признаков приведен в табл. 3. В целях сокращения приводятся данные лишь для одной выборки: андезитовой формации АФН. При необходимости аналогичные таблицы можно получить на основе табл. 2.



Оценки средних содержаний окислов в интервалах дискретизации для ряда формаций

Интервал по $\text{SiO}_2$ , %	Содержание окислов, %							$n_i$
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	
<i>Неогеновая андезитовая формация АФН</i>								
49,01—52,00	50,76	18,48	9,72	4,73	8,99	2,78	0,91	7
52,01—55,00	53,82	20,66	7,55	3,75	5,36	2,89	1,11	3
55,01—58,00	57,42	18,57	7,45	3,11	5,50	3,22	1,56	7
58,01—61,00	59,38	19,02	5,84	2,70	5,14	3,02	1,75	5
61,01—64,00	63,53	16,66	5,13	1,97	4,00	3,09	2,11	4
64,01—67,00	65,25	17,42	3,95	1,42	3,32	3,52	2,55	5
67,01—70,00	68,65	14,93	3,20	0,66	3,14	3,49	3,64	3
$\bar{x}_{tj}$	60,18	17,70	6,18	2,61	5,11	3,17	1,98	—
$s_{tj}^2$	—	1,78	0,71	0,68	1,25	0,42	0,32	—
<i>Неогеновая липарито-дацитовая формация ЛДФН</i>								
49,01—52,00	49,04	18,03	9,51	6,56	9,09	3,36	0,42	1
52,01—55,00	54,78	17,20	8,36	3,96	6,19	3,42	2,14	1
55,01—58,00	56,79	17,07	7,71	3,19	6,41	3,68	1,94	16
58,01—61,00	59,55	16,99	6,48	2,89	5,49	3,21	2,35	13
61,01—64,00	62,48	16,39	5,65	1,97	3,95	3,94	2,85	20
64,01—67,00	65,50	16,18	4,43	1,34	2,89	3,71	2,75	20
67,01—70,00	68,04	15,56	4,03	1,12	3,24	3,51	2,55	6
$\bar{x}_{tj}$	61,75	16,54	5,86	2,23	4,48	3,68	2,49	—
$s_{tj}^2$	—	1,18	1,07	0,69	1,04	0,55	0,42	—
<i>Плиоценовая андезито-базальтовая формация АБФН</i>								
49,01—52,00	50,96	19,13	9,77	4,48	8,71	2,88	1,27	21
52,01—55,00	53,98	18,92	8,68	3,84	7,69	2,53	1,17	12
55,01—58,00	56,93	16,66	7,84	3,27	6,89	3,05	1,42	16
58,01—61,00	59,09	17,00	7,39	2,66	6,16	3,42	1,59	12
61,01—64,00	61,79	16,26	7,06	2,30	6,15	3,31	1,82	3
64,01—67,00	65,92	14,92	4,87	1,53	3,62	3,89	2,14	4
67,01—70,00	68,54	15,25	3,74	1,46	3,70	3,61	1,82	7
$\bar{x}_{tj}$	57,92	17,27	7,52	3,10	6,61	3,14	1,52	—
$s_{tj}^2$	—	2,85	0,96	0,53	1,67	0,28	1,12	—
<i>Четвертичная базальтовая формация БФQ</i>								
49,01—52,00	50,45	18,40	9,75	4,97	9,28	3,03	1,26	19
52,01—55,00	53,24	17,23	9,47	4,69	8,52	3,08	1,26	17

Интервал по SiO <sub>2</sub> , %	Содержание окислов, %							n <sub>i</sub>
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
55,01—58,00	56,44	17,32	8,18	3,21	6,62	3,36	1,63	10
58,01—61,00	59,67	17,08	7,06	2,83	5,68	3,69	2,23	16
61,01—64,00	62,74	17,11	4,80	2,40	3,57	4,66	2,58	11
64,01—67,00	65,64	16,10	4,72	1,82	2,90	4,45	2,73	7
67,01—70,00	69,04	13,30	6,11	1,76	3,82	3,91	1,80	3
$\bar{X}_{tj}$	57,04	17,16	7,65	3,50	6,39	3,58	1,83	—
$s_{tj}^2$	—	3,22	2,69	1,02	0,82	0,35	0,22	—

## Четвертичная андезитово-базальтовая формация АБФQ

49,01—52,00	50,45	18,84	10,05	5,63	9,12	2,80	0,82	14
52,01—55,00	53,26	18,18	9,44	4,77	8,81	3,13	0,89	9
55,01—58,00	56,75	17,37	7,85	3,71	7,42	3,33	1,48	10
58,01—61,00	59,42	17,31	7,27	2,95	6,08	3,93	1,56	10
61,01—64,00	62,34	16,78	6,03	2,04	5,02	3,64	2,10	9
64,01—67,00	65,62	16,22	5,11	1,74	3,88	3,87	1,91	6
67,01—70,00	68,25	15,07	4,15	1,35	4,10	4,20	1,55	3
$\bar{X}_{tj}$	56,35	16,82	7,33	3,39	6,54	3,37	1,40	—
$s_{tj}^2$	—	1,26	1,45	0,72	0,53	0,62	0,29	—

Примечания:  $n_i$  — число наблюдений в  $i$ -м интервале;  $\bar{X}_{tj}$  — оценка безусловного среднего  $j$ -го признака, вычисленная по всей выборке;  $s_{tj}^2$  — оценка условной дисперсии  $j$ -го признака, обобщенная по всем интервалам дискретизации.

Таблица 3

Оценки средних для содержаний окислов, центрированные безусловным средним, в интервалах дискретизации для неогеновой андезитовой формации АФN

Интервал по SiO <sub>2</sub> , %	Содержание окислов, %							n <sub>i</sub>
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
49,01—52,00	50,76	0,78	3,54	2,12	3,88	-0,39	-1,97	7
52,01—55,00	53,82	2,96	1,37	1,14	0,25	-0,28	-0,87	3
55,01—58,00	57,42	0,87	1,27	0,50	0,39	0,05	-0,42	7
58,01—61,00	59,38	1,32	-0,34	0,09	0,03	-0,15	-0,23	5
61,01—64,00	63,53	-1,04	-1,05	-0,64	-1,11	-0,08	0,13	4
64,01—67,00	65,25	-0,28	-2,23	-1,19	-1,79	0,35	0,57	5
67,01—70,00	68,65	-2,27	-2,98	-1,95	-1,97	0,32	1,66	3
$\bar{X}_{tj}$	60,18	17,70	6,18	2,61	5,11	3,17	1,98	—
$s_{tj}^2$	—	1,78	0,71	0,68	1,25	0,42	0,32	—

Примечание. Цифры в клетках (кроме графы SiO<sub>2</sub>) — разность среднего арифметического значения признака в интервале и безусловного среднего  $\bar{X}_{tj}$  для данной выборки.



При реализации задачи, как видно из табл. 2—3, использовано семь петрогенных окислов, вместо привычных десяти. Применение сокращенного числа окислов следует из имеющегося опыта и некоторых особенностей методики. К сожалению, к настоящему времени автор не имеет достаточного числа примеров анализа магматических объектов, представляющих все разнообразие петрологических типов пород. В связи с этим ниже приведены причины сокращения набора признаков и их обоснование, следующие из опыта изучения магматических объектов, как правило, нормального ряда дифференциации. При решении задач, связанных с анализом петрохимических данных для серий иного петрологического типа, необходимо учесть приведенное обоснование и сделать соответствующую особенностям изучаемых серий поправку.

Как следует из данных, приведенных в табл. 2—3, в дальнейшем рассмотрении не участвуют содержания  $TiO_2$  и  $MnO$ , а содержание окиси и закиси железа дано в суммарной форме. В результате применения методики к решению многочисленных задач было установлено, что в подавляющем большинстве случаев содержания  $TiO_2$  и  $MnO$  не несут полезной в данных задачах информации, причем последние определяются при анализе с большей, чем остальные окислы, погрешностью. Кроме того, включение этих двух окислов в набор анализируемых признаков существенно повышает неопределенность выводов, усиливая влияние случайного шума на результат. Приведенное выше указание на необходимость введения поправки в используемый в данной работе набор петрохимических признаков относится, в частности, к изучению мафических и ультрамафических серий, в процессе которого анализ содержаний  $TiO_2$  безусловно необходим. Для серий подобного типа содержание  $TiO_2$  является одним из наиболее важных показателей, определяющих петрологический тип магматических объектов.

Представление окисного и закисного железа в суммарной форме также является результатом опыта по применению методики к анализу петрохимической информации. Степень окисленности железа в магматических породах по мнению многих исследователей имеет генетический смысл [1]. Естественно, что с учетом подобного мнения суммирование содержаний окисного и закисного железа нерационально. Следует признать, что в данном случае участие рассматриваемых признаков в суммарной форме или отдельно является полностью прерогативой исследователя и определяется конкретной задачей и его петрологическими представлениями. В данном же случае участие содержаний окисного и закисного железа в суммарной форме основано на приведенных ниже свойствах информации и методики.

При использовании петрохимических данных, заимствованных из литературных источников, исследователь не имеет возможности определить условия отбора проб на силикатный анализ и, как следствие, не имеет уверенности в сохранности природных соотношений окисного и закисного железа. Чтобы убедиться в сложности генети-

Таблица 4

Номера проб	Содержание окислов, %			
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO
1	50,04	7,02	2,89	9,91
2	50,12	2,85	6,93	9,78
3	50,26	6,73	3,59	10,32
4	50,28	2,64	7,32	9,96
5	50,02	7,98	2,70	10,68
6	50,76	2,24	7,88	10,12

ческой интерпретации соотношений окисного и закисного железа, достаточно посмотреть на ряд близких по кремнекислотности лав вулкана Толбачик (извержение 1975—1976 гг.), представленных в табл. 4 [26].

Нетрудно заметить, что представленные в таблице лавы имеют очень близкое содержание SiO<sub>2</sub> и суммарного железа. В то же время содержания окисного и закисного железа колеблются в широких пределах. Причем вклад Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или FeO в общую сумму железистости резко меняется. Однако не эта неустойчивость соотношений окисного и закисного железа служит основной причиной суммирования их содержаний. Главной причиной является необходимость выполнения требования минимизации условной дисперсии. Именно обеспечение минимально возможного для имеющейся информации значения условной дисперсии существенно повышает мощность меры сходства-различия и обеспечивает надежное решение задач.

Определим и сопоставим оценки условной дисперсии (при условии содержаний SiO<sub>2</sub> из интервала 50,01—51,00 %) для содержаний Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO по данным табл. 4. В результате вычислений оценок условной дисперсии были получены следующие их значения (в %): Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6,76; FeO 5,71 и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO 0,12. Очевидно, что меньшая (почти на два порядка) величина условной дисперсии для содержаний суммарного железа обеспечивает существенно более высокую мощность меры сходства-различия при использовании суммы окисного и закисного железа, вместо их отдельно представляемых содержаний. Приведенный пример соотношения дисперсий в данном случае, хотя и основан на реальных данных из одной выборки, имеет все же иллюстративный характер. В реальных ситуациях различия в условной дисперсии суммарных содержаний железа по отношению к отдельным не столь впечатляющи, но все же существенны. В связи с этим во всех задачах, приведенных в работе, окисное и закисное железо рассматривалось в суммарной форме. Прежде всего это объясняется спецификой решаемых задач, которые требуют максимальной мощности критериев и правил классификации. В то же время, как показано выше, применение содержаний железа в



окисной и закисной форме раздельно не обеспечивает необходимой для данных задач мощности критериев.

Содержательный смысл формационной диагностики вулканических пород представляет собой задачу классификации с обучением. Основной задачей в подобной процедуре является этап обучения и выбора информативных признаков, обеспечивающих максимальную эффективность правил классификации, поэтому дальнейшая процедура формационной диагностики требует выявления признаков, различающих объекты обучения (конкретные формации). С этой целью было осуществлено определение меры сходства-различия всех эталонных формаций между собой. Мера сходства-различия закономерного изменения признаков в изучаемых сериях устанавливалась с помощью статистики (18). При проверке нулевых гипотез, определяемых выражениями (4) и (6), как уже указывалось ранее, использование критерия различается только способом определения  $z_{ji}$ . При сравнении характера эволюции признаков интервальные средние центрируются значением безусловного среднего  $x_{tj}$ , где  $j$  — номер признака;  $t$  — номер выборки. Оценки средних для каждого интервала приведены в табл. 2, а пример центрированных интервальных средних безусловным — в табл. 3.

В результате многократного использования методики установлено, что рациональной является процедура определения меры сходства-различия [проверка гипотез (4) и (6)], которая осуществляется следующим способом. При сравнении каждой пары из набора исследуемых объектов для каждого признака и интервала устанавливаются значения критерия, которыми заполняются таблицы, аналогичные табл. 5 [при сравнении петрохимических особенностей — гипотеза (4)] и табл. 6 [при сравнении характера эволюции — гипотеза (6)]. Подобные таблицы составляются по результатам сравнения каждой пары объектов. В рассматриваемом случае для петрохимии будет заполнено  $(5 \times 4) / 2$  таких таблиц и столько же для эволюции, т.е. 20 таблиц. В табл. 5 и 6 приведен пример сравнения двух формаций: АБФН и БФQ. Суммируя значения критерия по строке, мы получаем значение меры сходства-различия для поведения данного признака  $W_j$ , соответствующего данной строке. Осуществляя операцию суммирования по каждому из столбцов таблицы, исследователь получает значение меры сходства-различия в каждом из интервалов  $W_j$ , которое отражает близость (или различие) поведения всех признаков в данном интервале. На пересечении столбца  $W_j$  и строки  $W_j$  располагается значение суммарной меры сходства-различия  $W$ , которое отражает результат сравнения поведения всех окислов во всех исследуемых интервалах.

Следует указать, что при сравнении всех объектов между собой величина меры сходства-различия вполне сопоставима, так как она имеет единый масштаб измерения. Для обеспечения этого предварительно была вычислена оценка условной дисперсии каждого признака, обобщенная по всем выборкам. Процедура вычисления оценки

Таблица 5

Результаты сравнения петрохимических особенностей пород вулканических формаций АБФН и БФQ по содержаниям окислов и интервалам кремнекислотности

Интервалы по SiO <sub>2</sub> , %	Содержание окислов, %						W <sub>i</sub>
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
49,01—52,00	3,79	0,02	0,88	1,92	0,27	0	6,83
52,01—55,00	2,11	1,73	0	0,82	0,16	0,57	5,39
55,01—58,00	1,22	0,03	0	0,53	0,89	1,29	3,96
58,01—61,00	0,52	1,17	0	3,20	4,17	5,04	14,10
61,01—64,00	1,87	4,13	2,02	8,10	8,04	2,03	26,19
64,01—67,00	0,86	0	1,78	0,87	6,25	5,39	15,15
67,01—70,00	2,52	9,72	1,05	0,04	0,74	0,04	14,11
W <sub>j</sub>	12,89	16,80	5,68	15,48	20,52	14,36	85,73

Примечание. W<sub>j</sub> — значения критерия W для j-го окисла по всем интервалам; W<sub>i</sub> — значение критерия W для i-го интервала по всем окислам.

Таблица 6

Результаты сравнения характера эволюции содержаний окислов в магматических сериях вулканических формаций АБФН и БФQ

Интервалы по SiO <sub>2</sub> , %	Содержание окислов, %						W <sub>i</sub>
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
49,01—52,00	1,98	0,61	0,07	4,01	1,69	1,83	10,19
52,01—55,00	3,64	0,01	0,10	2,41	0,79	0,04	6,99
55,01—58,00	1,42	0,01	2,11	0,23	0,01	0	3,78
58,01—61,00	0,52	1,69	0,21	1,04	0,01	1,26	4,73
61,01—64,00	1,73	4,66	0,07	5,75	2,69	0,77	15,67
64,01—67,00	1,08	0,02	0,02	0,39	0,06	0,47	2,04
67,01—70,00	2,37	7,61	0,01	0,50	0,14	0,68	11,31
W <sub>j</sub>	12,74	14,61	2,59	14,33	5,39	5,05	54,71

условной дисперсии, обобщенной по всем интервалам и выборкам, а также ее величина для каждого признака приведена в табл. 7.

Информация, сведенная в таблицы, аналогичные приведенным (см. табл. 5 и 6), служит основой для формирования матриц меры сходства-различия по всем из анализируемых признаков. Близость поведения содержаний каждого из признаков в изучаемых эталонных объектах (формах) фиксируется таблицами меры сходства-различия, подобными приведенной в табл. 8. Клетки верхней половины таблицы заполняются значениями соответствующих окислам граф



Результаты вычисления оценки условной дисперсии, обобщенной по всем выборкам кайнозойских вулканических формаций, для содержаний окислов

Окислы	Процедуры вычисления	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1/329 (76·1,84 + 74·2,85 + 82·3,22 + 33·1,78 + 60·1,26)	2,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	1/329 (76·1,07 + 74·0,96 + 82·2,69 + 33·0,71 + 60·1,45)	1,47
MgO	1/329 (76·0,69 + 74·0,53 + 82·1,02 + 33·0,68 + 60·0,72)	0,73
CaO	1/329 (76·1,04 + 74·1,67 + 82·0,82 + 33·1,25 + 60·0,53)	1,04
Na <sub>2</sub> O	1/329 (76·0,55 + 74·0,28 + 82·0,35 + 33·0,42 + 60·0,62)	0,43
K <sub>2</sub> O	1/329 (76·0,42 + 74·1,12 + 82·0,22 + 33·0,32 + 60·0,29)	0,49

Таблица 8

Результаты определения меры сходства-различия содержаний CaO в одинаковых разновидностях пород ("петрохимия") и характер эволюции содержаний ("эволюция") CaO в магматических сериях вулканических формаций Камчатки (интервал 49—70 % SiO<sub>2</sub>)

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФQ
	Петрохимия				
ЛДФН		13,77	4,08	6,09	20,28
АБФН	49,09		15,48	25,08	13,23
БФQ	32,18	14,33		26,15	15,66
АФН	17,54	17,82	29,22		42,10
АБФQ	32,62	8,54	8,74	8,27	
Эволюция					

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 5 \text{ ст. св.}} = 11,1$  (ст. св. — степени свободы).

из таблиц, аналогичных табл. 5. Значения критерия отвечают степени близости поведения содержаний данного окисла в магматических сериях сравниваемых объектов. В петрологическом смысле это значение отвечает близости содержаний данного окисла в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород, составляющих ассоциации сопоставляемых объектов. В нижней части табл. 8 приведены значения меры сходства-различия для характера эволюции данного признака в каждой паре изучаемых объектов. В табл. 9 приведены значения меры сходства-различия петрохимических составов пород из одного интервала кремнекислотности. Анализ подобных таблиц

Результаты определения меры сходства-различия петрохимических составов пород вулканических формаций Камчатки в интервале 49—52 % SiO<sub>2</sub>

Формации	ЛДН	АБФН	БФQ	АФН	АБФQ
	Петрохимия				
ЛДФН		4,40	4,88	2,78	2,37
АБФН			6,83	2,33	15,74
БФQ				4,28	7,67
АФН					5,29
АБФQ					
Эволюция					

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 6 \text{ ст. св}} = 12,6$ .

позволяет определить те интервалы (разновидности пород), которые максимально различают изучаемые объекты. В то же время те интервалы дискретизации, в пределах которых объекты не различаются, могут быть исключены из дальнейшего анализа. В частности, приведенный пример (интервал 49—52 % SiO<sub>2</sub>) свидетельствует о необходимости исключения этого интервала из рассмотрения.

Результаты сравнения объектов по характеру изменения петрохимических составов разновидностей пород из общего интервала значений оси кремнекислотности составляют содержание матриц меры сходства-различия с учетом поведения всех петрогенных окислов и характера их эволюции. Матрица подобных мер для рассматриваемого примера приведена в табл. 10. Наглядное изображение приведенных в табл. 10 результатов сравнения пяти вулканических формаций представлено в виде дендрограммы на рис. 2.

Сравнение петрохимических свойств одинаковых разновидностей пород изучаемых объектов и характера эволюции их составов в интервале 49—70 % SiO<sub>2</sub> позволило установить следующее. Для ассоциаций пород формаций ЛДФН и БФQ характерно, что одинаковые разновидности пород в представляющих их магматических сериях неразличимы на всем указанном интервале значений кремнезема по комплексу анализируемых в данной задаче признаков. Аналогичное соотношение наблюдается и для пары формаций АБФН — АБФQ. В то же время указанные пары имеют существенные различия как между собой, так и с формацией АФН по петрохимическому составу одинаковых разновидностей пород. По характеру эволюции признаков в магматических сериях вулканические формации подразделя-



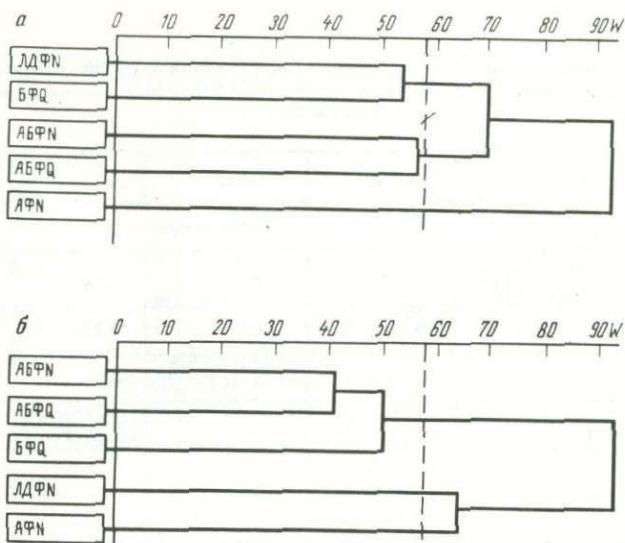


Рис. 2. Дендрограммы меры сходства-различия содержаний (а) и характера их эволюции (б) для шести петрогенных окислов в одинаковых разновидностях пород в магматических сериях вулканических формаций Камчатки (интервал 49–70 %  $\text{SiO}_2$ )

ются на две группы: одну группу составляют неразличимые по данному признаку формации АБФН, БФQ, АБФQ, а другую — неразличимые при уровне значимости 0,01 формации АФН и ЛДФН. Различия между этими группами весьма существенны.

С позиций решаемых в данном случае задач приведенные выше результаты свидетельствуют о различиях в условиях проявления процессов вулканизма при становлении формаций, которые отображены в петрохимических особенностях ассоциаций пород. Анализ результатов сравнения формаций по каждому из петрогенных окислов, а также в каждом из интервалов дискретизации позволил выявить наиболее устойчивые признаки, различающие вулканические формации. Так, разновидности пород, соответствующие одинаковым состояниям процесса, различны практически для всех формаций (кроме пары АФН — ЛДФН) по содержаниям  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в интервале кремнекислотности 52–67 % (табл. 11, рис. 3). В этом же интервале породы, принадлежащие формациям АФН и ЛДФН, существенно различаются содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким образом, на выявленных признаках может быть построено правило классификации изучаемого объекта (комплекса, разреза, выхода) к одной из пяти кайнозойских вулканических формаций.

С позиций оценки металлогенической специализации и перспективности территорий развития кайнозойских вулканических образо-

Результаты сравнения петрохимических составов шести петрогенных окислов одинаковых разновидностей пород и характера эволюции составов кайнозойских вулканических формаций Камчатки

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФН
	Петрохимия				
ЛДФН		61,23	53,52	54,50	66,95
АБФН	145,34		85,73	87,65	56,65
БФQ	173,37	54,51		121,76	64,89
АФН	63,37	67,54	93,94		105,71
АБФQ	117,98	40,55	45,36	54,44	
Эволюция					

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 4 \text{ ст. св}} = 58,10$ .

Таблица 11

Результаты сравнения содержаний СаО, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород кайнозойских вулканических формаций в интервале 52–67 % SiO<sub>2</sub>

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФQ
ЛДФН		37,23	28,54	23,86	38,94
АБФН			28,11	25,60	26,63
БФQ				45,95	32,23
АФН					58,90
АБФQ					

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 15 \text{ ст. св}} = 25,00$ .

ваний ЦКВП необходимо различать три группы формаций: 1) АФН и ЛДФН; 2) АБФН; 3) БФQ и АБФQ. Первая группа формаций объединяет вулканические образования, вмещающие широкий спектр проявлений рудогенеза и требующие проведения поисковых работ на участках их распространения. Вторую группу составляет плиоце-



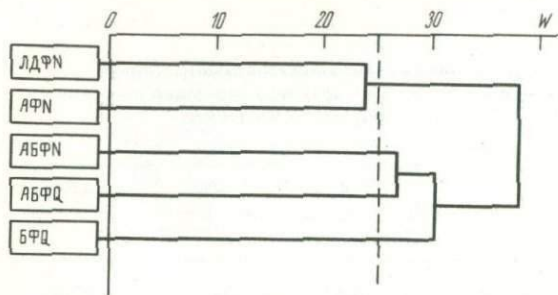


Рис. 3. Дендрограмма меры сходства-различия содержаний  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в одинаковых разновидностях пород в магматических сериях вулканических формаций Камчатки (интервал 52–67 %  $\text{SiO}_2$ )

новая андезито-базальтовая формация, с участками развития которой ассоциируются проявления эпитермального рудогенеза: рудопоявления и месторождения ртути, сурьмы, серы и некоторых других металлов. К группе практически бесперспективных в отношении проявлений рудогенеза формаций относятся формации БФQ и АБФQ.

Анализ результатов сравнения вулканических формаций дает возможность организовать процедуру классификации изучаемого вулканического комплекса к одной из групп формаций, различающихся металлогенической специализацией и перспективностью. В рассматриваемом случае правило классификации построено на признаках, максимально различающих группы формаций разной металлогенической специфики и перспективности. Так, группа наиболее перспективных формаций АФН и ЛДФН существенно отличается от остальных формаций как содержаниями  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород интервала 52–67 %  $\text{SiO}_2$  (см. табл. 10 и рис. 3), так и по характеру эволюции содержаний ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ) и  $\text{MgO}$  в интервале 49–70 %  $\text{SiO}_2$  (табл. 12 и рис. 4). Различение формаций АБФН и безрудных формаций (БФQ и АБФQ) осуществляется по первому из указанных выше признаков (содержаниям  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в интервале 52–67 %  $\text{SiO}_2$ , см. рис. 4). С петрологических позиций представляют интерес и другие из выявленных особенностей магматических серий, как следствие условий формирования вулканических формаций: неразличимость петрохимических особенностей пород всех формаций в интервале 49–52 %  $\text{SiO}_2$  (рис. 5), а также неразличимость одинаковых по кремнекислотности разновидностей пород всех формаций по содержанию ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ) и  $\text{MgO}$  на всем интервале содержаний (49–70 %)  $\text{SiO}_2$  (рис. 6). Возможные причины выявленных особенностей условий становления кайнозойских вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса (ЦКВП) будут рассмотрены ниже.

Эффективность применения выявленных признаков и предлагаемой процедуры классификации для определения формационной принадлежности и перспективности на обнаружение проявлений рудогенеза проверялась на объектах, информация о которых не исполь-

Рис. 4. Дендрограммы меры сходства-различия характера эволюции содержаний  $Fe_2O_3 + FeO$  и  $Mg$  в магматических сериях вулканических формаций Камчатки (интервал 49–70%  $SiO_2$ )

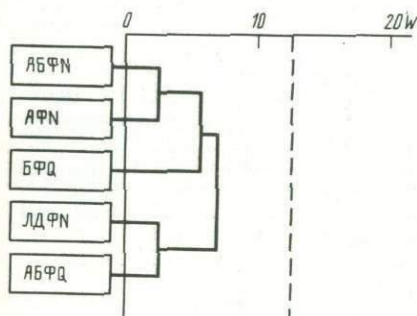
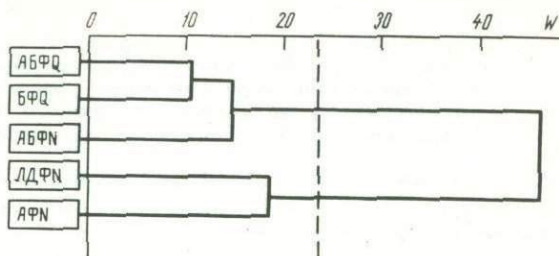


Рис. 5. Дендрограмма меры сходства-различия петрохимических составов наиболее основных разновидностей пород вулканических формаций Камчатки (интервал 49–52%  $SiO_2$ )

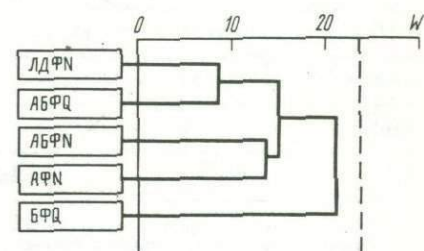


Рис. 6. Дендрограмма меры сходства-различия содержаний  $Fe_2O_3 + FeO$  и  $MgO$  в одинаковых разновидностях пород магматических серий вулканических формаций Камчатки (интервал 49–70%  $SiO_2$ )

зовалась при составлении эталонных выборок. В процедуру классификации были вовлечены две совокупности: древнечетвертичные базальты (материал В.К. Ротмана) и алнейская серия (материал В.Н. Бонданерко и М.Ю. Хотина). Петрохимическая информация представляет породы, распространенные в пределах Срединного хребта (центральная часть Камчатки). Таким образом, процедура проверки правила классификации имеет одну цель: определение универсальности выявленных и используемых в правиле классификации формационных признаков. Универсальность используемых в правиле классификации формационных признаков позволит, во-первых, определить устойчивость тектоно-магматических условий проявления вулканических процессов по всей области современного Центрально-Камчатского вулканического пояса в период становления каждой из пяти изученных формаций и, во-вторых, построить правило классификации вулканических пород всего пояса вне зависимости от территориальной принадлежности эталонов.

Использование именно этих выборочных совокупностей для экзамена, кроме наличия достоверной информации, определялось



Результаты сравнения содержаний  $Fe_2O_3 + FeO$  и  $MgO$  в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород и характера эволюции содержаний этих элементов в магматических сериях кайнозойских вулканических формаций Камчатки в интервале 49–70 %  $SiO_2$

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФН
	Петрохимия				
ЛДФН		11,40	19,07	9,29	8,54
АБФН	55,24		22,57	13,46	18,97
БФQ	90,84	17,20		26,12	16,01
АФН	18,74	16,29	31,87		21,86
АБФН	54,77	12,52	10,55	27,36	
Эволюция					

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 14 ст. св} = 23,7$ .

и трудностью формационной диагностики двух соседних по стратиграфическому положению формаций: плато-базальтов  $Q_1$  и алнейской серии  $N_1^3 - N_2$  в условиях различной их перспективности. О трудности формационного деления вулканических образований этих формаций, особенно при изучении изолированных участков их развития, свидетельствует следующий пример: некоторые исследователи объединяют эффузивы алнейской серии и плато-базальты в одну стратиграфическую единицу и даже включают в такой смешанный комплекс вулканы липарито-дацитової формации (березовская свита), отличающиеся существенно большей перспективностью.

Как уже указывалось ранее, признаками, различающими кайнозойские вулканические формации Камчатки, являются содержания  $CaO$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$  в интервале 52–67 %  $SiO_2$ . Именно поведение этих окислов как обобщенный признак и применялось в рассмотренной ниже процедуре классификации. При определении формационной принадлежности пород, данные о петрохимических составах которых заимствованы из материалов В.К. Ротмана, из 13 анализов использовано только 5. Причины исключения нескольких анализов следующие: некоторые анализы не принадлежат интервалу кремнекислотности 52–67 %; один анализ сомнителен (плагиобазальт, верховье р. Кахтуна), так как с точностью до десятых долей совпадает с другим анализом (долерит, верховье р. Кахтуна), отнесенным к алнейской серии; два анализа (базальты р. Копылье) отобраны из базальтовых потоков, сформированных в процессе ареального вулка-

Результаты сравнения содержаний  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород вулканических формаций и алнейской серии Срединного хребта Камчатки в интервале 52—67 %  $\text{SiO}_2$

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФQ	alp
ЛДФН		37,23	28,54	23,86	38,94	32,38
АБФН			28,11	25,60	26,63	16,21
БФQ				49,95	32,23	23,49
АФН					49,19	34,61
АБФQ						23,64
alp						

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 15 \text{ ст. св.}} = 25,00$ .

низма  $Q_4$ , поэтому не могут быть включены в выборочную совокупность плато-базальтов  $Q_1$ .

В результате определения меры близости ассоциаций пород каждой из пяти эталонных формаций и классифицируемой совокупности по содержаниям  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в разновидностях пород одинаковой кремнекислотности было установлено, что минимальная величина критерия  $W$  [в данном случае применялся критерий (15)] соответствует сравнению рассматриваемой совокупности и формации плато-базальтов БФQ (допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 15 \text{ ст. св.}} = 25,00$ ): ЛДФН 21,42; АБФН 26,57; БФQ 8,12; АФН 65,41; АБФQ 17,89.

В соответствии с принятой в работе процедурой классификации породы изучаемой совокупности максимально близки по петрохимическим свойствам одинаковых разновидностей пород формации плато-базальтов БФQ. Подобная процедура была применена для классификации вулканических пород Срединного хребта, отнесенных к алнейской серии. Из выборочной совокупности были исключены анализы с неразделенными  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , не принадлежащие интервалу 52—67 %  $\text{SiO}_2$ , а также три образца, два из которых относятся к щелочным вулканитам Западной Камчатки, а один представляет эффузивные образования Командорских островов, не входящие в Центрально-Камчатский вулканический пояс. В процедуру включены 40 анализов, поэтому классификация осуществлялась с помощью критерия (18). Результаты определения меры близости изучаемой совокупности и эталонных формаций приведены в табл. 14 и на рис. 7, из которых следует, что вулканические породы Срединного хребта, отнесенные к алнейской серии, наиболее близки по петрохимическим



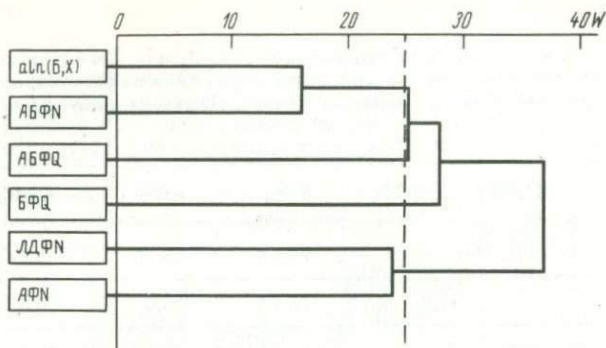


Рис. 7. Результаты определения формационной принадлежности объекта ( $aln$  (БХ), по В.Н. Бондаренко и Н.Ю. Хотину) по содержаниям  $CaO$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$  в одинаковых разновидностях пород магматических серий (интервал 52–67 %  $SiO_2$ ).

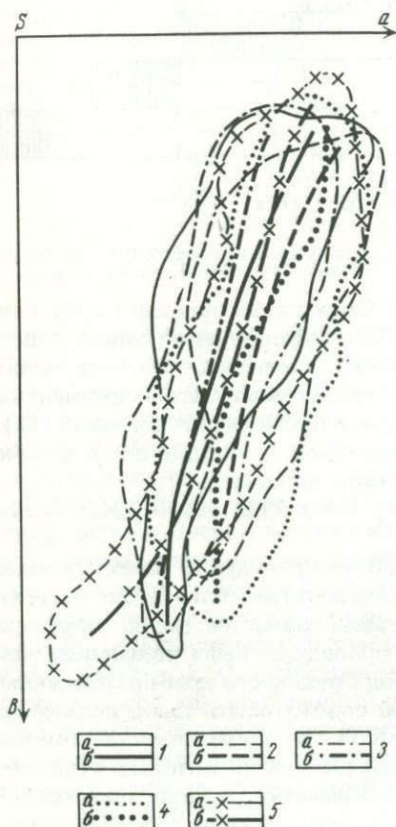


Рис. 8. Диаграмма Заварицкого (грань  $Sab$  тетраэдра) для кайнозойских вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса.

Контурь фигуративных точек ( $a$ ) и вариационные линии ( $b$ ) формаций: 1 — андезитовой; 2 — липарито-дацитовой; 3 — андезито-базальтовой N; 4 — базальтовой; 5 — андезито-базальтовой Q

особенностям одинаковых разновидностей пород формации неогеновых андезито-базальтов АБФН — аналогу алнейской серии. На рис. 7 особенно наглядна эта близость при существенном отличии от породы остальных формаций.





Таблица 14

Результаты сравнения содержаний  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород вулканических и габбро-гранодиоритовой (гб-грд) формации в интервале 52–61 %  $\text{SiO}_2$

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФQ	Гб-грд
ЛДФН		27,24	13,73	14,23	25,47	4,14
АБФН			16,67	23,36	25,55	35,21
БФQ				31,39	11,79	12,17
АФН					44,73	30,35
АБФQ						28,26
Гб-грд						

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 9 \text{ ст. св}} = 16,90$ .

пород, формирующихся на одинаковых стадиях реализации процесса. Следовательно, сравнение петрохимических свойств последовательностей разновидностей пород габбро-гранодиоритовой и вулканических формаций соответствует задаче выбора комагматических серий единой вулcano-плутонической формации.

Сравнение осуществлялось по содержаниям шести петрогенных окислов в интервале кремнекислотности 52–61 %. Результаты сопоставлений приведены в табл. 14 и на рис. 9. Из таблицы и рисунка очевидно, что в принятом понимании комагматичной габбро-гранодиоритовой является неогеновая липарито-дацитовая формация ЛДФН, поскольку одинаковые по кремнекислотности разновидности их пород не различаются по петрохимическим особенностям. Отсюда следует, что по данному признаку (комагматичность среднемиоценовым вулканитам) формирование габбро-гранодиоритовой формации связано с проявлением в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса алеутской фазы складчатости и что участки развития среднемиоценовых вулканитов (березовская свита) должны служить объектом поисковых работ на рудные полезные ископаемые.

Рассмотренные примеры наглядно демонстрируют эффективность применения методики типизации процессов петрогенезиса для формационного анализа вулканических образований с целью оценки перспектив изучаемого участка развития вулканитов на обнаружение проявлений рудогенеза.

Важным результатом анализа примеров является установленная в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса универсальность признаков, на которых построены правила классификации. Это заключение основано на том, что для классификации

предъявлялись выборки, представляющие вулканические формации (свиты, серии) Срединного хребта Центральной Камчатки, в то время как совокупности эталонных формаций организованы на анализах пород Южной Камчатки. Отсюда правомочен вывод: во-первых, выявленные признаки, различающие вулканические формации, отображают наиболее существенные особенности условий проявления процессов вулканизма в соответствующие этапы развития Центрально-Камчатского вулканического пояса, и, во-вторых, сходство тектоно-магматических условий проявления вулканических процессов в кайнозойский период развития Курило-Камчатской геосинклинальной системы в пределах Центральной и Южной Камчатки подтверждает правомочность выделения единой структурно-металлогенической зоны (ЦКВП) с близкими свойствами продуктами магматической деятельности и металлогенической специализации.

Выявленные в результате проведенного анализа различия в тектоно-магматических условиях формирования изученных вулканических формаций, безусловно, отражают особенности развития Курило-Камчатской геосинклинальной системы в рассматриваемый период и требуют тектонической и петрологической интерпретации. Ниже приведены причины, обусловившие возникновение выявленных различий в условиях реализации процессов петрогенезиса при становлении кайнозойских вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса.

Рассмотрим некоторые петрологические аспекты вулканической деятельности в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса. Представление о специфике тектоно-магматической ситуации и ее реализация в истории геологического развития рассматриваемого региона позволят определить геологическое содержание процедуры интерпретаций результатов применения предложенной методики к решению задач формационного анализа.

В первую очередь необходимо кратко остановиться на этапах развития Курило-Камчатской геосинклинальной системы, связанных в основном со становлением Центрально-Камчатского вулканического пояса. В мезозое происходило заложение глубоководного желоба и накопление песчано-сланцевых и кремнисто-вулканогенных толщ собственного геосинклинального этапа. Проявление ларамийской фазы тектогенеза сопровождалось инверсией прогиба, складчатостью, внедрением масс гранитоидной магмы с проявлением процессов мигматизации и контактово-регионального метаморфизма. Этап островных дуг и накопление вулканических толщ характеризует период развития региона с олигоцена по средний миоцен. Алеутская фаза складчатости проявлена в горообразовании и интенсивных блоковых перемещениях. Период с позднего миоцена до антропогена характеризуется широким проявлением вулканизма в условиях увеличивающейся площади суши с повышением роли кислых лав к конечным этапам вулканического цикла. Сахалинская фаза тектогенеза фиксируется блоковой тектоникой и дизъюнктивными нарушениями разного порядка. Затухание горообразующих процессов,



пенепленизация и излияние посторогенных плато-базальтов характерны для древнечетвертичного этапа геологической истории региона.

Рассмотрим некоторые из упоминавшихся выше результатов сравнительного анализа формаций, интерпретация которых представляет интерес с тектонических и петрологических позиций. Так, установленная близость петрохимических составов наиболее основных пород (интервал 49—52 %  $\text{SiO}_2$ ) всех формаций свидетельствует о близости состава исходной магмы для всех кайнозойских вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса. Отсюда естественно предположить, что несмотря на смену тектонических режимов развития региона с олигоценового времени очаги магмагенерации в процессе вулканической деятельности зарождались и функционировали в сходных условиях: на сопоставимой глубине и при близком составе жидкой фазы. Наиболее вероятным следует считать положение очагов магмагенерации в зоне верхней мантии, что совпадает с результатами оценки глубины магматических очагов под действующими вулканами в 60—70 км (по опубликованным данным), и базальтовый (толеитового типа) состав выплавляемого материала.

В результате сравнительного анализа вулканических образований установлено, что все изученные формации неразличимы по содержаниям  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$  и  $\text{MgO}$  в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород. В то же время по характеру эволюции содержаний этих окислов, как отмечалось ранее, вулканические формации Центрально-Камчатского вулканического пояса подразделяются на две группы: доверхнемиоценовых и более поздних по времени формирования формаций. Петрогенетическая интерпретация этого факта и некоторых других особенностей вулканических процессов осуществлена на основе сопоставления процессов формирования вулканических формаций Камчатки и некоторых петрологических моделей. В частности, было проведено сравнение функционального изменения признаков в процессе формирования каждой из пяти изученных вулканических формаций и на двух петрологических моделях: а) модели смешения и б) модели фракционной дифференциации, предложенной М.И. Розиновым и Д.И. Колесниковым [31] для описания процесса формирования средне-верхнечетвертичной андезитобазальтовой формации АБФQ Камчатки. Ограничение использованного набора теоретических моделей обусловлено требованием наличия информации о количественном изменении признаков при реализации модельного процесса.

В результате сравнения процессов формирования пяти вулканических формаций Камчатки и модели смешения (вариант В.С. Попова) было установлено (табл. 15, рис. 10), что модель смешения (МС) по характеру изменения признаков соответствует процессу формирования андезито-базальтовых формаций (неогеновой и четвертичной, т.е. АБФN и АБФQ). Модель смешения не может быть использована для описания характера изменения признаков в процессе формирования формаций ЛДФN и АФN. Формация плато-ба-

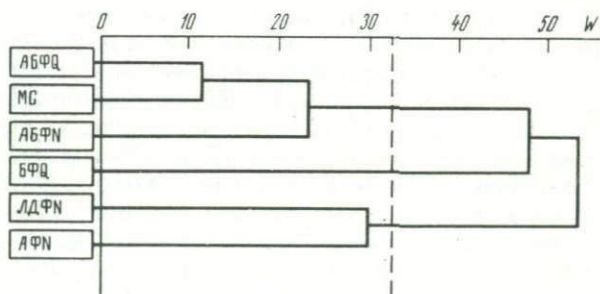
Результаты сравнения содержаний  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород кайнозойских вулканических формаций Камчатки и модели смешения (МС)

Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФН	МС
ЛДФН		44,36	33,46	30,07	56,56	76,37
АБФН			40,35	44,03	32,92	15,77
БФQ				70,08	43,91	59,71
АФН					68,36	32,47
АБФQ						11,24
МС						

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 21 \text{ ст. св}} = 32,7$ .

зальтов БФQ занимает промежуточное положение, хотя она несколько ближе по характеру изменения признаков в процессе петрогенезиса андезито-базальтовым формациям и модели смешения, чем формациям ЛДФН и АФН. Наблюдаемая картина группировки вулканических формаций Камчатки и модели смешения достаточно четко соответствует особенностям тектоно-магматических условий, существовавших в период формирования рассматриваемых вулканических серий. Следует учитывать, что согласно представлениям большинства специалистов образование коры континентального типа в пределах современного ЦКВП совпадает по времени с проявлением предпозднемиоценовой (алеутской) фазы тектогенеза. Отсюда вполне понятна невозможность применения модели смешения для описания процесса формирования неогеновых формаций ЛДФН и АФН, поскольку в период их становления еще не была сформирована кора континентального типа, т.е. отсутствовал гранитный материал в достаточном

Рис. 10. Дендрограмма меры сходства-различия характера изменения содержаний  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в магматических сериях вулканических формаций Камчатки и модели смешения (МС) (интервал 49—70 %  $\text{SiO}_2$ )





для обеспечения функционирования процессов смешения объема. В то же время петрогенетические процессы, формировавшие андезито-базальтовые формации, протекали в условиях уже существовавшей достаточно мощной коры континентального типа, что обеспечило нормальную деятельность процессов смешения. Последнее подтверждается результатами сравнения магматических серий реальных объектов — петрохимических моделей процессов их формирования — и теоретической петрологической модели.

Несколько обособлена формация плато-базальтов, хотя во время ее формирования существовала кора континентального типа. Причина этой обособленности также очевидна: по характеру петрогенетических процессов при плато-базальтовом вулканизме предполагается (приведенные результаты в определенной мере подтверждают это предположение), что тектонической причиной его реализации являются глубинные нарушения коры и трещинные излияния слабодифференцированной магмы. С этим, по-видимому, связана слабая дифференцированность исходного материала или, что аналогично, слабое проявление процессов смешения. В результате этого по характеру последовательности разновидностей пород плато-базальты обособлены как от формаций с явным соответствием модели смешения, так и от альтернативной группы формаций.

Иная модель процесса петрогенезиса предлагается М.И. Розиновым и Д.И. Колесниковым [31] для описания процесса становления средне-верхнечетвертичной андезито-базальтовой формации АБФQ. Они представляют процесс становления формации в виде трех последовательных стадий, отображаемых в наблюдаемом разнообразии и особенностях пород: стадия I — дифференциация в замкнутых условиях при фракционировании кристаллических фаз, соответствующих по составу оливин-анортитовым включениям; стадия II — дифференциация в обстановке контаминации магмы материалом, соответствующим по составу гранодиориту из включений в игнимбритах; стадия III — дифференциация в обстановке фракционирования кристаллических фаз оливин-анортитового состава и магнетита. В работе [31] приведены составы главных разновидностей пород, полученные из модельных построений, что позволило сравнить модельную последовательность разновидностей пород с реальными, наблюдаемыми в изучаемых формациях. В результате проведенных сопоставлений (табл. 16, рис. 11) установлена полная непригодность разработанного М.И. Розиновым и Д.И. Колесниковым варианта модели (МРК) дифференциации магмы в условиях трехстадийного фракционирования для описания процесса формирования как четвертичной андезито-базальтовой формации АБФQ (для которой она предлагается), так и других вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса. Хотя по логике вещей (с учетом обсуждения модели смешения) модель дифференциации должна соответствовать или, по крайней мере, не очень отличаться от процессов формирования неогеновых формаций ЛДФN и АFN. Однако

Результаты сравнения петрохимических составов, представленных пятью петрогенными окислами (щелочи не разделены), одинаковых по кремнекислотности разновидностей пород вулканических формаций Камчатки и петрологических моделей: модели смешения и модели М.И. Розина, Д.И. Колесникова (МРК)

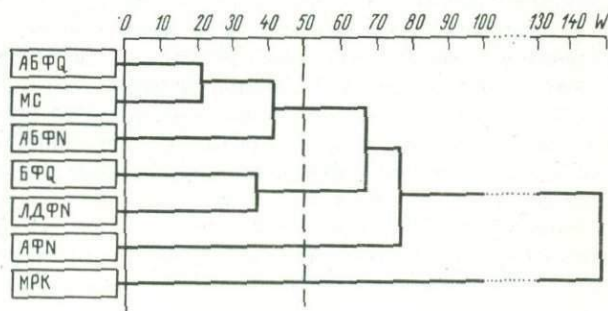
Формации	ЛДФН	АБФН	БФQ	АФН	АБФQ	МС	МРК
ЛДФН		54,10	36,58	53,37	45,47	79,33	264,55
АБФН			78,51	78,07	43,29	38,93	127,92
БФQ				107,07	60,39	82,15	134,12
АФН					86,98	57,49	122,59
АБФQ						21,48	113,86
МС							121,03
МРК							

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 35 \text{ ст. св}} = 49,80$ .

полученный результат относится только к конкретной модели и не является основанием для полного отрицания применимости модели фракционной дифференциации для описания процесса становления хотя бы двух вулканических формаций: ЛДФН и АФН. Можно предположить, что при построении конкретного вещественного выражения процесса были допущены неточности при определении объема, количественных соотношений и динамики фракционируемого материала в период реализации процесса. Правомочность этого предположения подтверждается при анализе диаграмм Куно (рис. 12). Все пять реальных вулканических формаций Камчатки приурочены к зоне базальтовых серий гиперстенового типа, а модель М.И. Розина

Рис. 11. Дендрогаммы меры сходства-различия характера изменения содержаний пяти петрогенных окислов  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  в магматических сериях вулканических формаций Камчатки и петрологических моделях.

МС — модель смешения; МРК — модель М.И. Розина и Д.И. Колесникова





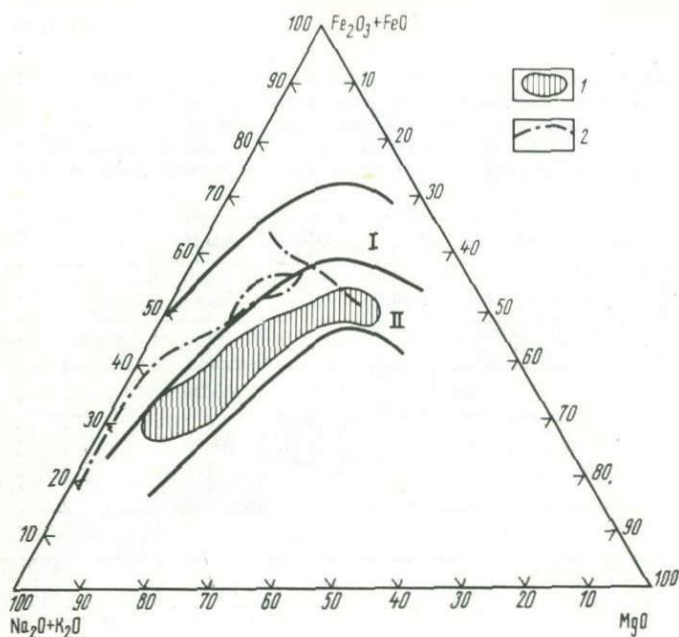


Рис. 12. Треугольная диаграмма  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} - \text{MgO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ .

1 — поле вариационных линий базальтовой, андезито-базальтовых N и Q литариодацитовой, андезитовой формаций; 2 — вариационные линии модели М.И. Розина и Д.И. Колесникова. Области серий: I — пижонитовых; II — гипертеновых

нова и Д.И. Колесникова почти полностью принадлежит области базальтовых серий пижонитового типа, что для кайнозойских вулканитов Центрально-Камчатского вулканического пояса неприемлемо.

Анализ поведения отдельных петрогенных окислов в модели и в реальных сериях возможность предполагать, что авторы рассматриваемой модели за основу состава фракционируемого материала приняли оливин-анортитовые включения (вулкан Ходутка) с примерно равным соотношением  $ol$  и  $an$ . Однако сравнение с реальными сериями свидетельствует о динамическом развитии этого соотношения на разных стадиях процесса: на первых стадиях отделяется существенно меньше оливина, а на последующих — больше полевошпатовых компонентов, чем предполагается авторами этой модели. Все это четко фиксируется на диаграмме Куно (см. рис. 12).

Эволюция тектоно-магматических условий проявления вулканических процессов и формирование кайнозойских вулканических формаций в период становления Курило-Камчатской геосинклинальной системы представляются следующим образом. Особенностью развития кайнозойского вулканизма в рассматриваемом регионе следует считать близкий состав исходного для всех формаций магматического расплава, в первом приближении соответствующего соста-

ву толеитового базальта. Проявление алеутской фазы складчатости, с которой связано формирование земной коры континентального типа, является фактором, существенно изменяющим условия реализации вулканических процессов.

Если в предалеутский этап развития системы формирование вулканических серий обусловлено преимущественно процессом дифференциации исходного материала, то для следующего за алеутским тектогенезом периода характерна существенная роль процессов смешения исходного расплава и материала сформированной коры. Причем наиболее наглядной иллюстрацией этому положению является характер эволюции содержаний  $Fe_2O_3 + FeO$  и  $MgO$  в двух группах формаций (см. рис. 5). Более резкое падение содержаний указанных признаков в процессе формирования доалеутских вулканитов свидетельствует о существенной роли фракционирования оливинов на первых стадиях реализации процесса. Равномерное снижение содержаний  $Fe_2O_3 + FeO$  и  $MgO$  при формировании посталеутских эффузивов обусловлено процессом смешения базальтового и гранитоидного материала в пропорционально изменяющихся соотношениях. Конкретные тектоно-магматические условия становления вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса отображены именно в различном поведении и роли гранитной составляющей, что обусловило возможность определения формационной принадлежности объектов по величине содержаний  $CaO$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$  в разновидностях пород одинаковой кремнекислотности.

Проведение исследования по применению методики типизации петрогенетических процессов для определения перспектив рудоносности кайнозойских вулканических образований Центрально-Камчатского вулканического пояса дают возможность сделать следующие выводы. Несмотря на трудности проведения формационного анализа кайнозойских вулканитов Камчатки, обусловленные близостью состава исходного магматического материала для всех пяти формаций, о чем свидетельствует неразличимость составов разновидностей пород в интервале 49—52 %  $SiO_2$ ; принадлежностью их одному петрологическому типу — гиперстеновому (по Н. Куно); сложностью формационной диагностики по характеру диагенетических преобразований, обусловленную небольшим (с геологических позиций) интервалом времени проявления процессов. Применение методики типизации петрогенетических процессов позволило выявить особенности процессов становления вулканических формаций, отображенные в динамике вещественных свойств магматических серий, и построить количественную меру для классификации объектов к перспективным на обнаружение проявлений рудогенеза разного типа или к классу вулканических образований бесперспективных в этом отношении. Конкретные результаты проведенных исследований можно сформулировать следующим образом.

1. В пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса проявления рудогенеза различного элементного состава ассоциируются с участками распространения массивов формации габбро-



гранодиоритов предверхнемиоценового возраста, и соответственно, рудовмещающими породами для них являются вулканы паратунской АФН и березовской ЛДФН свит. С широко распространенными в ЦКВП образованиями алнейской серии АБФН ассоциируются рудопроявления эпитермального типа и ограниченного элементного состава (Hg, Sb, S и некоторых других). В участках развития вулканических образований более молодого возраста (БФQ, АБФQ) заслуживающих внимания рудопроявлений не обнаружено. Сравнительный анализ процессов формирования перспективных (двух типов) и неперспективных вулканических формаций позволил выявить признаки, максимально различающие альтернативные с металлогенических позиций классы формаций: 1) содержания CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O в одинаковых по кремнекислотности разновидностях пород интервала 52—67 % SiO<sub>2</sub>; 2) характер эволюции содержаний Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO и MgO в интервале SiO<sub>2</sub> 49—70 %. На основе выявленных признаков построена количественная мера для определения принадлежности изучаемого объекта к одному из трех указанных выше классов формаций.

2. Проверка эффективности построенной меры осуществлялась на примере классификации двух объектов: алнейской серии и древнечетвертичных плато-базальтов Срединного хребта. В результате классификации выборочных совокупностей установлено, что максимальное сходство по характеру условий проявления процессов формирования, отображенных в указанных выше признаках, зафиксировано соответственно с эталонной формацией АБФН для первой и с БФQ — для второй; кроме того, построенная на эталонных вулканических формациях Южной Камчатки количественная мера для их распознавания отражает наиболее устойчивые особенности условий проявления процессов вулканизма, существовавшие в период становления каждой из формаций в пределах всей территории Центрально-Камчатского вулканического пояса.

3. Анализ применимости петрологических моделей смешения и фракционной дифференциации (вариант М.И. Розина и Д.И. Колесникова) к описанию процессов становления вулканических формаций Камчатки позволил установить следующее. Приведенная в работе М.И. Розина и Д.И. Колесникова [31] для описания процесса формирования средне-верхнечетвертичных базальтов Камчатки АБФQ модель фракционной дифференциации существенно отличается от реально наблюдаемой динамики свойств в процессе становления как указанной формации, так и любой из рассматриваемых в главе вулканических серий. В то же время модель смешения по поведению наиболее устойчивых признаков близка процессу формирования вулканических серий АБФН, АБФQ и, с некоторыми допущениями БФQ, но не может быть применена для описания процесса формирования более ранних по времени проявления продуктов вулканической деятельности (формаций АФН и ЛДФН). Очевидной причиной дискриминации вулканических формаций по отношению к модели смешения является образование земной коры континентального

типа во время проявления алеутской фазы складчатости и, следовательно, отсутствие гранитоидного материала, необходимого для реализации процесса смешения в период формирования доалеутских вулканических серий АФН и ЛДФН.

Ниже рассматривается применение методики для решения задачи определения принадлежности магматических формаций разных регионов к одному формационному типу (абстрактной формации, по Ю.А. Кузнецову). Выделение и определение объема формационных типов магматических формаций представляет собой задачу более высокого уровня, чем рассмотренные ранее задачи формационного анализа вулканических пород Камчатки. Решение ее предполагает возможность сопоставления формаций разных регионов и различного возраста. Важность решения данной проблемы определяется необходимостью типизации тектоно-магматической обстановки при становлении формаций как основы для металлогенических построений.

Среди интрузивных образований Камчатки достаточно четко выделяются четыре конкретные формации: габбро-плагиогранитовая; вулкано-плутоническая габбро-сиенитов-трахибазальтов; габбро-гранодиоритовая и вулкано-плутоническая гранодиорит-порфиров-дацитов. Краткая характеристика этих формаций по представлениям выделивших их авторов сводится к следующему.

Интрузивные образования, относящиеся к формации габбро-плагиогранитов позднемелового-палеогенового возраста, по мнению Н.Л. Шилина и О.Н. Вольнца, синтетектонические, приуроченные к проявлению в регионе ларамийской фазы складчатости. В массивах формации наиболее распространены разновидности гранодиоритового-плагиогранитового состава с резко подчиненным значением более основных разностей. По ряду признаков предполагается, что магматические расплавы, за счет которых сформировались интрузивные тела формации, испытывали существенное влияние процессов гибрида.

Формирование палеогеновой вулкано-плутонической формации габбро-сиенитов-трахибазальтов, по мнению Г.Б. Флерова и А.В. Колоскова, приурочено к этапу инверсии в развитии геосинклинали Центральной Камчатки. Причем магматические проявления интрузивного и вулканического типа при становлении формации четко контролируются зоной глубинного структурного шва субмеридионального направления. Все магматические проявления обусловлены процессом многостадийной дифференциации базальтовой магмы повышенной щелочности. Характер эволюции расплавов в процессе дифференциации — гомодромный.

Интрузивные образования формации габбро-гранодиоритов миоценового возраста О.Н. Вольнец, А.В. Колосков, Г.Б. Флеров и Н.Л. Шилин относят к посторогенному типу. Основанием для этого служит характер массивов: дискордантные тела трещинного типа или межформационные плутоны, приуроченные к зонам разломов глубокого заложения. Массивы, как правило, характеризуются зо-



нальным строением и глубиной формирования не более 1500 м. Наиболее распространенными разновидностями являются кварцевый диорит и гранодиорит. Отмечается в целом слабое влияние гибридизма и сопоставимый характер эволюции магмы при становлении массивов.

В интрузивную фацию вулканоплутонической формации гранодиорит-порфиров-дацитов плиоценового возраста О.Н. Вольнец, Г.Б. Флеров, Д.И. Фрих-Хар и Н.Л. Шилин объединяют субвулканические тела гранодиорит-порфиров. По мнению этих авторов, дифференциация расплавов в процессе формирования интрузивных тел формации проявлена весьма слабо. Становление массивов осуществлялось в приповерхностных условиях. Зональное строение массивов отсутствует. В период формирования магматических образований формации преимущественную роль играли вулканические процессы.

Как следует из приведенной выше характеристики магматических формаций, они не только различаются временем проявления магматических процессов, но и принадлежат разным этапам тектономагматического развития Центрально-Камчатской геосинклинали. В связи с этим была поставлена задача о возможной принадлежности интрузивных формаций Камчатки одному формационному типу. При этом, естественно, возникло предположение о правильности столь дробного формационного деления интрузивных образований Камчатки.

Задаче о принадлежности магматических объектов одной конкретной формации соответствуют методы решения задач первого типа [нулевая гипотеза (4)], а задаче о принадлежности конкретных формаций одному формационному типу — методы решения задач второго типа [нулевая гипотеза (6)]. Петрохимический материал о составах разновидностей пород указанных выше формаций заимствован из опубликованных данных Института вулканологии СО АН СССР. Проверка гипотез (4) и (6), соответствующих интересующим нас задачам, осуществлялась с помощью критерия, определяемого выражением (18), при разном выражении  $z_j$ .

Результаты вычислений по проверке обеих нулевых гипотез приведены в табл. 17. Из этой таблицы и рис. 13 следует, что петрохимические свойства одинаковых по содержанию  $\text{SiO}_2$  разновидностей пород рассматриваемых формаций существенно различаются при 5 %-ном уровне значимости. Но при этом характер эволюции пород трех формаций (габбро-плаггиогранитов, габбро-гранодиоритов и гранодиорит-порфиров-дацитов) следует признать близким и отличающимся от характера эволюции пород формации габбро-сиенитов-трахибазальтов.

В результате проведенных сопоставлений выявлено, что интрузивные формации Камчатки различаются по вещественным, в частности, петрохимическим свойствам одинаковых разновидностей пород. Отсюда следует, что по этому признаку выделение конкретных формаций можно считать оправданным. При этом в процедуре были

Результаты сравнения петрохимических особенностей  
и характера эволюции пород интрузивных формаций Камчатки

Формации	Габбро-гранодиоритов	Габбро-плагиогранитов	Гранодиорит-порфиров	Габбро-сиенитов
	Петрохимия			
Габбро-гранодиоритов		37,04	62,37	124,58
Габбро-плагиогранитов	13,48		48,68	137,19
Гранодиорит-порфиров	33,40	26,56		137,05
Габбро-сиенитов	43,23	51,41	63,43	
Эволюция				

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 24 \text{ ст. св}} = 36,4$ .

выявлены отличия пород формаций не только по комплексу петрохимических особенностей, но и по содержаниям каждого из петрогенных окислов отдельно. Эта информация дает возможность установить индивидуальные особенности пород рассматриваемых формаций и выделить вещественные свойства, наиболее существенно различающие породы разных формаций. В качестве примера можно привести некоторые из этих свойств. Так, породы формации габбро-плагиогранитов отличаются от одинаковых по кремнекислотности разновидностей пород формации габбро-гранодиоритов только повышенными содержаниями  $\text{Na}_2\text{O}$ , а формации гранодиорит-порфиров-

Рис. 13. Дендрограммы меры сходства-различия петрохимических особенностей одинаковых разновидностей пород (а) и характера эволюции содержания окислов (б) в магматических сериях интрузивных формаций Камчатки.

Формации: гб-грд — габбро-гранодиоритовая; гб-пле — габбро-плагиогранитная; грдп — гранодиорит-порфировдацитов; гб-с — габбро-сиенитовая

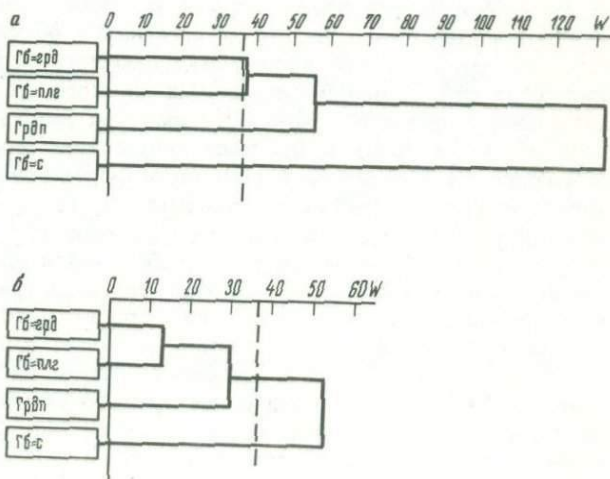




Таблица 18

Результаты сравнения интрузивных формаций Камчатки и Нижнего Приамурья

Формации	Габбро-гранодиоритов	Габбро-плагиогранитов	Гранодиорит-порфиров	Габбро-сиенитов	Верхне-удоминская	Мяо-чанская
	Петрохимия					
Габбро-гранодиоритов		37,03	62,37	114,56	80,11	252,16
Габбро-плагиогранитов	13,45		48,22	137,19	81,82	302,26
Гранодиорит-порфиров	33,38	27,55		127,04	115,39	89,66
Габбро-сиенитов	43,21	51,39	63,53		123,95	439,21
Верхне-удоминская	25,61	29,06	23,54	92,73		453,43
Мяо-чанская	308,88	52,21	37,56	327,18	170,73	
Эволюция						

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 24 \text{ ст. св}} = 36,4$ .

дацитов — более высокими содержаниями суммарного железа и  $\text{Na}_2\text{O}$ . Породы формации габбро-сиенитов-трахибазальтов характеризуются повышенными содержаниями  $\text{K}_2\text{O}$  и пониженными  $\text{Na}_2\text{O}$  по сравнению с одинаковыми разновидностями пород остальных формаций.

Выявленные различия петрохимических свойств одинаковых разновидностей пород вполне естественны и обусловлены комплексом возрастных и структурно-тектонических условий проявления процессов формирования изучаемых конкретных формаций. Более интересны результаты сравнения характера эволюции пород. Сходство эволюции пород в процессе становления формаций, несмотря на различия в возрасте и глубинности формирования в формациях нормального ряда (габбро-плагиогранитов, габбро-гранодиоритов и гранодиорит-порфиров-дацитов) при отличии их по этому признаку от формации субщелочного ряда (габбро-сиенитов-трахибазальтов), может служить основанием для отнесения этих трех формаций к одному формационному типу. Однако при этом естественно предположить, что предлагаемая методика различает только объекты нормального, субщелочного и щелочного типов дифференциации без подразделения их на классы более низкого уровня (формационные типы). Для проверки этого предположения был привлечен дополнительный материал — петрохимические данные по двум интрузивным сериям Нижнего Приамурья: мяо-чанской и верхне-удоминской.

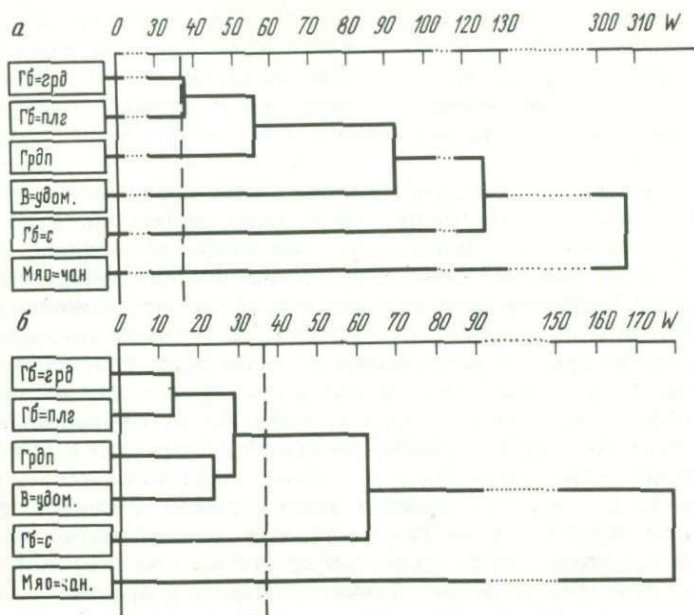


Рис. 14. Дендрограммы меры сходства-различия петрохимических особенностей одинаковых разновидностей пород (а) и характера эволюции содержаний петрогенных окислов (б) в магматических сериях интрузивных формаций Камчатки и Нижнего Приамурья.

Формации: в-удом. — верхне-удоминская; Мяо-чан. — мяо-чанская. Остальные обозначения см. рис. 13

Эти серии относятся к одному (позднему) периоду развития геосинклиальной системы: сенон-датскому (мяо-чанская) и раннепалеогеновому (верхне-удоминская). Результаты сравнения шести формаций приведены в табл. 18 и на рис. 14. Анализ таблицы и дендрограмм свидетельствует о весьма существенных различиях в всех формаций по петрохимическим свойствам одинаковых разновидностей пород. В то же время по характеру эволюции пород шесть рассматриваемых формаций группируются в три класса. Один класс формаций объединяет три формации Камчатки (габбро-плагиигранитов, габбро-гранодиоритов, гранодиорит-порфиров-дацитов) и верхне-удоминскую серию Нижнего Приамурья. Существенно отличаются по характеру эволюции пород субщелочная формация Камчатки (габбро-сиенитов-трахибазальтов — второй класс) и мяо-чанская серия (третий класс) Нижнего Приамурья. Несмотря на то что мяо-чанская серия относится к магматическим сериям нормального ряда дифференциации, она весьма сильно отличается по этому свойству как от формаций нормального ряда, так и от субщелочной формации.

Применимость и эффективность предложенной методики при определении принадлежности конкретных формаций одному формационному типу основаны на следующих положениях. В первую оче-



редь, на определении формационного типа, предложенном Э.П. Изохом: "магматическая формация как абстрактная категория (формационный тип, по Ю.А. Кузнецову) представляет собой группу комплексов, объединенных общностью определенных признаков, выбранных исследователем, исходя из стоящих перед ним целей и задач" [14].

В соответствии с приведенным определением признаком принадлежности формационному типу предлагается считать общность характера эволюции пород в процессе становления комплексов. Причем это предложение основано на представлении о характере эволюции пород в процессе магматизма как о наиболее устойчивой характеристике, отображающей тип комплекса условий проявления магматических процессов. Естественна и очевидна необходимость абстрагирования от возрастных и региональных особенностей пород объектов, соответствующая специфика задач подобного уровня.

Методика типизации процессов петрогенезиса применялась также для решения задачи более высокого уровня — определения принадлежности вулканических формаций разных регионов одному формационному типу. Ниже рассмотрен вариант решения задачи на примере сопоставления однотипных (по предположению) вулканических формаций трех регионов: Камчатки, Карпат и Армении. Сопоставлялись по две формации каждого региона близкого петрографического состава, характеризующие два последних по времени развития вулканических поясов периода вулканической активности. Совокупности, сформированные по литературным данным, имеют следующий объем: 1) Камчатка-I — древнечетвертичная базальтовая формация БФQ,  $N = 41$ ; 2) Камчатка-II — ареальные базальты  $Q_4$ ,  $N = 43$ ; 3) Армения-I — мио-плиоценовый вулканогенный комплекс (Цахкуняцкий хр., г. Араилер, Приереванский р-н),  $N = 50$ ; 4) Армения-II — верхнеплиоцен-плейстоценовый комплекс (г. Арагац, Гегамское нагорье, Айоцдзор-Варденис, Сеоникский хр.),  $N = 100$ ; 5) Карпаты-I — средне-плиоценовый комплекс (гутинский вулканогенный комплекс Выгорлат-Гутинской гряды),  $N = 123$ ; 6) Карпаты-II — верхнеплиоцен-нижнечетвертичный комплекс (Бужерский вулканогенный комплекс Выгорлат-Гутинской гряды),  $N = 49$ . Общий интервал кремнекислотности для всех формаций составил 18% (50—68%  $SiO_2$ ).

Указанные совокупности и петрохимическая информация послужили основой для определения возможности объединения перечисленных выше формаций трех удаленных друг от друга регионов в один формационный тип посторогенных базальтов. Решение задачи осуществлялось выявлением особенностей процессов формирования вулканогенных формаций разных регионов и возможности их отнесения к одному формационному типу. Участвующие в процедуре формации сравнивались как в отношении петрохимических особенностей пород одинаковой кремнекислотности (задачи первого типа), так и относительно характера эволюции составов пород в магматических сериях (задачи второго типа). В рассматриваемом случае приме-

нялись критерии, предполагающие равенство и однородность условной дисперсии, т.е. построенные на использовании обобщенных оценок условной дисперсии, и дискретизацию множества значений аргумента. Результаты проведенных сопоставлений с применением соответствующих условиям критериев [использовался критерий (18) для проверки нулевых гипотез (4) и (6)] приведены в табл. 19, а обобщающие их дендрограммы на рис. 15.

В результате сравнения петрохимических особенностей одинаковых разновидностей пород посторогенных базальтовых формаций разных регионов установлено, что по указанному свойству только формации Камчатки (плато-базальты и ареальные базальты) неразличимы между собой. В то же время породы этих двух формаций отличаются от всех остальных участвующих в процедуре объектов. Существенно различны по петрохимическим свойствам одинаковых разновидностей пород и все (четыре) формации Армении и Карпат. Этот результат вполне естествен, так как петрохимические составы одинаковых пород разных регионов, как правило, обладают ярко выраженными региональными петрохимическими особенностями. Более интересен вывод о различиях в петрохимических свойствах посторогенных базальтовых формаций одного региона, но разного времени проявления вулканизма, которые зафиксированы как для Армении, так и для Карпат (см. табл. 19).

В соответствии с рассмотренными выше принципами определения принадлежности конкретных формаций к одному формационному типу в данном случае нас больше интересуют результаты сравнения характера эволюции составов пород в ассоциациях изучаемых объектов. Из дендрограммы, приведенной на рис. 15, б, отчетливо видно, что все формации трех регионов по характеру эволюции содержащих петрогенных окислов в процессе петрогенезиса не различаются при уровне значимости 0,01. При уровне значимости 0,05, типовом для всех предшествующих примеров, фиксируется небольшое отличие по рассматриваемому признаку лишь формации Армении-I. Известно, что мощность применяемых критериев несколько завышена, как следствие излишне строгого требования нулевых различий признаков сравниваемых объектов на всем интервале оценки аргумента. Данный вопрос здесь не рассматривается, так как он подробно рассмотрен в работе [10]. С учетом указанного свойства критерия можно считать, что все шесть формаций трех регионов по результатам проведенной классификации правомерно объединить в один формационный тип посторогенных базальтов. Указанный результат служит основой для предположения, что по характеру динамики признаков при формировании базальтовых комплексов (плато-базальтов и более поздних по времени ареальных базальтов) процессы петрогенезиса следует признать однотипными. Естественно, что этот вывод относится только к изученным регионам. В то же петрохимические особенности одинаковых разновидностей пород указанных базальтовых комплексов существенно различны (кроме пары формаций Камчатки). Именно это и обусловило необходимость абстрагирова-



Результаты сравнения базальтовых формаций разных регионов  
(интервал 50–68 % SiO<sub>2</sub>)

Формации	Арме- ния-I	Карпа- ты-I	Камчат- ка-I	Арме- ния-II	Карпа- ты-II	Камчат- ка-II
	Петрохимия					
Армения-I		220,76	78,99	77,04	95,60	89,12
Карпаты-I	64,27		159,10	356,12	192,09	143,19
Камчатка-I	39,06	51,25		76,87	59,10	35,76
Армения-II	68,94	43,25	49,39		90,90	77,07
Карпаты-II	42,75	44,61	37,45	54,84		49,98
Камчатка-II	53,06	35,01	29,44	43,65	28,90	
Эволюция						

Примечание. Допустимые значения:  $\chi^2_{0,05; 36 \text{ ст. св.}} = 51$ ;  $\chi^2_{0,01; 36 \text{ ст. св.}} = 58,62$ .

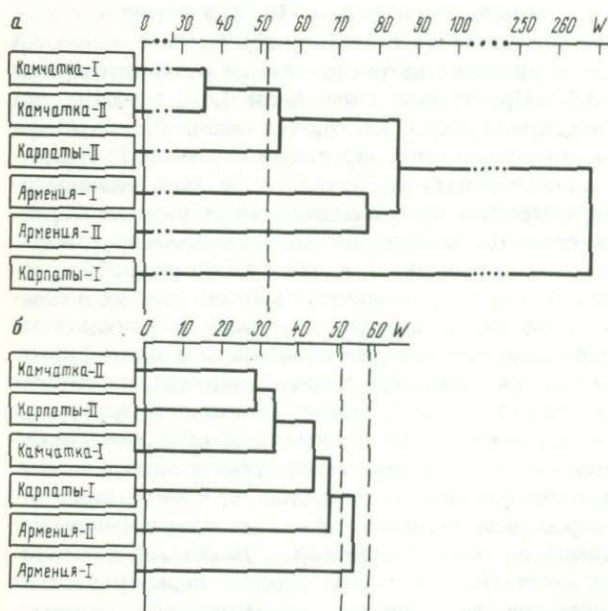


Рис. 15. Дендрограммы меры сходства-различия петрохимических особенностей одинаковых разновидностей пород (а) и характера эволюции содержаний петрогенных окислов (б) в магматических сериях базальтовых формаций Камчатки, Армении и Карпат (интервал 50–68 % SiO<sub>2</sub>)

ния при решении задачи объединения формаций в формационный тип как от возрастных, так и от региональных особенностей пород парагенетических ассоциаций изучаемых комплексов.

В заключение следует отметить, что применение предлагаемых математических методов при решении рассмотренных задач определения объема формационных типов позволило определить устойчивость характера эволюции пород при образовании магматических формаций одного типа вне зависимости от их возрастного или территориального положения. Кроме того, установлена возможность выявления различий в особенностях эволюции пород формаций как территориально сближенных, так и принадлежащих одному типу дифференциации. Отсюда очевидна возможность и эффективность применения математического аппарата для объединения магматических формаций по сходству характера эволюции пород в классы общности. Эти классы объединяют формации определенных и типовых тектоно-магматических условий формирования, что соответствует понятию формационного типа по Ю.А. Кузнецову и Э.П. Изоху.

В результате рассмотрения приведенных выше примеров могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Эффективность применения методики сравнения и классификации, основанной на определении меры сходства-различия функционального изменения признаков в процессе петрогенезиса, следует из возможности количественного решения типовых задач формационного анализа магматических объектов на базе петрохимических моделей процесса их формирования. Анализ информации о петрохимических свойствах парагенетических ассоциаций пород кайнозойских вулканических формаций Центрально-Камчатского вулканического пояса позволил выявить признаки, закономерное изменение которых в наибольшей степени различает процессы их формирования. Установленный набор различающих признаков дал возможность построить правило классификации для осуществления количественной процедуры формационной диагностики вулканических образований изученного региона. Определение формационной принадлежности помимо правильного отнесения объектов экзамена позволило выявить устойчивость формационных признаков в пределах всего Центрально-Камчатского вулканического пояса.

2. Анализа петрохимических моделей процессов формирования вулканических комплексов в формационных целях с применением рассматриваемой методики позволил выявить ряд петрологических факторов, определяющих особенности процессов петрогенезиса при проявлении вулканической деятельности в кайнозойский этап геологического развития региона. Одним из петрологически важных результатов является установленное сходство петрохимических составов базальтов, — наиболее основных разновидностей изученных ассоциаций пород. Отсюда вполне обоснованным представляется предположение о сходстве условий магмагенерации и состава магмы, которая послужила источником материала для проявления вулканических процессов при становлении всех пяти разновозрастных форма-



ций. Не менее важный петрологический результат был получен при проверке соответствия петрохимических моделей процессов формирования реальных комплексов и двух теоретических моделей петрогенезиса (модели смешения и модели фракционной кристаллизации в варианте М.И. Розина и Д.И. Колесникова). Установленная близость посталеутских формаций и модели смешения свидетельствует о широком проявлении процессов подобного типа и подтверждает представления о формировании коры континентального типа в период алеутского тектогенеза. Модель смешения не может быть использована для описания процессов становления доалеутских формаций. Можно предполагать широкое проявление при их формировании процессов дифференциации. Установленная непригодность модели фракционной кристаллизации в варианте М.И. Розина и Д.И. Колесникова для описания характера перераспределения вещества при формировании рассматриваемых комплексов свидетельствует скорее о не вполне удачном подборе состава фракционируемого материала для данной модели, чем о принципиальной неприменимости модели фракционной кристаллизации.

3. Применение методики определения меры сходства-различия функционального изменения признаков в петрохимических моделях петрогенезиса способствует установлению комагматичности вулканических и интрузивных комплексов с целью установления объема вулcano-плутонических формаций. На примере выбора комагматичной пары для габбро-гранодиоритовой формации среди пяти вулканических комплексов демонстрируется применимость и эффективность предлагаемой методики.

4. Определение типичности условий проявления и характера процессов петрогенезиса при формировании интрузивных (или вулканических) формаций разного возраста и различной региональной принадлежности служит основанием для объединения их в формационный тип. Задача реализуется с помощью меры сходства-различия характера эволюции признаков в петрохимических моделях петрогенетических процессов при исключении влияния на результат возрастных и региональных особенностей состава пород. Анализ информации по четырем интрузивным формациям Камчатки и двум Нижнего Приамурья позволил установить, что они принадлежат трем различным формационным типам. При этом принадлежность к типу не зависит от их возраста и регионального положения. В результате аналогичных исследований шести формаций посторогенных базальтов трех удаленных регионов (Камчатка, Карпаты и Армения) была определена их принадлежность к одному формационному типу.

Таким образом, в результате проведенных исследований была показана применимость и эффективность методики сравнения и классификации петрохимических моделей петрогенезиса для решения широкого круга задач, составляющих основу формационного анализа магматических пород и объектов.

АНАЛИЗ ПЕТРОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ПРИ ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Принципиальная возможность применения рассмотренной выше методики анализа петрохимических данных к решению прогнозно-металлогенических задач базируется, в первую очередь, на представлении о единстве источника процессов петро- и рудогенеза. Методологическим и методическим основанием для реализации этой возможности является, во-первых, организация петрохимической информации в виде ретроспективных моделей процессов петрогенезиса (магматических серий) и, во-вторых, применение ориентированных на анализ функционального изменения признаков в моделях процессов критериев сравнения и правил классификации, обладающих высокими дискриминационными свойствами. Приведенные ниже примеры использования формальных методов анализа петрохимической информации для решения задач прогнозирования рудоносности определяют необходимость рассмотрения некоторых общих вопросов.

Неуклонно возрастающие потребности народного хозяйства в расширении минерально-сырьевой базы разнообразных полезных компонентов обуславливают необходимость совершенствования методов прогноза и поиска месторождений. Современный уровень развития науки и производства невозможно представить без научно обоснованных и количественно реализуемых методов обоснования прогнозных и металлогенических обобщений.

Существует значительная по объему литература, посвященная различным подходам и методам решения проблем прогнозирования с использованием математических методов и ЭВМ [25]. Р.М. Константинов и А.Д. Щеглов, Ю.В. Прохоров, Д.А. Родионов, Р.И. Коган и Ю.П. Белов рассматривают методологические аспекты применения математики при прогнозировании, формальную постановку основных типов прогнозных задач, анализ существующих алгоритмов и программ решения проблемы прогнозирования месторождений для наиболее распространенных в практике геологоразведочных работ ситуаций. С рассматриваемых позиций весьма интересна работа Р.М. Константинова [17], посвященная анализу возможности значительного числа вероятностно-статистических и логико-информационных методов решения прогнозных задач. Она представляет собой методическое пособие по практическому применению количественных методов при прогнозно-металлогенических исследованиях. В обобщающей монографии А.Н. Бугайца и Л.Н. Дуденко [12] достаточно полно рассмотрены методологические аспекты применения математического аппарата в прогнозно-металлогенических исследованиях. Обсуждение работ подобного типа следует начать именно с этой монографии, в которой кроме содержательного анализа широкого спектра применяемых математических методов содержится четкое определение методологических аспектов рассматриваемой



проблемы. Представляет интерес мнение А.Н. Бугайца и Л.Н. Дуденко о методологических особенностях применения математических методов в прогнозно-металлогенических исследованиях: "металлогенические закономерности по логической природе их обоснования следует разделить на индуктивные и дедуктивные. Этим определяются два главных направления в металлогенических исследованиях: математическое описание и математическое моделирование" [12]. Имеются в виду динамические модели процессов, построенные на априорных моделях, с одной стороны, и статистические характеристики свойств объектов — с другой. Необходимо уточнить, что принципиальным отличием второго направления является неизбежная "статичность" статистических характеристик. Подобное представление в определенной мере является ограничением возможных методологических аспектов применения математических методов в прогнозно-металлогенических исследованиях. Разработанная методика сравнения и классификации петрогенетических процессов в применении к задачам прогнозно-металлогенических исследований содержит признаки обоих направлений, но не может быть отнесена в целом ни к одному из них. Это утверждение основано на следующем. Методика использует имеющуюся информацию об особенностях вещественных признаков набора разновидностей пород, поэтому ее следует отнести к индуктивному направлению применения математических методов. Однако, строго говоря, определить методику сравнения процессов по их моделям с функциональным изменением признаков вдоль оси аргумента как чисто описательную (в статическом смысле "математического описания", по А.Н. Бугайцу и Л.Н. Дуденко [12]) нельзя.

В то же время моделирование процесса формирования изучаемого объекта и определение меры близости его по характеру динамического изменения признаков к классу процессов с известной металлогенической специализацией следует скорее отнести к дедуктивному направлению ("математическое моделирование", по А.Н. Бугайцу и Л.Н. Дуденко [12]). Таким образом, предлагаемая методика представляет собой новое направление в методологии применения математических методов в прогнозно-металлогенических исследованиях, синтезирующее индуктивное и дедуктивное направления.

Необходимо оговорить, что определяемые одинаковыми терминами задачи прогнозирования металлогенических исследований, рассмотренные в работе [12], безусловно различаются по содержательному смыслу. Хотя различия эти не затрагивают принципиальных методологических положений, рассмотренных выше, определение их смысла необходимо для понимания дальнейшего изложения. Если задачей всех методов, рассмотренных в работе [12], является установление признаков, тесно связанных с участками рудолокализации и собственно оценка перспективности или неперспективности участков исследуемой территории на данный тип полезного ископаемого, то, следовательно, объекты исследования — это участки территории со всем многообразием геологической ситуации, обусловленным

проявлением различных по характеру и времени реализации геологических процессов. Естественно, что при применении любого из рассмотренных в монографии [12] методов прогнозной оценки территорий основой для принятия решения является математическое описание объекта (участка), другими словами, чисто статическая и статистическая в широком смысле информация.

В предлагаемой здесь методике анализируется информация о геологических объектах, однородных относительно условий проявления и характера петрогенетических процессов. Естественно, что задача определения потенциальной рудоносности магматических объектов принадлежит иному, более низкому уровню обобщения, чем задачи прогнозирования рудоносности территорий. Однако существенный вклад петрогенетических процессов в общую оценку перспективности территорий, сопряженных с участками их проявления, обуславливает необходимость включения результатов оценки потенциальной рудоносности магматических объектов в набор информативных признаков при прогнозировании месторождений в изучаемом регионе.

Определение принадлежности рассматриваемой методики по характеру математического аппарата к известным типам решения прогнозных задач также сопряжено с существенными трудностями. С формальных позиций предлагаемую методику можно отнести к третьему типу прогнозных задач (предсказание случайных процессов), рассматриваемых Д.А. Родионовым, Р.И. Коганом и Ю.П. Беловым [29]. Из работ, посвященных решению прогнозных задач указанного типа, наиболее интересна монография Р. Раяцкаса и С. Жемайтайте, в которой рассматривается методика прогнозирования для стационарных случайных процессов с детерминированной компонентой. В методике, предлагаемой автором данной книги, применяется та же модель представления информации о петрогенетическом процессе при решении задач прогнозирования. Однако сходство методик ограничивается только употребляемыми математическими моделями. Прогнозирование ненаблюдаемых состояний процесса Р. Раяцкас и С. Жемайтайте предлагают осуществлять исследованием обеих составляющих случайного процесса: детерминированной и случайной. Детерминированная компонента случайного процесса может быть найдена одним из способов аппроксимации, а случайную составляющую предлагается анализировать на независимость и нормальность ординат. Все это, по мнению Р. Раяцкаса и С. Жемайтайте, позволяет повысить надежность прогнозирования параметров.

Принципиальное отличие методики анализа случайных процессов в прогнозно-металлогенетических целях, применяемой в настоящей работе, заключается в следующем. Предсказание характера ненаблюдаемых состояний процесса (специфических завершающих интрузий, пегматитов, поздне- и постмагматических рудообразующих проявлений) осуществляется анализом совокупности процессов, принадлежащих одному классу в данном случае по типу рудоносности. Целью анализа является определение интервала значений аргумента и набо-



ра признаков, функциональное изменение которых на данном интервале аргумента максимально близко (неразличимо) для всех процессов анализируемого класса. При наличии двух (и более) альтернативных классов может быть построено решающее правило для классификации неизвестного процесса к одному из классов с известной рудоносностью. В подобной ситуации задача прогноза в формальной постановке сопоставима с наиболее часто встречающимся в практике первым вариантом задач прогноза среди приведенных и сформулированных в формализованном виде в работе Ю.В. Прохорова и Д.А. Родионова [27] задач прогнозирования. Содержание задач, отнесенных к указанному варианту, состоит в определении принадлежности элементов некоторого множества  $C$  к одному из альтернативных классов (рудоносных  $A$  или безрудных объектов  $B$ ). В качестве наиболее распространенных методов реализации задач эти авторы указывают дискриминантные функции и эвристические методы распознавания. В приложении к предлагаемой методике задачи, отнесенные Ю.В. Прохоровым и Д.А. Родионовым [27] к наиболее распространенному первому варианту задач, можно представить в формализованном виде следующим образом.

Введем некоторые обозначения [27]:  $\{A(T)\}$  — множество  $m$ -мерных функций, описывающих процесс петрогенезиса определенной металлогенической направленности (например, редкометальной);  $\{B(T)\}$  — множество  $m$ -мерных функций, описывающих процесс петрогенезиса иной (нередкометальной) направленности или квалифицируемых как безрудные;  $\{A'(T_A)\}$  — подмножество выборочных функций из множества  $\{A(T)\}$ ;  $\{B'(T_B)\}$  — подмножество выборочных функций из множества  $\{B(T)\}$ ;  $\{C(T)\}$  — множество  $m$ -мерных функций, принадлежность которых множеству  $\{A(T)\}$  или  $\{B(T)\}$  необходимо определить. Предположим, что на линейно упорядоченном множестве  $T$  существует такой интервал  $t \in T$ , на котором выполняется соотношение:  $\{A''(t)\} \cap \{B''(t)\} = \emptyset, t \in T_A \cap T_B$ , причем  $T_A \cap T_B \neq \emptyset$ , а  $\{A''(t)\}$  и  $\{B''(t)\}$   $k$ -мерные функции ( $k \leq m$ ). Для каждого элемента  $C_i(T)$  из множества  $\{C(T)\}$  требуется принять одно из утверждений:  $C_i(T) \in \{A(T)\}$  или  $C_i(T) \in \{B(T)\}$ . Если обозначить  $X(t)$   $k$ -мерное расстояние, построенное на основании выборочных функций  $A''(t)$  и  $B''(t)$  в интервале  $t \in T$ , то решение этой задачи может быть осуществлено с помощью некоторой функции  $D(X(t), A''(t), B''(t))$ . Тогда решающее правило для классификации случайных функций  $C_i(T)$  можно представить в следующем виде: если  $D(X(T); A''(t), B''(t)) \leq D_0$ , то  $C_i(T) \in \{A(T)\}$ ; если  $D(X(T); A''(t), B''(t)) > D_0$ , то  $C_i(T) \in \{B(T)\}$ , где  $D_0$  — некоторое пороговое значение.

Необходимость разработки нестандартной с методологических и формальных позиций методике определена существом поставленной задачи, которую можно сформулировать следующим образом.

Целью исследований являлась разработка количественной методики определения принадлежности процесса формирования изучаемого объекта классу петрогенетических процессов с известной металлогенической направленностью для прогнозной оценки типа и интенсивности проявлений ассоциированного рудогенеза. По геологическому содержанию сформулированная цель близка цели, определенной в работе Э.П. Исоха [14]: выявление зависимостей между внутренними признаками, к которым относятся состав и структура гранитоидных формаций, и внешними, к которым отнесены различные признаки рудоносности этих формаций. Существенно различны пути достижения цели: визуальный анализ статистико-петрохимических диаграмм — моделей процесса петрогенезиса для конкретных объектов — в работе Э.П. Исоха и типизация петрохимических процессов с помощью количественной меры близости в предлагаемой методике.

Рассмотрим некоторые особенности применения методики типизации петрогенетических процессов в прогнозно-металлогенических целях, обусловленные спецификой как сформулированной цели исследований, так и путей ее достижения. С методологических позиций приведенная выше формулировка цели исследований соответствует содержанию задач, относящихся к предсказанию случайных процессов. Однако некоторые свойства петрогенетических процессов и информации о них ограничивают возможности использования аппарата анализа случайных процессов для прогнозных целей.

Необходимо отметить, что в условиях применения в прогнозных исследованиях (в приложении к петрогенетическим процессам) методов предсказания случайных процессов исключительно большое значение приобретает допустимость предположения об эргодичности анализируемых случайных процессов. В приложении к анализу петрогенетических процессов это предположение обуславливает необходимость точного соответствия рассматриваемой модели процесса формирования объекта с известным типом рудоносности процессу формирования любого объекта, принадлежащего по характеру рудоносности к данному классу объектов. С учетом характерных для петрогенетических процессов индивидуальных особенностей, определяемых комплексом возрастных и латеральных условий их проявления, это требование следует признать излишне жестким. В подобной ситуации более перспективны и продуктивны анализ набора моделей процессов формирования объектов одного класса по типу рудоносности и выявления наиболее устойчивых, типичных для них свойств петрогенетических процессов при исключении влияния индивидуальных возрастных и латеральных особенностей их проявления. Это основная причина замены классического аппарата анализа случайных процессов процедурой типизации процессов петрогенезиса для прогнозирования типа и интенсивности потенциальной рудоносности магматических объектов.

В то же время для классификации изучаемого объекта к классу



объектов, процессы формирования которых имеют определенную металлогеническую направленность, в данной работе применяется процедура принятия решений, близкая по формальному содержанию известным процедурам принятия решений (статистическим, эвристическим, логико-информационным). Однако методическое содержание процедуры базируется на принципиально иной основе, что определяется следующими причинами. Из функционального изменения вещественных признаков в процессе петрогенезиса следует неэффективность представления информации о нем с применением процедур усреднения, неизбежных в известных методах принятия решений.

Принципиальные трудности использования статистических методов принятия решений для анализа петрохимической информации о магматических объектах обусловлены неслучайными и нелинейными взаимосвязями признаков, что приводит к неустойчивости определения величины ошибок классификации. Аналогичные трудности предполагаются и при применении эвристических методов принятия решений к анализу информации с функциональной и нелинейной взаимозависимостью признаков. Основанием этого предположения является отсутствие примеров использования методов распознавания образов для анализа объектов, модели которых характеризуются функциональными взаимоотношениями признаков. Естественно, что существует возможность повысить эффективность применения методов принятия решений к анализу петрохимической информации путем ликвидации так называемого петрохимического тренда — функциональной зависимости содержаний всех петрогенных окислов от содержаний кремнезема — с помощью дискретизации множества значений кремнезема на интервалы. Суть этого подхода к прогнозированию состоит в классификации неизвестного объекта к одному из заданных классов рудоносности на основе петрохимической информации, дискретизированной по кремнекислотности или по авторским названиям пород с помощью дискриминантных или потенциальных функций.

Выше были рассмотрены методы количественного прогнозирования и показано, что методологическая основа их применения для решения рассматриваемых задач отличается от предложенной в настоящей работе как содержанием задач прогнозирования, так и принципами построения процедуры. В связи с этим ниже приведен краткий анализ методологической базы известных из литературы методик количественного прогнозирования рудоносности, возможностей и принципов комплексирования их и методики типизации процессов петрогенезиса и рудообразования, а также представления о путях дальнейшего развития проблемы количественных методов прогнозной оценки рудоносности территорий.

Существующие методики количественного прогнозирования рудоносности предназначены для определения близости геологического строения изучаемого участка классу территорий, перспективных в отношении проявлений рудогенеза. Методологической основой всех методик является классификация участков по близости геологичес-

кой ситуации, т.е. ситуационная классификация. Причем представление геологического строения участков, альтернативных в отношении рудоносности, осуществляется с помощью количественной, полуквантитативной и качественной информации о наличии и свойствах пликвативных и дизъюнктивных тектонических структур, фацциально-литологическом содержании стратиграфических единиц, фацциальном и фазовом составе, петрохимических свойствах, геохимических особенностях, аксессуарной минералогии магматических тел (комплексов, формаций) и дайково-жильных систем, а также о других особенностях строения, включая результаты геофизических и космических исследований. Принцип формирования информационных массивов базируется на очевидном и справедливом положении, что наблюдаемая совокупность геологической структуры и свойств данного участка однозначно отображает сложную и часто многоэтапную историю геологического развития земной коры рассматриваемой территории. В подобной постановке задачи прогнозирования есть одно слабое с геологических позиций место, незнание которого в некоторых случаях может привести к существенному снижению эффективности применения математических методов классификации. Слабость эта порождена формулировкой задач, не учитывающей генетический аспект на всех уровнях решения проблемы при выборе и организации информационной базы, определении веса каждого из признаков, применении процедуры классификации и интерпретации результатов. Если учитывать прогнозирование только эндогенной рудоносности, то имеется в виду следующее. Включение в информационный массив такой генетически разнородной информации, как тектоническая (региональная — антиклинорий, локальная — трещины отслоения), петрологическая (магматическая формация и состав интрузивов, вулканитов, даек), литологическая (песчаники, молассы, сланцы и т.п.), геохимическая (содержание элементов в породах), а также возраст вмещающих пород, состав и тип руд — в бесструктурном виде с единой для всех признаков системой кодирования определяет снижение информативности (реальной, а не формальной) признаков, генетически связанных с проявлением рудообразующих процессов. Известно, что привлечение информации, непосредственный вклад которой в характеристику условий проявления рудогенеза убывает, причем по неизвестному закону и, возможно, практически до нуля, приводит к увеличению (часто не поддающемуся контролю) влияния шумовой составляющей и, как следствие, к возрастанию ошибки классификации.

Кроме того, не тривиальна проблема получения информации: поиск наилучшего размера и границ единичной площади, возможность единообразной интерпретации тектонических структур, степень обоснованности определения формационной принадлежности осадочных и магматических пород, возрастное положение изучаемых геологических объектов и информационная надежность многих других, не поддающихся измерению, признаков.

Методологические принципы, реализованные в работе [34], по



сути дела относятся к ситуационному прогнозированию. В то же время процесс получения, хранения и целевой подготовки информации к анализу доведены до очень высокого уровня технологичности. С содержательных позиций весьма существенно, что информационной базой анализа является геологическая карта, максимум информации которой трансформируется в формализованный вид. Именно банк картографической информации представляет собой существенное достижение этой разработки [34]. Предложенная система "Регион" реализует методологические принципы ситуационного прогнозирования практически на пределе их возможностей. Содержательный анализ информации базируется на известных процедурах эвристической классификации (распознавание образов), поэтому рассмотренные выше особенности подобных по методологическому подходу методик в полной мере присутствуют и в системе "Регион".

Учитывая специфику геологических знаний и важность проблемы, процедура количественного прогнозирования должна быть многоуровневой. Даже без детального обсуждения проблемы ясно, что таких уровней должно быть не менее двух. Первый уровень составляют сбор и организация первоначальной информации и ориентированная на выявление информативных признаков обработка данных. Необходимо учитывать, что информационная база на этом уровне должна быть подразделена на генетически однородные массивы информации. Вопрос о числе массивов информации и их содержании здесь не обсуждается, так как требует специальных исследований. Однако уже сейчас достаточно очевидно, что специфика тектонической, литологической, петрологической и геохимической информации требует выделения их в самостоятельные массивы. Подобная дифференциация обеспечит возможность построения наиболее мощных в условиях конкретного характера информации вычислительных процедур для качественной, полуколичественной (тектоническая, литологическая) и количественной (петро- и геохимическая) информации.

Результаты прогнозной оценки типа и интенсивности проявлений рудогенеза свидетельствуют не только об адекватности формальных процедур геологическому содержанию проблемы, но и о более высокой дискриминирующей способности процедур, построенных на генетически однородной информации. В связи с этим методологически более продуктивным представляется раздельный анализ информации по различным направлениям геологического исследования регионов. Основой данного утверждения является, с одной стороны, положительный результат анализа петрологической информации, а, с другой, принципиальная возможность построения аналогичных по методологическим принципам процедур для других типов информации и объектов геологии. По крайней мере, пути подобного решения задач, по-видимому, следует искать в области тектонических построений, геохимической информации как региональной, так и поисковой, пространственной связи рудопроявлений и геологических объектов (интрузий, нарушений). Таким образом, рассматриваемый путь

решения проблемы представляется вполне обоснованным существующими достижениями геологической науки.

Второй уровень процедуры количественного прогнозирования должны составлять методы (методики) комплексирования результатов анализа различных генетических однородных информационных массивов в обобщенной процедуре принятия решения. Естественно, что для подобной цели возможно успешное применение хорошо апробированных методов принятия решений [12]. Единственное условие, выполнение которого, однако, нетривиально, состоит в требовании определения веса для каждого из входящих в процедуру обобщенных признаков, полученных в результате анализа информационных массивов на первом уровне исследований. Данное требование является следствием зависимости значимости признаков от типа прогнозируемых месторождений, профилирующего рудного компонента, специфики структурно-геологической позиции региона и т.п.

Методологическое обеспечение и построение единой комплексной процедуры количественного прогнозирования требует значительных затрат труда специалистов высокого класса, однако имеет высокую научную и практическую значимость, особенно в условиях современного уровня развития производительных сил.

Таким образом, эффективность применения методики типизации петрогенетических процессов для определения потенциальной рудоносности магматических объектов определяется учетом в математическом аппарате характера функционального изменения признаков в процессе; возможностью выбора наиболее устойчивых, типичных для процессов петрогенезиса определенной металлогенетической направленности особенностей поведения петрогенных окислов; устойчивостью решения проблемы, основанной на исключении влияния на результат локальных (возрастных и латеральных) условий проявления процессов; надежностью процедуры классификации с помощью решающего правила, построенного на основе типичных особенностей динамического изменения признаков в процессе формирования магматических объектов с потенциальной рудоносностью определенного типа.

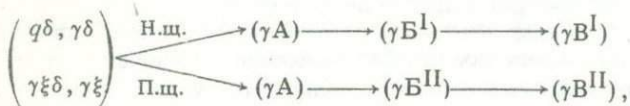
Применение методики типизации условий петрогенезиса и рудообразования для количественного прогнозирования типа и интенсивности проявления процессов рудогенеза рассматривается на примере рудообразования, ассоциированного с формированием гранитоидных серий. Применение методики сравнения и классификации ретроспективных петрохимических моделей процессов петрогенезиса для прогнозирования типа потенциальной рудоносности, ассоциированной с формированием магматических объектов, обсуждается на примере гранитоидных серий Казахстана и Средней Азии. Анализ особенностей процессов формирования гранитоидных серий этих регионов, определяющих характерную для них металлогенетическую специализацию, осуществлялся с позиций, достаточно близких представ-



лениям С.М. Бескина, В.Н. Ларина и Ю.Б. Марина [7, 8] на процесс батолитического гранитообразования и его металлогению.

Петрологические и металлогенические принципы, положенные в основу проведенных исследований, сводятся к следующему. Интрузивный ряд определяется как совокупность интрузивов от массивов базит-гипербазитового состава до батолитических гранитов (цикл). Причем в интрузивном ряду можно наметить ритм второго порядка по появлению некоторого количества гранитов (но не батолитов) внутри ряда. В связи с этим интрузивный ряд целесообразно подразделить как минимум на две интрузивные серии: 1) от базальтов-гипербазитов через диориты и сиениты к гранодиоритам-плагиогранитам-гранитам; 2) от кварцевых диоритов-гранодиоритов (граносиенитов) к гранитам и аляскитам. Именно интрузивы второй серии и образуют в совокупности гранитоидные батолиты. Термин "интрузивные серии" в дальнейшем относится исключительно к интрузивным сериям второго ритма.

Известно, что для многих фанерозойских плутонов СССР интрузивные серии второго периода в предельном виде представлены следующей схемой последовательности интрузивных комплексов (формаций):



где  $q\delta$  — кварцевые диориты;  $\gamma\delta$  — гранодиориты;  $\gamma\xi\delta$  — граносиенит-диориты;  $\gamma\xi$  — граносиениты; Н.щ., П.щ. — варианты нормальной и повышенной щелочности соответственно;  $\gamma A$  — разнообразные по составу граниты ранних комплексов, большей частью нормальные биотитовые граниты;  $\gamma B^I$  и  $\gamma B^{II}$  — соответственно лейкократовые и аляскитовые граниты поздних комплексов, образующие интрузивы центрального типа;  $\gamma V^I$  и  $\gamma V^{II}$  — соответственно субщелочные лейкограниты и щелочные граниты завершающих комплексов, образующие малые интрузии [8]. Из приведенного перечисления ясно, что процессы формирования их могут приводить в конкретных ситуациях к различным вариантам гранитоидных интрузивных серий батолитического типа. В настоящее время достаточно хорошо известна специфика рудоносности различных вариантов развития интрузивных серий рассматриваемого типа.

Среди них в первую очередь следует выделить два класса процессов формирования интрузивных серий: 1) "геологически завершенные"\* интрузивные серии, процессы формирования которых приводят к появлению гранитов  $\gamma V$ ; 2) "незавершенные" гранитоидные серии, процесс развития которых заканчивается гранитами

\* Далее определение "геологически" не употребляется, но предполагается везде. В понимании Э.П. Исоха [14] все рассматриваемые серии являются "петрохимически завершенными".

γВ. Различение этих типов необходимо в первую очередь с петрологических позиций, поскольку граниты γВ, как правило, образуют малые интрузии и дайки, обнаружение которых в процессе картирования плутона не гарантировано. Более существенно, что процессы формирования завершенных и незавершенных интрузивных серий приводят к образованию интрузивных систем с существенно различной металлогенической специализацией. В частности, известно, что граниты γВ комплексно редкометаллоносные.

В связи с этим первая задача, для решения которой в данной конкретном случае предлагается применение рассмотренных выше математических методов, заключается в следующем: выявить особенности процессов магматизма, определяющие формирование завершенных или незавершенных гранитоидных серий и отображенные в свойствах парагенетических ассоциаций пород объектов. Практическим следствием решения задачи является возможность определения принадлежности изучаемой гранитоидной серии к типу завершенных или незавершенных при необнаруженных гранитах γВ. Результаты классификации служат основанием для вывода о потенциальной редкометаллоносности исследуемого объекта.

Процессы формирования завершенных и незавершенных гранитоидных серий известны по меньшей мере в двух существенно различающихся вариантах каждый, поэтому установлением принадлежности изучаемой гранитоидной серии к типу завершенных или незавершенных круг металлогенических задач не ограничивается. В каждом из рассмотренных типов гранитоидных серий можно выделить по два подтипа, существенно различающихся как петрологически, так и металлогенически. Среди магматических процессов, обуславливающих формирование гранитоидных серий незавершенного типа, можно выделить два подтипа процессов с различным характером поздних и послемагматических производных и металлогенической специализацией. Причем процесс образования гранитоидных серий с характерными свойствами гранитов подтипа γВ<sup>I</sup> приводит к формированию интрузивов, которые определяются как грейзеноносные [7]. Гранитоидные массивы данного подтипа сопровождаются кварцево-жильно-грейзеновыми рудопроявлениями и месторождениями W, Mo, (Sn), Bi и других металлов. Обычно интрузивные массивы рассматриваемого подтипа незавершенного типа бедны пегматитами.

Проявление процессов батолитического гранитообразования с несколько отличающимися условиями функционирования приводит к формированию гранитных массивов подтипа γВ<sup>II</sup>, которые, как правило, сопровождаются кварцево-жильно-грейзеновыми или альбито-грейзеновыми рудопроявлениями и месторождениями вольфрамит, касситерита и т.д. Аналогично массивам первого подтипа и в данном случае пегматиты имеют ограниченное распространение. В работе [7] к подтипу гранитов γВ<sup>II</sup> относятся и хрусталеpegматитоносные массивы, для которых характерны внутригранитные пегматиты, перспективные на горный хрусталь, крупнокристаллический флюорит и, редко, ограночный топаз.



Для батолитических серий незавершенного типа наиболее типичны проявления рудообразующих процессов вольфрамовой специализации. В связи с этим в металлогеническом отношении серии незавершенного типа далее определяются обобщающим термином "вольфрамовые".

Среди завершеного типа также различаются гранитоидные серии двух подтипов:  $\gamma B^I$  и  $\gamma B^{II}$ . Массивы, принадлежащие к подтипу  $\gamma B^I$ , в большинстве случаев представлены субщелочными плюмазитовыми, в том числе натриевыми и натриево-литиевыми гранитами и (или) пегматитами. Известно [7], что массивы гранитов подтипа  $\gamma B^I$  сопровождаются рудопроявлениями и месторождениями редкометального типа, среди которых преимущественным распространением пользуются проявления с танталовой спецификой, иногда с попутными редкими щелочами.

Для гранитоидных массивов, составляющих подтип  $\gamma B^{II}$ , характерно наличие щелочных агпаитовых натриевых разновидностей с рибекитом и эгирином. В металлогеническом отношении массивы щелочных завершающих гранитов и пегматитов достаточно полно охарактеризованы С.М. Бескиным, В.Н. Лариным и Ю.Б. Мариным [7]. Для гранитных массивов подтипа  $\gamma B^{II}$  типична сопровождающая их редкометальная минерализация, причем в спектре элементов редкометальной ассоциации чаще всего присутствует ниобий.

Приведенная характеристика металлогенической специализации подтипов гранитоидных серий разного типа определяет содержание второй задачи: выявление особенностей процесса формирования гранитоидных серий разных подтипов ( $\gamma B^I$  или  $\gamma B^{II}$  — для незавершенного и  $\gamma B^I$  или  $\gamma B^{II}$  — для завершеного типа). Основной целью выяснения специфики проявления процессов петрогенезиса следует считать определение возможности предсказания подтипа гранитов завершающей фазы для оценки характера потенциальной рудоносности изучаемого объекта. С позиций непрерывности процесса петрогенезиса, которая отображена в схеме развития рассматриваемых гранитоидных серий, принадлежность изучаемой серии к одному из подтипов, установленная на уровне гранитов  $\gamma B$  ( $\gamma B^I$  или  $\gamma B^{II}$ ), предопределяет соответствующий подтип завершающих гранитов  $\gamma B$  ( $\gamma B^I$  или  $\gamma B^{II}$ ), естественно, при отнесении этой серии к типу завершеного.

Следовательно, решение и второй задачи возможно на уровне главных интрузивных комплексов батолитических гранитоидных серий без привлечения информации о завершающих интрузивных субщелочных или щелочных гранитах  $\gamma B$ . Это тем более важно, так как предсказание подтипа гранитов  $\gamma B$  особенно существенно для определения специфики элементного состава редкометальной рудоносности. Как видно из приведенного выше элементного состава проявлений рудогенеза, ассоциированных с формированием гранитов  $B$ , гранитоидные серии, которые завершаются становлением гранитов  $\gamma B^I$ , имеют редкометальную, преимущественно танталовую специализацию. Процессы петрогенезиса, определяющие завершение

батолитических гранитоидных серий формированием гранитов  $\gamma B^{\Pi}$ , как правило, сопровождаются проявлением редкометального рудообразования с преимущественно ниобиевой специализацией.

Приведенное выше описание батолитических гранитоидных серий и их металлогенической специализации дается в проблемно-ориентированном виде. Реальная картина, без сомнения, имеет более сложный характер и может являться предметом специальной работы петрологического содержания. Однако представление задачи и геолого-петрологической обстановки даже в несколько упрощенном варианте свидетельствует о возможности решения количественными методами весьма важных задач прогнозно-металлогенической ориентации. Особенно важно, что информационной основой решения этих задач является анализ петрохимических данных. При рассмотрении приведенных ниже примеров следует учитывать, что для простоты из сложной реальной картины при выделении классов серий принимались во внимание лишь определяющие их различие черты ассоциированного рудообразования. В связи с этим тип оруденения определялся как редкометальный — для завершенных серий и как скарново-шеелитовый (вольфрамовый) — для незавершенных. При определении подтипа рудоносности основное внимание уделено гранитоидным сериям редкометального типа. В связи с этим основная иллюстративная нагрузка сконцентрирована на решении задачи прогнозирования подтипа рудоносности гранитоидных серий редкометального типа: преимущественно танталового и преимущественно ниобиевого.

Решение сформулированных задач осуществлялось с помощью математических методов на петрохимическом материале по шести гранитоидным сериям Казахстана и Средней Азии [24, 33]. Исследования проводились на петрохимическом материале следующих гранитоидных серий: 1) плутон Акжайляу, Казахстан, Тарбагатай, герцинская завершенная серия,  $N = 92$ ; 2) плутон Кандыгатай, Казахстан, герцинская завершенная серия,  $N = 44$ ; 3) Зерендинский плутон, Северный Казахстан, каледонская завершенная серия,  $N = 93$ ; 4) гранитоидные массивы Северного Прибалхашья, Казахстан, Успенская зона, герцинская незавершенная серия,  $N = 31$ ; 5) Каратюбинский ареал, Средняя Азия, герцинская незавершенная серия,  $N = 48$ ; 6) Зирабулакский ареал, Средняя Азия, герцинская завершенная серия,  $N = 54$ .

Общая процедура решения поставленных задач подразделяется на два этапа: 1) выявление признаков (особенностей процессов), в наибольшей мере различающих распознаваемые классы объектов; 2) построение решающего правила и классификация неизвестных гранитоидных серий. Причем, если методологическое содержание второго этапа отличается от общепринятых процедур лишь методами решения, то методологическая сущность первого этапа требует более детального рассмотрения.

В основу первого этапа была положена процедура классификации объектов (гранитоидных серий) по близости процессов их формирования в смысле задач первого и второго типа (см. гл. 3). Постав-



ленные задачи обусловили необходимость усложнения используемой процедуры (классификации) по сравнению с приведенной выше обобщенной схемой (см. гл. 5). Однако принципиальные различия в обеих схемах отсутствуют. Конкретные различия, преимущественно в деталях, рассмотрены ниже.

Попарные сопоставления шести перечисленных гранитоидных серий на основе выборочных совокупностей осуществлялись в аспекте двух типов задач сравнения процессов петрогенезиса. В приложении к рассматриваемой ситуации содержательный смысл этих задач можно сформулировать следующим образом.

На основе решения задач первого типа определяется сходство-различие процессов формирования изучаемых гранитоидных серий по близости вещественных (петрохимических) свойств всех одинаковых по кремнекислотности разновидностей пород. Второй тип задач соответствует сравнению процессов становления гранитоидных серий по характеру эволюции петрохимических составов последовательно формирующихся разновидностей пород в общем для всех объектов интервале содержаний кремнезема при исключении влияния на результат возрастных и латеральных петрохимических особенностей.

В соответствии с целью исследований и рассмотренной выше процедурой применения математических методов решения сформулированных задач на первом этапе анализа информации должен быть установлен комплекс признаков, функциональное поведение которых отражает особенности условий реализации процессов, обусловившие металлогеническую специализацию изучаемых гранитоидных серий. В то же время очевидно, что задачам металлогенических исследований в большей мере соответствует содержание задач второго типа. Включение в процедуру сравнения изучаемых объектов и определения меры сходства-различия петрохимических особенностей пород (задачи первого типа) обусловлено в первую очередь сложностью проблемы и необходимостью в связи с этим получения максимально возможного объема информации в результате разноаспектного сравнительного анализа условий проявления петрогенетических процессов.

Из формулировки задач очевидно, что в данном случае в качестве оценки оси времени при построении моделей процессов выбрана ось содержаний кремнезема. Кроме того, в соответствии с определением понятия гранитоидная серия, включающим набор разновидностей от кварцевого диорита-гранодиорита до аляскита, в рассматриваемом примере участвует петрохимическая информация о свойствах пород гранитоидных серий, относящихся к интервалу кремнекислотности на 62—77 %. В связи с тем что в процедуре классификации наиболее важную роль играет единство меры сходства-различия для всех участвующих в ней совокупностей, для выполнения этого требования введены следующие допущения. Сравнение процессов для подавления влияния шумовой компоненты необходимо осуществлять с помощью критериев с дискретизацией множества значе-

ний аргумента (разбиение оси содержаний  $\text{SiO}_2$  на интервалы). Причем число и величина интервалов должны быть едиными для всех шести изучаемых совокупностей. В данном случае число (пять) и величина интервалов дискретизации (3 %  $\text{SiO}_2$ ) определены из геологических соображений: в примерном соответствии с количеством естественных разновидностей пород гранитоидного ряда, принадлежащих изучаемому множеству значений содержания кремнезема (62–77 %  $\text{SiO}_2$ ).

Требование единства меры сходства-различия для всех попарных сопоставлений, с одной стороны, и всех разновидностей пород, с другой, обусловило необходимость предположения об однородности условной дисперсии не только для всех интервалов дискретизации, но и для всех совокупностей в том числе. Причем правомочность этого предположения может быть обоснована с точностью до случайных отклонений как для различных совокупностей, так и для всех интервалов кремнекислотности. Последнее предположение не вызывает сомнений для большинства петрогенных окислов, но в ряде случаев наблюдаются существенные расхождения в величине условной дисперсии для содержаний  $\text{MgO}$ , особенно они заметны при рассмотрении крайних интервалов кремнекислотности 62–65 и 74–77 %. Однако этими различиями пришлось пренебречь, тем более, что применение обобщенной условной дисперсии практически не искажает результаты сопоставлений.

Предположение о равенстве и однородности условной дисперсии предопределило и вид критерия, используемого для попарных сопоставлений: решение задач первого и второго типа осуществлялось с применением критерия (18) с учетом различий в способе определения  $z_{ji}$ . Кроме того, с целью исключения влияния несовпадения средних значений содержания  $\text{SiO}_2$  в интервалах при разных сопоставлениях значения  $z_{ji}$  снимались с графика в единых для всех серий точках значений содержаний кремнезема. Все это обеспечило единообразие меры сходства-различия и сопоставимость величины ее при сравнении всех изучаемых совокупностей между собой.

Еще одно необходимое для понимания приведенных ниже результатов пояснение. Общая процедура проведенных исследований (выявление комплекса информативных в нужном нам смысле признаков при анализе эталонных объектов, построение решающего правила и последующая классификация с его помощью неизвестных объектов) по своей сути близка широко известной методике распознавания образов. Однако помимо различий в методах решения проблемы описываемая методика отличается еще одним существенным свойством. При выборе информативных признаков, различающих два альтернативных класса объектов (завершенные и незавершенные гранитоидные серии), эмпирические данные не были объединены в две обобщенные выборки, а исследовались индивидуально в естественном объеме и виде. Причиной этого усложнения процедуры в первую очередь является сложность решаемой проблемы. Известно, что на результаты проявления петрогенетических процессов влияет много



причин, значительная часть которых имеет локальный характер (время проявления, связь с локальными тектоническими структурами, характер вмещающих пород и степень влияния их состава на состав пород гранитоидной серии) и второстепенное значение в исследуемой проблеме. Эти факты существенно затрудняют поиск признаков, определяющих металлогеническую направленность процессов формирования гранитоидных серий. В связи с этим объединение, например, завершенных серий в одну совокупность с усреднением признаков могло бы затруднить, если не исключить, возможность решения поставленной задачи. Таким образом, в рассматриваемом случае процедура обучения и поиска наиболее информативной комбинации признаков, различающей процессы формирования завершенных и незавершенных гранитоидных серий, осуществлялась попарным сравнением всех серий между собой с последующим выявлением признаков, поведение которых в процессе петрогенезиса не различается или различается слабо для объектов в пределах одного из альтернативных классов и значительно различается в объектах, принадлежащих к разным классам.

Приведенные результаты сравнения шести гранитоидных серий представлены как в виде таблиц (матриц) значений критерия, так и в виде дендрограмм. Последнее представление осуществлено с целью повышения наглядности результатов применения методов и требует пояснения. В связи с тем что среди многих сопоставлений лишь в единичных случаях можно говорить о близости совокупностей в смысле, определяемом задачами, то процедура классификации с последовательным объединением неразличающихся объектов (см. гл. 5) в подобной ситуации применена быть не может. Имеется в виду не формальная неприменимость, а неэффективность для цели исследования. Однако изученные объекты различаются в разной степени. Среди рассматриваемого набора всегда могут быть выделены группы объектов, характеризующихся небольшими различиями объединенных в них совокупностей, при существенно более значительных различиях между объектами разных групп. Задача определения степени различий между сопоставляемыми совокупностями очень близка по смыслу известной задаче и соответствующей ей процедуре, разработанной Д.А. Родионовым [28] для классификации границ по величине фиксируемых критерием  $V_k$  различий между разделяемыми совокупностями. К сожалению, эта весьма эффективная и формально обоснованная процедура не может быть непосредственно использована в нашем случае. В связи с этим при построении дендрограмм формально обосновано лишь подразделение множества значений критерия  $W$  на области с неотличимой от заданного уровня величиной параметра нецентральности.

В настоящей работе по аналогии с монографией [28] величина параметра нецентральности поставлена в соответствие степени различия сравниваемых совокупностей в том смысле, который определяется проверяемой нулевой гипотезой. Отсюда выявление степени различий сопоставляемого набора объектов между собой осуществлялось

проверкой гипотезы с равенстве параметров нецентральности соответствующих значений критерия  $W$ , который, как известно [9, 10], в условиях альтернативы имеет нецентральное  $\chi^2$ -распределение. Причем сравнение всех значений критерия  $W$  относительно равенства параметров нецентральности заменено процедурой подразделения всего множества значений  $W$  на области, в пределах которых параметры нецентральности критерия  $W$  не отличаются от параметра нецентральности минимального значений критерия из данной области. Естественно, что область принятия нулевой гипотезы является областью нулевых различий и нулевого значения параметра нецентральности  $a$ . Область значения критерия от  $W_0 \in \chi^2(0, m)$  до  $W_1 \in \chi^2(a_1, m)$  соответствует слабым различиям сравниваемых объектов в смысле нулевых гипотез (4) или (6). Значение  $W_1$ , или в общем случае  $W_{l+1}$ , определяется из выражения

$$t = \frac{(W_{l+1} - W_l)}{2 \sqrt{W_l + W_{l+1} - m}} \quad (24)$$

в ситуации, соответствующей альтернативе  $H_1: a_1 < a_{l+1}$  ( $l$  — номер пробы;  $m$  — число степеней свободы) [41]. Области значений критерия  $W$ : от  $W_1 \in \chi^2(a_1, m)$  до  $W_2 \in \chi^2(a_2, m)$ ,  $a_2 > a_1$ ; от  $W_2 \in \chi^2(a_2, m)$  до  $W_3 \in \chi^2(a_3, m)$ ,  $a_3 > a_2$ ; от  $W_3 \in \chi^2(a_3, m)$  до  $W_4 \in \chi^2(a_4, m)$ ,  $a_4 > a_3$  и т.д. объединяют значение критерия, соответствующего все более возрастающей степени различий изучаемых объектов. С учетом рассмотренной процедуры построение дендрограмм основано на следующих логических посылках. Если критерий сравнения процессов  $i$ -го и  $k$ -го объектов представляет собой значение случайной величины, распределенной как  $\chi^2(a_1, m)$ , а аналогичный критерий для  $k$ -го и  $h$ -го, а также для  $i$ -го и  $h$ -го объектов относятся к множеству значений случайной величины, распределенной как  $\chi^2(a_2, m)$ , причем  $a_1 < a_2$ , то  $i$ -й и  $k$ -й объекты признаются различающимися в меньшей степени, чем  $h$ -й от каждого из них. Подобные соотношения и определяют последовательность соединения объектов на дендрограммах. Линии, параллельные оси ординат рисунков, соответствуют уровню различий между объектами или их группами в определенном соответствующей нулевой гипотезе смысле. Приведенная процедура построения дендрограмм по смыслу не отличается от описанной в работе У. Крамбейна, М. Кауфмена, Р. Мак-Кеммона [20]. Наглядное представление результатов с помощью дендрограмм способствует их анализу и выбору признаков, наиболее четко различающих альтернативные в сформулированных задачах группы объектов.

Необходимо указать, что на всех рисунках, представляющих результаты попарных сопоставлений объектов в виде дендрограмм, пунктирные линии соответствуют границам между областями значений критерия, однородных по параметру нецентральности. Эти области отражают разную степень различия в значениях соответствующих



Сравнение условных средних для шести гранитоидных серий в интервале 62–77 % SiO<sub>2</sub>

Гранитоидные серии	Акжай-ляу	Зерен-да	Канды-гатай	Прибал-хашье	Зирабу-лак	Кара-тюбе
	Петрохимия					
Акжайляу		108,15	90,04	201,64	158,78	156,73
Зеренда	76,12		78,18	141,00	159,56	127,48
Кандыгатай	84,52	47,44		156,70	191,88	128,10
Прибалхашье	174,93	179,75	165,85		162,49	213,03
Зирабулак	36,64	45,67	46,65	118,77		22,18
Каратюбе	120,03	142,88	77,21	86,45	67,51	
Эволюция						

Примечание. Допустимые значения;  $\chi^2_{0,05; 30 \text{ ст. св}} = 43,80$ ;  $\chi^2_{0,01; 30 \text{ ст. св}} = 50,90$ ;  $\chi^2_{0,001; 30 \text{ ст. св}} = 59,50$ .

признаков для сравниваемых объектов. Например, крайняя левая пунктирная линия является границей между областями  $W_0$  (нулевых различий) и  $W_1$  (слабых различий), вторая слева — границей между  $W_1$  (слабых различий) и  $W_2$  (различий, более сильных, чем в области  $W_1$ ) и т.п.

Результаты попарных сопоставлений рассматриваемых шести интрузивных серий в отношении петрохимических особенностей последовательностей разновидностей пород, а также характера эволюции их свойств в процессе формирования сводится к следующему.

Матрица результатов сравнения шести гранитоидных серий приведена в табл. 20. Причем из 30 попарных сопоставлений всего в двух случаях значение критерия  $W$  менее допустимого значения  $\chi^2$  при уровне значимости 0,05. Особенно большие различия наблюдаются в петрохимических свойствах последовательностей разновидностей пород, сформированных в результате процессов образования рассматриваемых гранитоидных серий. Результаты попарных сопоставлений в виде таблицы воспринимаются плохо, особенно в свете интересующих нас задач. Более четко и наглядно картина соотношения петрохимических особенностей и характера эволюции разновидностей пород гранитоидных серий вырисовывается при рассмотрении дендрограмм, приведенных на рис. 16. На дендрограмме, иллюстрирующей соотношения петрохимических свойств последовательно формирующихся разновидностей пород (см. рис. 16а), видно, что

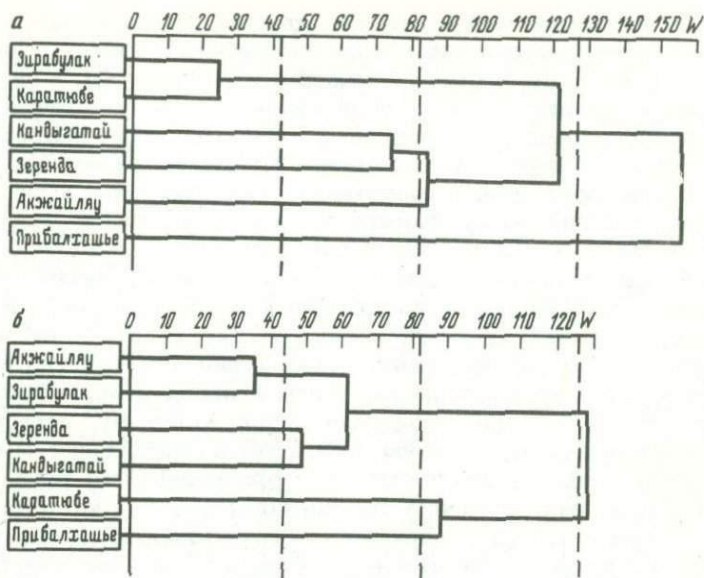


Рис. 16. Дендрограммы меры сходства-различия петрохимических особенностей одинаковых разновидностей пород магматических серий (а) и характера эволюции содержаний петрогенных окислов в них (б) для изучения объектов (батолитические гранитоидные серии Казахстана и Средней Азии) в интервале 62—77 % SiO<sub>2</sub>

статистически близкими в этом смысле можно считать лишь интрузивные серии Каратюбинского и Зирабулакского ареалов. Другой очевидный вывод — наиболее сильно по петрохимическим свойствам от всех остальных серий отличаются породы интрузивной серии Северного Прибалхашья. Различия петрохимических особенностей пород остальных серий (акжаульской, зерендинской и кандыгатайской) между собой, а также их и пары серий (Каратюбинский и Зирабулакский ареалы) существенны и сопоставимы по величине.

Результаты сравнения петрохимических свойств одинаковых разновидностей пород изучаемых гранитоидных серий фиксируют естественные и легко объяснимые различия. Дендрограмма на рис. 16, а отражает индивидуальные особенности условий проявления процессов при становлении гранитоидных серий, которые определяются временем проявления процессов гранитообразования (каледонская и герцинские серии) и спецификой региональных условий формирования батолитов (особенности строения коры, состав вмещающих пород, степень проявления гибридности и т.п.). Вполне понятное исключение составляет пара гранитоидных серий: Зирабулакский и Каратюбинский ареалы, для которых характерна одновозрастность и пространственная близость.

При характеристике гранитоидных серий, информация о которых



участвует в решении задач, указано, что четыре серии из шести принадлежат к типу завершенных и соответственно к классу редкометальных (Акжайляу, Зеренда, Зирабулак и Кандыгатай), а две — к типу незавершенных и к альтернативному по металлогенической специализации классу вольфрамовых серий (Каратюбе и Прибалхашье\*). Первой задачей осуществляемой процедуры является определение набора признаков, различающих указанные типы серий, для построения правила классификации при прогнозировании типа рудоносности любой изучаемой серии батолитических гранитов. С этих позиций весьма интересна дендрограмма, иллюстрирующая соотношение характера эволюции петрохимических составов пород в процессе формирования изучаемых серий (см. рис. 16, б). На ней четко фиксируются две группы гранитоидных серий, существенно различающиеся характером эволюции составов пород в магматических сериях. Одну из групп составляют серии Акжайляу, Зирабулак, Зеренда и Кандыгатай, а другую — Каратюбе и Прибалхашье. Именно эти группы серий соответствуют двум распознаваемым типам процессов петрогенезиса, условия проявления и характер которых приводят в одном случае к образованию гранитоидных завершенных серий, а в другом — незавершенных. Интересующим нас следствием этих типов процессов является формирование гранитоидных серий, принадлежащих двум альтернативным классам рудоносности: редкометальному или вольфрамовому.

Таким образом, на первом этапе проверки гипотез, соответствующих решению задач первого и второго типов, установлено, что по характеру эволюции составов последовательно формирующихся разновидностей пород гранитоидные серии, относящиеся к типу завершенных, существенно отличаются от подобных серий, принадлежащих типу незавершенных. В связи с тем что сравнение характера эволюции является многомерной процедурой, для построения эффективного решающего правила следует выбирать наиболее информативные признаки. В данной задаче информативными являются признаки, комбинация которых обеспечивает максимально надежное в условиях конкретных выборочных совокупностей различение указанных выше групп объектов. С целью выбора сочетания признаков для уверенного различения рассматриваемых типов процессов формирования гранитоидных серий были построены дендрограммы по результатам сравнения эволюции как для содержаний отдельных петрогенных окислов, так и для петрохимических составов пород в каждом из интервалов кремнекислотности. Другими словами, дендрограммы были построены для всех  $W_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, m$  ( $m$  — число петрохимических признаков, в нашем случае  $m = 6$ ) и для всех  $W_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, k$  ( $k$  — число интервалов дискретизации оси содержаний

---

\* Далее в тексте и на иллюстрациях названия всех гранитных серий даются упрощенно, например вместо "гранитоидные массивы Северного Прибалхашья" — "Прибалхашье".

кремнезема, в рассматриваемой задаче  $k = 5$ ). Таким образом, было проанализировано 11 таблиц, которые составляют по последнему столбцу и последней строке таблиц, аналогичных табл. 6, и соответствующих им дендрограмм, иллюстрирующих сходство-различие характера эволюции признаков в магматических сериях изученных объектов.

Основным принципом выбора признаков при визуальном анализе дендрограмм является фиксация явно выраженной группировки изучаемых гранитоидных серий в соответствии с их принадлежностью к альтернативным петрологическим типам (завершенным и незавершенным). Подобное расположение серий уже отмечалось на дендрограмме, представляющей результаты сопоставления характера эволюции содержаний всех петрогенных окислов на всем интервале 62—77 %  $\text{SiO}_2$  (см. рис. 16, б). Анализ указанных выше 11 дендрограмм в первую очередь позволил установить, что характер эволюции признаков в интервалах содержаний  $\text{SiO}_2$  62—65 и 65—68 % не отвечает группировке, интересующей нас в рассматриваемой задаче. В связи с этим отмеченные интервалы кремнекислотности были исключены из дальнейшей процедуры как неинформативные и снижающие контрастность различий между изучаемыми типами серий. Отсюда очевидно, что характер эволюции пород в интервале 68—77 %  $\text{SiO}_2$  должен более четко различать группы завершенных и незавершенных гранитоидных серий, чем этот же признак на всем множестве значений кремнекислотности (62—77 %  $\text{SiO}_2$ ). Справедливость этого предположения иллюстрируют табл. 21 и рис. 17, на котором приведена дендрограмма сравнения характера эволюции пород гранитоидных серий в интервале 68—77 %  $\text{SiO}_2$ . В то же время анализ результатов сопоставления характера эволюции содержаний петрогенных окислов в последовательно формирующихся разновидностях пород гранитоидных серий свидетельствует о слабой информативности в интересующем нас смысле эволюции содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . Следо-

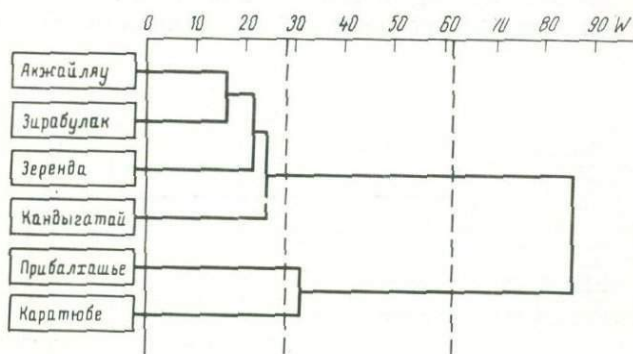


Рис. 17. Дендрограмма меры сходства-различия характера эволюции содержаний петрогенных окислов в магматических сериях изучаемых объектов в интервале 68—77 %  $\text{SiO}_2$



Результаты сравнения характера эволюции пород шести гранитоидных серий в интервале  $\text{SiO}_2$  68–77 %

Гранитоидные серии	Акжай-ляу	Зерен-да	Канды-гатай	Прибал-хашье	Зирабу-лак	Кара-тюбе
	Петрохимия					
Акжайляу						
Зеренда	23,20					
Кандыгатай	22,23	23,76				
Прибалхашье	142,41	79,19	111,30			
Зирабулак	16,50	19,57	24,51	95,03		
Картюбе	72,89	91,76	54,50	30,58	44,55	
Эволюция						

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{18 \text{ ст. св.}; 0,05} = 28,9$ :

вательно, максимальная информация, различающая процессы формирования завершенных и незавершенных гранитоидных серий, содержится в характере эволюции содержаний  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  в интервале 68–77 %  $\text{SiO}_2$  (рис. 18). Обобщенные графики изменения центрированных содержаний указанных окислов в двух типах серий приведены на рис. 19. Этап обучения для последующего распознавания гранитоидных серий относительно характера эволюции вещества в процессе их формирования (завершенный или незавершенный) заканчивается построением решающего правила. В данном слу-

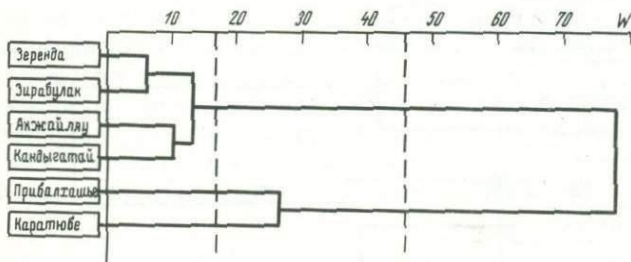


Рис. 18. Дендрограмма меры сходства-различия характера эволюции содержаний  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$  в магматических сериях в интервале 68–77 %  $\text{SiO}_2$

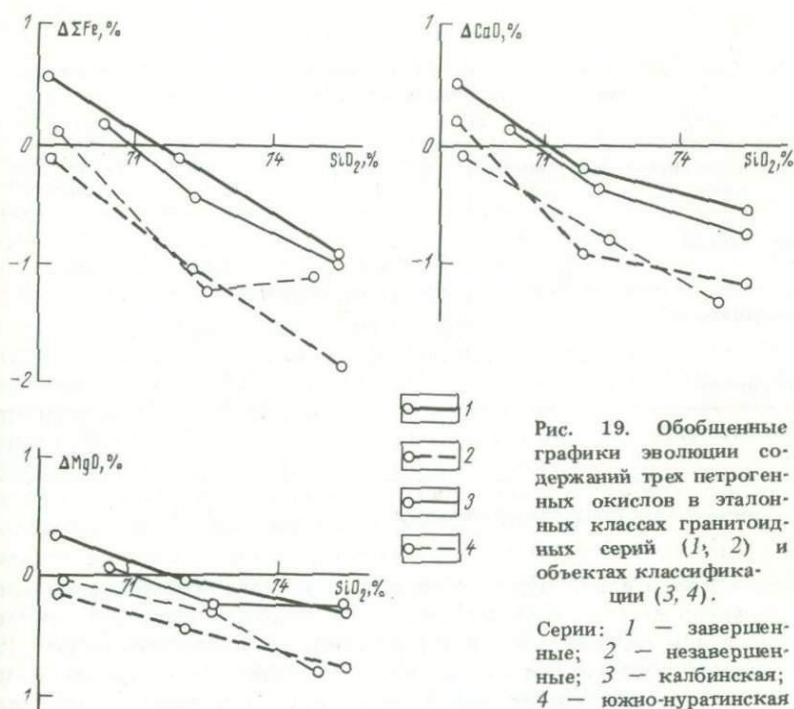


Рис. 19. Обобщенные графики эволюции содержания трех петрогенных окислов в эталонных классах гранитоидных серий (1, 2) и объектах классификации (3, 4).

Серии: 1 — завершенные; 2 — незавершенные; 3 — калбинская; 4 — южно-нуратинская

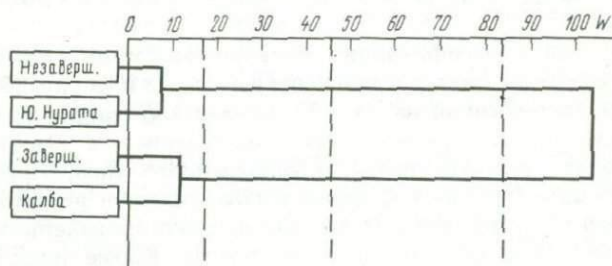


Рис. 20. Результаты определения принадлежности калбинской и южно-нуратинской серий к завершенному или незавершенному типу

чае в качестве решающего правила применяется значение критерия  $W$  при сравнении характера эволюции содержаний  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  в интервале 68–77 %  $\text{SiO}_2$ . Значение критерия, не превышающее допустимое при заданном уровне значимости, определяет принадлежность распознаваемого объекта к типу серий, от эталонной траектории которого не отличается характер эволюции пород изучаемой серии. Процедура экзамена рассмотренного решающего правила осуществлялась на примере двух гранитоидных серий:



Результаты классификации калбинской и южно-нуратинской гранитоидных серий к завершённому или незавершённому типу

Гранитоидные серии	Завершённый тип	Незавершённый тип	Калбинская	Южно-Нуратинская
Завершённый тип		201,15	11,62	99,33
Незавершённый тип			79,54 <sup>*</sup>	7,56
Калбинская				35,93
Южно-Нуратинская				

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 9 \text{ ст. св}} = 16,92$ .

Калбинской и Южно-Нуратинского ареала [33]. Графики эволюции содержаний  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  для эталонных серий двух типов, а также для калбинской и южно-нуратинской приведены на рис. 19. Процедура определения принадлежности объектов экзамена к одному из альтернативных типов серий осуществлялась с помощью проверки нулевой гипотезы (6) относительно экзаменуемых объектов и эталонных серий на базе признаков, входящих в правило классификации.

Результаты классификации объектов экзамена (калбинская и южно-нуратинская серии) приведены в табл. 22 и на рис. 20. Вид дендрограмм, приведенной на рис. 20, однозначно свидетельствует, что Калбинская серия определена как завершённая, а Южно-Нуратинскую следует считать серией незавершённого типа. Правильность классификации Калбинской серии устанавливается достаточно просто. Хорошо известно, что в ее составе широко проявлены завершающие субщелочные граниты  $\gamma\text{B}$  и пегматиты. Кроме того, эта серия соответствует результатам классификации по своей металлогенической специализации (генетически связанными с ней редкометальными проявлениями). Все это свидетельствует о том, что Калбинская серия является типичным представителем завершённых серий в принятом здесь смысле.

Результаты классификации гранитоидной серии Южно-Нуратинского ареала требуют пояснения, поскольку по литературным данным осуществить однозначную оценку правильности ее классификации не удастся. Результаты применения правила классификации не допускают сомнений относительно ее принадлежности к гранитоидным сериям незавершённого типа в принятом в работе понимании. Рассмотрим имеющуюся информацию о признаках завершённости —

незавершенности гранитоидной серии Южно-Нуратинского ареала и об особенностях ее металлогенической специализации. Привлекая сведения о металлогенической специфике Нуратинской гранитоидной серии [33], можно определить наблюдающиеся различия металлогении гранитоидов, объединяемых в Нуратинскую серию: Северо- и Южно-Нуратинского ареалов. Причем эти различия определяются степенью развития в упомянутых ареалах гранитов Гатчинского комплекса, представляющих собой завершающие интрузии гранитов  $\gamma B$  [33]. С этих позиций наибольший интерес представляет тот факт, что в Южно-Нуратинском ареале Гатчинский комплекс проявлен слабо и признаки редкометального оруденения редкий, а скарново-шеелитовое оруденение, напротив, развито широко и интенсивно [33]. Другими словами, несмотря на объединение гранитоидов авторами работы [33] Северо-Нуратинского и Южно-Нуратинского ареалов в одну Нуратинскую гранитоидную серию, они заметно различаются как по степени завершенности (в Северо-Нуратинском ареале Гатчинский комплекс проявлен значительно более широко), так и по металлогенической специализации. Этот вывод следует из особенностей гранитоидов Северо-Нуратинского ареала: в данном ареале широко развиты граниты Гатчинского комплекса и в связи с этим распространены признаки редкометального оруденения, тогда как скарновые проявления не характерны [33].

Таким образом, экзамен построенного решающего правила в отношении южно-нуратинской серии привел к очень интересному результату. Хотя с петрологических позиций (наличие слабо проявленных гранитов  $\gamma B$  Гатчинского комплекса) гранитоиды Южно-Нуратинского ареала должны быть отнесены к типу завершенных гранитоидных серий, по металлогенической специфике (широко проявленное скарново-шеелитовое, а не редкометальное оруденение) они скорее принадлежат к гранитоидным сериям незавершенного типа, что и было установлено с помощью предлагаемого решающего правила.

Применение методики сравнения и классификации петрохимических моделей петрогенезиса для анализа батолитических гранитоидных серий Казахстана и Средней Азии определялось следующими аспектами. Петрологическая задача состоит в определении особенностей процессов петрогенезиса при формировании батолитических серий двух типов: завершенных и незавершенных. Построение правила классификации дает возможность предсказать наличие еще необнаруженных завершающих фаз (субщелочных или щелочных гранитов и пегматитов  $\gamma B$ ) по характеру становления главных интрузивных комплексов (от кварцевых диоритов до аляскитов) изучаемого объекта. Применение методики обеспечивает выявление отображенных в петрохимических моделях становления главных интрузивных комплексов батолитических серий особенностей процессов петрогенезиса, которые определяют их металлогеническую направленность. Практическая реализация состоит в построении решающих



правил для прогнозирования типа потенциальной рудоносности объекта (вольфрамовый или редкометальный в рассматриваемом примере).

Решающее правило, предлагаемое для установления принадлежности изучаемого массива (формации) гранитоидов к завершеному или незавершеному типу гранитоидных серий, построено на признаках, максимально различающих особенности процессов магматизма, которые определяют металлогеническую специфику двух типов гранитоидных серий. Причем эти признаки не зависят от латеральных и возрастных особенностей проявления процессов магматизма. Так, гранитоидные серии Каратюбинского и Зирабулакского ареалов одновозрастны, территориально сближены и относятся к одной структурно-тектонической зоне, а также неразличимы по петрохимическим составам одинаковых по кремнекислотности разновидностей пород. Однако сравнение этих серий по характеру эволюции пород в интервале 68—77 %  $\text{SiO}_2$  (комбинация признаков, входящая в решающее правило) свидетельствует о принадлежности их разным типам гранитоидных серий ( $W = 44,55$  при  $\chi^2_{0,05}; 18 \text{ ст. св.} = 28,90$ ; см. табл. 21). Кроме того, Зерендинская серия и гранитоидная серия Зирабулакского ареала разновозрастны, территориально удалены, расположены в различных структурно-тектонических зонах, существенно отличаются по петрохимическим особенностям пород при одинаковой их кремнекислотности. Однако эти две серии неразличимы по набору признаков, различающих гранитоидные серии завершеного и незавершеного типа ( $W = 19,57$  при  $\chi^2_{0,05}; 18 \text{ ст. св.} = 28,90$ ; см. табл. 21). Этот пример достаточно наглядно демонстрирует эффективность решения задачи выявления типа металлогенической специализации гранитоидной серии на основе предложенного подхода к моделированию петрогенетических процессов и методов их типизации.

Решение другой задачи — определение характера процессов петрогенезиса, приводящих к формированию поздних гранитов различных формационных подтипов ( $\gamma\text{B}^{\text{I}}$  и  $\gamma\text{B}^{\text{II}}$  или  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$  и  $\gamma\text{B}^{\text{II}}$ ), осуществлялось аналогичными методами и на том же фактическом материале (разумеется, с иным составом обучающих совокупностей). Необходимо оговорить, что рассматриваемые задачи не могут быть объединены в единую последовательную процедуру, так как они относятся к одному иерархическому уровню и основаны на специфических наборах признаков. В связи с этим задача определения подтипа рудоносности также базируется на анализе материала всего массива обучения.

Согласно существующим представлениям [7], среди шести гранитоидных серий, составляющих массив обучения, граниты  $\gamma\text{B}$  зирабулакской серии, а также серий Прибалхашья и Каратюбинского ареала относятся к подтипу гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ , а аналогичные граниты Акжайляу, зерендинской и кандыгайской серий — к подтипу гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{II}}$ . Наиболее четко обособление двух групп серий наблюдается на дендрограмме, соответствующей сравнению петрохимических особенно-

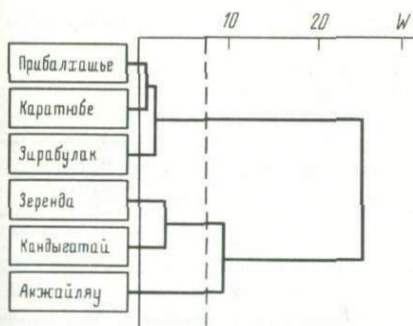


Рис. 21. Дендрограмма меры сходства-различия содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  в одинаковых разновидностях пород магматических серий изучаемых объектов в интервале 68–77 %  $\text{SiO}_2$

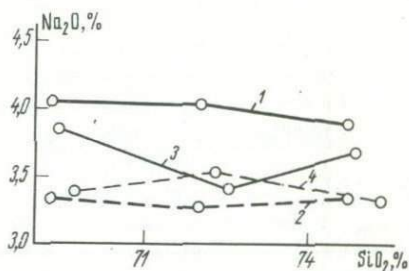
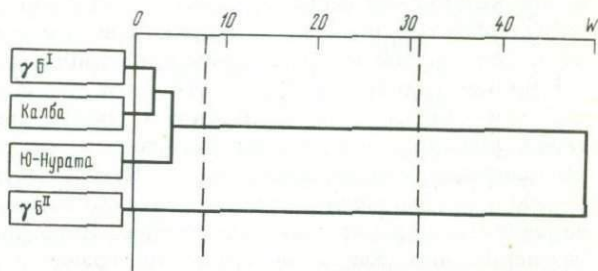


Рис. 22. Обобщенные графики изменения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  в гранитоидных сериях с разным подтипом гранитов  $\gamma\text{B}$  и классифицируемых сериях. Подтипы гранитов: 1 –  $\gamma\text{B}^{\text{II}}$ ; 2 –  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ ; серии: 3 – калбинская, 4 – южно-нуратинская

Рис. 23. Результаты классификации калбинской и южно-нуратинской серий по подтипу гранитов  $\gamma\text{B}$



стей последовательностей разновидностей пород, относительно содержанию в них  $\text{Na}_2\text{O}$ . Требование максимально возможной контрастности выбранного для построения решающего правила признака при необходимости сохранения структуры процесса предопределило выбор такого признака: изменение содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  в кислых разновидностях пород, т.е. в интервале 68–77 %  $\text{SiO}_2$  (рис. 21). Обобщенные графики изменения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  в интервале 68–77 %  $\text{SiO}_2$ , приведенные на рис. 22, наглядно отражают степень различия подтипов гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$  и  $\gamma\text{B}^{\text{II}}$  в отношении выбранного для построения решающего правила проведен на том же материале (калбинская серия и гранитоидная серия Южно-Нуратинского ареала). Результаты экзамена сводятся к следующему (табл. 23, рис. 23): значения критерия  $W$ , не превышающие допустимого значения (при уровне значимости 0,05), соответствуют результатам сравнения калбинской и южно-нуратинской серий между собой и каждой из них с сериями, характеризующимися подтипом гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ . Таким образом, на основании проведенных исследований обе гранитоидные серии следует отнести к сериям, граниты  $\gamma\text{B}$  которых принадлежат формацион-



Результаты классификации калбинской и южно-нуратинской  
гранитоидных серий по типу гранитов Б

Гранитоидные серии	Серии с $\gamma\text{B}^{\text{I}}$	Серии с $\gamma\text{B}^{\text{II}}$	Калбин- ская	Южно-Нуратин- ская
Серии с $\gamma\text{B}^{\text{I}}$		93,90	2,42	6,41
Серии с $\gamma\text{B}^{\text{II}}$			32,19	21,99
Калбинская				2,59
Южно-Нуратинская				

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 3 \text{ ст.св}} = 7,81$ .

ному подтипу  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ . И, следовательно, характер процессов формирования калбинской серии и гранитоидной серии Южно-Нуратинского ареала обладает теми же особенностями, что и процессы петрогенезиса, приводящие к образованию гранитоидных серий с характерными для них гранитами подтипа  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ . Этот вывод может служить основой для оценки металлогенической специализации рассмотренных серий. Однако здесь следует учитывать принадлежность серий типу завершенных или незавершенных. Как известно, по результатам решения предыдущей задачи калбинская серия отнесена к типу завершенных, а гранитоидная серия Южно-Нуратинского ареала к типу незавершенных. Учитывая, что подтип гранитов  $\gamma\text{B}$  для завершенных серий определяется подтипом гранитов  $\gamma\text{B}$ , калбинская серия, для которых характерны граниты  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ , относится к типу завершенных серий с подтипом гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ . В свою очередь гранитоидная серия Южно-Нуратинского ареала является представителем гранитоидных серий незавершенного типа с подтипом гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$ . В соответствии с этими результатами и изложенными выше положениями можно определить особенности процессов формирования изученных гранитоидных серий и их металлогеническую специфику.

Для калбинской серии в соответствии с определенной ранее металлогенической спецификой процессов формирования завершенных серий с характерным подтипом гранитов  $\gamma\text{B}^{\text{I}}$  следует ожидать наличия сопровождающих интрузивные массивы проявлений плюмазитовых субщелочных гранитов или пегматитов с редкометальным оруденением преимущественно танталовой специфики. Наличие полей редкометальных пегматитов в районе развития гранитоидной калбинской серии вполне соответствует результатам проведенных исследований.

Согласно результатам классификации процесс формирования гранитоидной серии Южно-Нуратинского ареала должен быть отнесен к процессам формирования гранитоидных серий незавершенного

типа с типичным для них подтипом гранитов  $\gamma B^I$ , для которых характерны сопровождающие интрузивные массивы проявления W, Sn, Mo и др. (оруденения скарнового или грайзенового типа). Отмеченный выше [33] факт связи скарново-шеелитовых рудопроявлений с массивами гранитоидной серии Южно-Нуратинского ареала подтверждает правильность проведенного экзамена.

В результате применения предлагаемой методики изучения магматических объектов к батолитическим интрузиям гранитоидного состава Казахстана и Средней Азии выявлены признаки, в наибольшей степени различающие процессы формирования гранитоидных серий с различной металлогенической направленностью. И что особенно важно, установленные признаки позволяют прогнозировать характер конечных стадий процесса по результатам реализации основных его стадий без привлечения информации по составу специфических завершающих серий интрузий, различающих серии разных типов и металлогенической специализации. Естественно, что полученные результаты требуют определенного петрогенетического обоснования, хотя бы на уровне предварительной гипотезы.

В качестве теоретической основы дальнейшего изложения использованы представления о гранитизации как о процессе магматического и метасоматического замещения, а также об интрателлурических потоках тепла и вещества, которые рассмотрены в работах Д.С. Коржинского и применяются многими петрологами. Эти представления служат гипотетической моделью для предположений о причинах и механизме проявления процессов гранитообразования (гранитизации) в данном районе в конкретный отрезок геологического времени. Обращение к этой модели петрогенезиса обусловлено переходом от теоретических построений к вещественному выражению и позволяет предложить гипотезу процесса формирования батолитических гранитоидных серий и некоторых особенностей его реализации, которые и обусловили наблюдаемые различия в характере эволюции содержаний некоторых петрогенных окислов в сериях разного петрологического (завершенные и незавершенные) и металлогенического типа. Необходимо отметить, что рассмотренные ниже гипотетические построения не следует оценивать как петрологическую гипотезу, которой придается самостоятельное значение. Эта гипотеза признана показать возможности петрологической интерпретации результатов определения меры сходства-различия характера функционального изменения петрохимических признаков в магматических сериях объектов.

Формирование батолитических гранитоидных серий, петрохимическая информация о породах которых рассматривалась выше, представляется как результат деятельности сквозьмагматических гранитизирующих флюидов. К этому предположению приводят визуальный и количественный анализы тенденций изменения составов пород в магматических сериях объектов. Было установлено, что наибольшие различия в содержаниях петрохимических окислов фиксируются в области основных разновидностей пород и уменьша-



ются в направлении аляскитов, т.е. к положению гранитной эвтектики. Естественно, что состав гранитизируемых пород оказывает наибольшее влияние на формирующиеся разновидности при небольшой интенсивности проявления процесса гранитизации и соответственно наименьшее — при максимальной интенсивности его проявления. Это предположение явно следует из реального характера изменения признаков в последовательности разновидностей гранодиорит — гранит — аляскит (в магматической серии) и позволяет построить гипотетическую модель процесса становления батолитических гранитоидных серий.

Естественно предположить, что зарождение и функционирование источников гранитизирующих флюидов обусловлено во всех случаях (имеются в виду рассмотренные серии) однотипными тектоно-магматическими причинами. Следовательно, можно допустить близость исходного состава, глубины зарождения и энергетической мощности всех аналогичных источников гранитизирующих процессов. В связи с тем что здесь не рассматриваются вопросы о глубине, составе, энергетическом потенциале и других важных в петрологическом отношении причинах проявления и характера конкретного процесса петрогенезиса, все дальнейшее изложение осуществляется лишь в сравнительном аспекте.

Анализ результатов сравнения магматических серий объектов, принадлежащих к альтернативным петрологическим и металлогеническим типам (завершенные — редкометальные или незавершенные — скарново-шеелитовые), а также выявление информативных для их различия признаков определяют причины, обусловившие петрологическую и металлогеническую специфику процессов формирования серий разных типов. При становлении многофазных батолитических гранитоидных серий источник гранитизирующих флюидов, по-видимому, функционировал в пульсационном режиме. Наличие разновременных фаз с интрузивными контактами позволяет предположить палингенно-метасоматический характер гранитизации. Именно представление о пульсационном режиме функционирования глубинного источника гранитизирующих флюидов приводит к выводу о различиях в распределении мощности пульсаций в период становления батолитических гранитоидных серий при формировании объектов альтернативных типов серий.

Глубинные источники флюидов, в результате деятельности которых сформировались серии петрологически незавершенного типа со скарново-шеелитовой рудоносностью, характеризовались наибольшей мощностью пульсаций в начальные этапы общего периода проявления процесса гранитизации. В дальнейшем мощность пульсаций существенно снижалась, сходя на нет в конце периода становления главных фаз (интрузий) серии. При близких мощностях глубинного источника флюидов в период формирования батолитических гранитоидных серий завершенного типа и редкометальной рудоносности распределение ее осуществлялось с нарастанием мощности отдельных пульсаций (становление фаз, интрузий) к конечным этапам форми-

рования главных интрузий серии. Однако в данном случае мощности источника хватило на формирование дополнительных, завершающих интрузий щелочных или субщелочных лейкократовых гранитов и пегматитов.

Приведенное заключение следует из некоторых фактов, установленных в результате анализа петрохимической информации. Естественно, что предположение о разном распределении мощности пульсации должно подтверждаться в первую очередь различными соотношениями объемов разновидностей пород — продуктов деятельности соответствующих пульсациям этапов проявления процесса петрогенезиса. Собственно для решения подобной по смыслу задачи предназначены частотные характеристики встречаемости разновидностей пород в статистико-петрохимических диаграммах (по Э.П. Изоху). В предлагаемой методике такую роль играет процедура центрирования магматических серий безусловными средними, определяющая возможность количественного сравнения частоты встречаемости разновидностей пород в парагенетических ассоциациях магматических объектов.

Прежде чем рассмотреть вопросы петрологической интерпретации результатов применения меры сходства-различия, необходимо остановиться на некоторых свойствах процедуры центрирования. В первую очередь следует отметить, что вслед за Э.П. Изохом и Б.В. Налетовым [23] автор предполагает, что количественные соотношения разновидностей пород в петрохимическом материале по данному объекту (комплекс, серии, формации) в первом приближении сопоставимы с природными соотношениями объемов этих разновидностей в общем объеме магматического тела (комплекса, серии, формации). Если принять это предположение в качестве рабочего, то очевидно, что при одном и том же общем интервале кремнекислотности (в данном случае 62—77 %) величина безусловного среднего будет прямо зависеть от соотношения объемов разновидностей пород в общей выборке.

Соответственно, при сопоставимых объемах каждого из петрогенных составляющих (окислов) в процессах гранитизации с разным распределением мощности пульсаций переход вещества в твердую фазу будет иметь разный характер. Логично предположить, что при реализации процесса, максимум мощности которого падает на начальные пульсации, в парагенетических ассоциациях наибольшее распространение будут иметь интрузии основной части гранитоидной серии (кварцевые диориты, гранодиориты и подобные по кислотности разновидности). При реализации процессов с иным распределением мощности пульсаций формируются серии с преобладанием пород более кислой части серий. Отсюда естественно сделать вывод, что в первом случае в ходе становления гранитоидных серий в твердую фазу при первых пульсациях будет переходить большая доля петрогенных окислов, характерных для составов основных разновидностей гранитоидного ряда (окислы железа, магния, кальция). В сериях альтернативного типа эти окислы в процессе становления после-



довательности пород серии переходят в твердую фазу более или менее равномерно -- без резких перепадов, типичных для первого случая.

Таким образом, очевидно, что процессы формирования батолитических гранитоидных серий разных типов в вещественном (петрохимическом) выражении различаются характером изменения содержаний в магматических сериях окислов железа, магния и кальция. Именно эти различия, фиксируемые при сравнении характера эволюции указанных окислов в объектах альтернативных типов батолитических гранитоидных серий, отчетливо видны на рис. 19 и столь же четко фиксируются при сравнении объектов разных типов по характеру эволюции этих признаков (см. рис. 18).

Петрологическая интерпретация результатов сравнительного анализа петрохимических моделей петрогенезиса свидетельствует о возможности построения модели процессов формирования батолитических гранитоидных серий и выяснения специфики условий проявления этих процессов, обуславливающих их различную металлогеническую направленность. Все сказанное справедливо при условии, что проведенные исследования и интерпретация их результатов имеют вполне определенную проблемную направленность. Очевидным следствием приведенного выше является представление о закономерной взаимосвязи всей последовательности фаз (интрузий), их числа, состава и особенностей, а также закономерно ассоциированных с формированием всей петрогенетической системы процессов рудообразования. Это положение является базовым для прогнозирования типа рудоносности магматических образований по характеру условий проявления процесса петрогенезиса. Все наблюдаемые структурно-петрологические и петрографические особенности магматических объектов, включая тип ассоциированных с ними рудопроявлений, по-видимому, можно связать с условиями возникновения, составом, характером и мощностью глубинного источника гранитизирующих флюидов. Причем генетическая обусловленность наблюдаемых свойств батолитической серии и ее рудоносности может быть сопоставлена (с некоторой долей условности, естественно) с генетическим кодом, определяющим развитие живых организмов. Все это демонстрирует причины, которые не позволяют использовать популяционную модель классификации магматических пород, основанную на строгой индивидуализации процессов формирования породных групп -- взаимосвязанных элементов единого процесса петро- и рудогенеза.

В качестве иллюстрации особенностей применения предлагаемой методики к анализу петрохимической информации ниже рассматривается решение задачи классификации с помощью дискриминантных функций. В связи с тем что задача определения принадлежности объекта экзамена к одному из эталонных классов рассматривалась выше при прогнозировании типа рудоносности двух гранитоидных серий, построение дискриминантных функций и экзамен осуществлялись на том же фактическом материале. Информационную основу

процедуры построения решающего правила составляли петрохимические данные по объектам двух альтернативных по рудоносности классов редкометальных (Акжайляу, Зеренда, Зирабулак, Кандыгатай) и вольфрамовых (Прибалхашье и Каратюбе) серий. Как и в рассмотренном выше случае, объектами экзамена являлись две гранитоидные серии: калбинская и южно-нуратинская. Задача состояла в построении правила классификации на информации об эталонных сериях двух классов с последующей классификацией объектов экзамена к одному из них.

Сформулированная задача решалась с использованием комплекса программ классификации с применением классических статистических процедур. В результате анализа информации по эталонным классам (этап обучения) были построены три модификации правил классификации и получены следующие сообщения об используемых параметрах и уравнениях: 1) ковариационные матрицы 1-го и 2-го классов не равны; 2) векторы средних 1-го и 2-го классов не равны; 3) дискриминантная функция 1-го и 2-го классов:

Признак	Коэффициент	Признак	Коэффициент
SiO <sub>2</sub>	-0,13993	MNO	-1,56437
TiO <sub>2</sub>	-1,06885	MGO	1,34613
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,15867	CaO	-0,10795
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,42498	Na <sub>2</sub> O	-1,25064
FeO	0,01816	K <sub>2</sub> O	0,19636

(порог распознавания = -0,158E02; расстояние Махаланобиса = 0,117E01; теоретическая ошибка = 31,90 %; реальная ошибка при обучении = 27,59 %);

4) линейная решающая функция 1-го и 2-го классов:

Признак	Коэффициент	Признак	Коэффициент
SiO <sub>2</sub>	-0,09929	MNO	-2,11683
TiO <sub>2</sub>	-0,92425	MGO	1,21523
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,13657	CaO	-0,04183
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,46176	Na <sub>2</sub> O	-1,35103
FeO	0,00806	K <sub>2</sub> O	0,20041

(порог распознавания = -0,130E02; дивергенция = 0,582E00; теоретическая ошибка = 28,02 %; реальная ошибка при обучении = 27,76 %);

5) квадратичная функция 1-го и 2-го классов (ошибка при обучении = 34,47 %).

Экзамен построенных правил классификации был осуществлен на том же материале: калбинской и южно-нуратинской гранитоидных сериях. Результаты классификации приведены в табл. 24, 25. При классификации 34 анализов пород калбинской серии (см. табл. 25) к классу редкометальных (индекс 1) было отнесено 17 проб пород.



Результаты определения принадлежности проб пород калбинской серии к одному из эталонных классов

Номера проб	Индекс класса	Номера проб	Индекс класса
1	1	18	1
2	2	19	2
3	2	20	1
4	1	21	1
5	1	22	1
6	2	23	2
7	2	24	2
8	1	25	2
9	1	26	1
10	1	27	2
11	1	28	2
12	2	29	2
13	2	30	2
14	1	31	2
15	1	32	1
16	1	33	2
17	2	34	1

Примечание. Индексы класса 1 и 2 означают, что пробы по комплексу петрохимических признаков определены как представители объектов 1-го и 2-го классов соответственно.

17 проб принадлежат к альтернативному классу (индекс 2). В результате классификации южно-нуратинской серии (табл. 24) 26 проб отнесены к классу 1 (редкометальных), а 30 — к классу 2 (вольфрамовых) серий. Таким образом, по результатам применения дискриминантных уравнений и решающих правил для калбинской серии не получено определенного ответа на вопрос о ее принадлежности к одному из классов. При классификации проб южно-нуратинской серии "голоса" распределялись неравномерно, в связи с этим с преимуществом в четыре "голоса" можно отдать предпочтение выводу о принадлежности серии к классу 2 (вольфрамовые серии).

Приведенные выше результаты классификации калбинской и южно-нуратинской серий свидетельствуют о том, что процедура классификации, основанная на дискриминантных функциях или близких им по сути формальных методах классификации не соответствуют петрологическим представлениям об объектах изучения формационного анализа — магматических телах (фазах, комплексах, формациях).

Из изложенного выше очевидно, что в задачах формационного и прогнозно-металлогенического анализа всю информацию о петрохимических свойствах разновидностей пород необходимо рассматривать как характеристику единой парагенетической ассоциации. Пред-

Результаты определения принадлежности проб пород  
южно-нуратинской серии к одному из эталонных классов

Номера проб	Индекс класса	Номера проб	Индекс класса	Номера проб	Индекс класса
1	1	20	2	39	2
2	2	21	2	40	1
3	2	22	1	41	2
4	1	23	1	42	1
5	1	24	1	43	1
6	1	25	2	44	2
7	2	26	2	45	1
8	1	27	2	46	2
9	2	28	1	47	2
10	2	29	1	48	1
11	1	30	2	49	2
12	2	31	2	50	1
13	1	32	1	51	2
14	2	33	1	52	1
15	2	34	1	53	2
16	2	35	1	54	1
17	2	36	1	55	2
18	2	37	2	56	2
19	2	38	1		

Примечание. Обозначения те же, что и к табл. 24.

ставление Ю.А. Кузнецова о магматических формациях как о парагенезисе (сопроисхождении) пород свидетельствует о том, что вся парагенетическая ассоциация при формировании объектов является результатом реализации одной системы факторов. В этом случае наиболее важными, по-видимому, являются именно закономерности взаимоотношений элементов системы. К этому, собственно, и призывает нас системный подход к анализу природных явлений и процессов. В связи с этим классификация объектов по результатам определения принадлежности каждого из образцов пород в отдельности с последующим подсчетом предпочтения представляется методологически малооправданной. Все это служит основанием считать применение формальных классификационных процедур (дискриминантные и потенциальные функции, распознавание образов и т.п.) для анализа петрохимической информации при формационных и прогнозно-металлогенетических исследованиях недостаточно эффективным как с методологических, методических, так и с петрологических позиций.

Использование методики типизации процессов петрогенезиса на основе их петрохимических моделей для батолитических гранитоидных серий Казахстана и Средней Азии позволило получить весьма интересные результаты. Проблемно ориентированный анализ петрохи-



мической информации, организованной во временную последовательность, обеспечил выявление петрохимических характеристик, функциональное изменение которых в процессе формирования главных комплексов серий наиболее устойчиво различает петрогенетические процессы разной петрологической (завершенные или незавершенные) и металлогенической\* (редкометальные или вольфрамовые) направленности.

Сравнительный анализ петрохимических моделей петрогенезиса обеспечил возможность определения специфики магматических серий гранитоидных батолитов с редкометальной специализацией, но с разным элементным составом (преимущественно танталовым или ниобиевым) рудопроявлений.

Количественные методы классификации и соответствующие решающие правила предназначены для выяснения принадлежности изучаемого объекта к сериям разных классов с целью прогнозирования типа и подтипа потенциальной рудоносности. Особенно важной является возможность прогнозирования подтипа рудоносности (преимущественно танталовый или ниобиевый) для редкометальных серий.

Предсказание характера завершающих интрузий, редкометальной специализации и танталовой специфики проявлений рудогенеза, ассоциированных с процессом становления батолитических гранитоидных серий, позволяет перейти к выяснению возможности применения методики для прогнозирования масштабов рудоносности.

Прогнозирование интенсивности проявления ассоциированного с гранитоидными сериями рудогенеза и, как следствие, масштабов рудоносности рассмотрено ниже. Реализация этой задачи осуществляется на примере танталоносных серий Казахстана, Средней Азии и Забайкалья.

Научная и практическая значимость прогнозной оценки интенсивности проявлений рудогенеза, ассоциированного с реализацией процесса петрогенезиса, вряд ли нуждается в специальном обосновании. Именно оценка возможности обнаружения промышленно интересных (интенсивно проявленных) результатов реализации рудообразующих процессов и составляет главную цель прогнозно-металлогенических исследований любого масштаба и направленности. Следует уточнить, что в приведенных положениях имеется в виду лишь ассоциированный с петрогенетическими процессами эндогенный рудогенез. Причем вначале следует определить смысловое содержание некоторых используемых ниже терминов.

Под интенсивно проявленным рудогенезом понимаются проявления рудообразующих процессов, результаты реализации которых обусловили формирование месторождений. Подразумевается, что рассматриваются магматические объекты, генетическая, пространственная или пространственно-генетическая связь месторождений с которыми признается или, по крайней мере, однозначно на отвергается. Принято, что наличие ассоциированных с изучаемым магматическим объектом проявлений рудогенеза, принадлежащих только классу

рудопроявлений (но не месторождений), свидетельствует о слабо проявленном ассоциированном рудообразовании.

Выше показан один из путей прогнозирования типа проявлений рудогенеза ассоциированных с гранитоидными сериями. Ниже рассматривается решение проблемы классификации магматических объектов по масштабам проявления ассоциированного рудогенеза, квалифицируемых как завершённые гранитоидные серии первого подтипа (завершающиеся формированием гранитов  $\gamma B^I$ ).

Определение принадлежности изучаемой батолитической серии по характеру ассоциированной рудоносности к редкометальному типу и преимущественно танталовому подтипу ставит в качестве актуальной задачу прогнозной оценки масштаба ресурсов полезного компонента. В связи с этим была сформулирована задача определения возможности прогнозирования масштабов оруденения по характеру проявления процессов петрогенезиса, принадлежащих к классу процессов с редкометальной и преимущественно танталовой ассоциированной рудоносностью. Из приведенной формулировки видно, что на предшествующем этапе исследований изучаемая гранитоидная серия по особенностям условий и характеру проявления петрогенетического процесса была классифицирована как принадлежащая именно редкометальному типу и танталовому подтипу рудоносности. Ниже речь идет только о сериях с ассоциированными проявлениями рудогенеза указанного типа и подтипа.

Методологической основой решения данной задачи является принцип отображения всей совокупности условий петрогенезиса и рудообразования в наблюдаемых свойствах парагенетических ассоциаций магматических объектов. Непосредственную информационную основу для использования указанного отображения представляют собой петрохимические данные о составах разновидностей пород в упорядоченной по времени их формирования последовательности (магматической серии).

В конкретной формулировке задачи анализа петрохимической информации определяются следующим образом: 1) выявление особенностей функционального изменения признаков в магматических сериях объектов, поведение которых отображает различия в условиях реализации петрогенетических процессов с интенсивно или слабо проявленным редкометальным (преимущественно танталовым) ассоциированным рудогенезом; 2) построение правила классификации для выяснения принадлежности магматического объекта к классу редкометальных гранитоидных серий (подтип  $\gamma B^I$ ) с интенсивно или слабо проявленным ассоциированным рудогенезом; 3) анализ возможностей применения правила классификации для прогнозной оценки масштабов проявления ассоциированного с гранитоидными сериями рудообразования по результатам процедуры определения принадлежности объектов экзамена.

Процедуру прогнозирования масштабов рудоносности на том же фактическом материале, на котором выше осуществлялось прог-



нозирование типа рудоносности, к сожалению, реализовать не удалось. Причиной этого являются, во-первых, отсутствие петрохимического материала нужного характера и в достаточном количестве, во-вторых, отсутствие опубликованных сведений о масштабах проявлений рудогенеза, связанных с участвующими в предшествующей процедуре объектами, в-третьих, недостаточное число объектов, классифицированных в предшествующей процедуре, как завершённые серии первого подтипа (два объекта), в-четвертых, необходимость использования при решении обсуждаемой задачи иных, чем рассмотренные выше, составляющих парагенетических ассоциаций. В связи с этим информационную основу для решения рассматриваемой задачи составили петрохимические данные, предоставленные С.М. Бескиным и заимствованные из монографии П.В. Коваля [16].

Применение методики типизации петрогенетических процессов к решению проблемы прогнозирования масштабов ассоциированной рудоносности основано на анализе петрохимической информации следующих выборочных совокупностей, представляющих соответствующие объекты: 1) Южный ( $N = 22$ ); 2) Центральный-I ( $N = 19$ ); 3) Казахстан ( $N = 48$ ); 4) Центральный-III ( $N = 26$ ); 5) Средняя Азия ( $N = 43$ ).

В перечисленных совокупностях петрохимическая информация представляет составы разновидностей пород гранитных серий, становление которых сопровождалось процессами формирования пегматитовых полей с танталовой минерализацией или с процессами образования танталоносных литий-фтористых гранитов. Выборочные совокупности объединяют данные о разновидностях пород от лейкократовых биотитовых гранитов и аляскитов до субщелочных лейкократовых гранитов, включая альбитизированные амазонитовые граниты. Среди указанных выше эталонных объектов первые три представляют класс гранитных серий, для которых известны ассоциированные с процессом их формирования проявления танталовой минерализации промышленных масштабов. Два последних объекта составляют класс гранитных серий, с которыми ассоциированы проявления танталовой минерализации, соответствующие по масштабам рудопроявлениям.

Содержание приведенных выше задач близко к задачам процедуры, рассмотренной в предшествующем разделе. Аналогична и методическая реализация решения указанных задач. Однако специфика анализируемого материала обусловила некоторые отличия в процедуре решения обсуждаемых здесь и рассмотренных выше аналогичных по содержанию задач. Петрохимическая информация об участвующих в процедуре объектах включает данные о составе разновидностей пород как нормального ряда дифференциации, так и субщелочных лейкократовых и альбитизированных амазонитовых гранитов. Естественно, что в данном случае в качестве ранжирующего параметра не может быть использовано содержание кремнезема. В связи с этим возникает необходимость выбора ранжирующего параметра, соответствующего сформулированным ранее (см. гл. 3)

требованиям. Ниже рассмотрен пример подбора ранжирующего параметра, применение которого при организации петрохимической информации в магматические серии обеспечит решение задач, сформулированных в начале раздела.

С этой целью выборочные совокупности петрохимических данных пяти изучаемых объектов были проанализированы с позиций возможности использования содержаний другого (не  $\text{SiO}_2$ ) окисла. Однако этот анализ положительного результата не дал. Следующим шагом стал поиск некоторой комбинации признаков (окислов), которая могла бы удовлетворить требованиям, предъявляемым к ранжирующему параметру. Известно, что эффективной процедурой формирования линейных комбинаций исходных признаков является метод главных компонент факторного анализа. В рассматриваемом случае главные компоненты вычислялись на основе анализа как ковариационной, так и корреляционной матрицы. Для каждой пары компонент строились двумерные точечные диаграммы, которые непосредственно использовались для выбора ранжирующего параметра. К показателю, применяемому в качестве ранжирующего параметра, предъявляются следующие требования: закономерное изменение признаков при изменении значений параметра и существование общего для всех изучаемых совокупностей интервала его значений. Практическая реализация этой процедуры показала, что в первую очередь целесообразно выбирать те показатели, для которых выполняется второе требование — наличие общего интервала значений.

Визуальный анализ двумерных точечных диаграмм в координатах каждой пары компонент при поиске показателя с нужными свойствами позволил установить, что в данном конкретном случае из 12 компонент [четыре по ковариационной матрице (94 % общей дисперсии) и восемь по матрице корреляций (93 %)] нет ни одной, которая отвечала бы полностью требованию о наличии общего для всех выборок интервала значений. Был выделен один показатель (первая главная компонента матрицы корреляций), поведение значений которого наиболее полно отвечает требованию о наличии общего интервала значений. Общий интервал значений этой компоненты существует для четырех из пяти изучаемых объектов (рис. 24). В связи с этим при применении данного показателя в качестве ранжирующего параметра мы вынуждены из дальнейшего рассмотрения исключить объект Центральный-1. Как показал внимательный просмотр петрохимической информации по данному объекту, в выборочной совокупности его нарушены соотношения между разновидностями пород, характерные для выборочных совокупностей объектов, участвующих в решении данной задачи. В связи с этим объект Центральный-1 исключается из дальнейшего рассмотрения из-за непредставительности выборочной совокупности в условиях рассматриваемой задачи. Процедура продолжается для четырех эталонных объектов (два с промышленной рудоносностью и два и непромышленной). Таким образом, в качестве ранжирующего параметра  $\delta$  в дальнейшем предлагается использовать первую главную компоненту матрицы



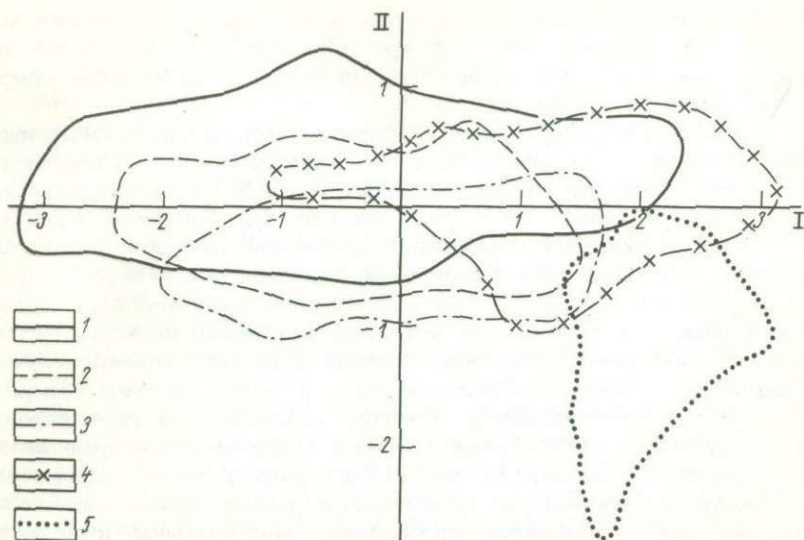


Рис. 24. Контуры распространения фигуративных точек для пород изучаемых объектов в координатах первой и второй главных компонент матрицы корреляции.

Объекты: 1 — Средняя Азия; 2 — Казахстан; 3 — Южный; 4 — Центральный-III; 5 — Центральный-I

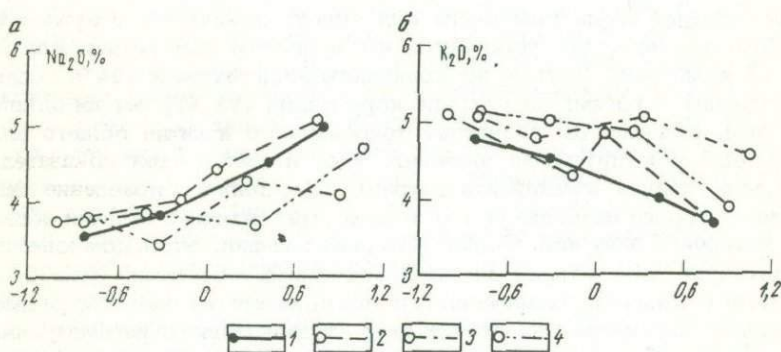


Рис. 25. Графики изменения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  (а) и  $\text{K}_2\text{O}$  (б) в координатах  $\delta$  для магматических серий объектов с разной интенсивностью проявления рудогенеза.

Объекты: 1 — Южный; 2 — Казахстан; 3 — Средняя Азия; 4 — Центральный-III

корреляций. При исключении несущественных членов выражение для  $\delta$  имеет вид

$$\delta = 0,47 \text{Na}_2\text{O} + 0,33 \text{SiO}_2 - 0,46 \text{CaO} - 0,42 \text{K}_2\text{O} - 0,36 \text{MgO} - 0,26 \text{FeO} - 0,24 \text{Fe}_2\text{O}_3. \quad (25)$$

Следующим шагом в процедуре выбора ранжирующего параметра является определение принципиального существования закономерного изменения всех (или большинства) признаков при изменении его значений. Количественно обоснованным доказательством выполнения этого требования могут служить значения оценок корреляционного отношения каждого признака на этот показатель. В конкретном случае величина корреляционного отношения практически для всех признаков во всех объектах существенно отличается от нуля. Другими словами, изменению значений  $\delta$  соответствует закономерное изменение содержаний петрохимических окислов в изучаемых объектах. На рис. 25, а, б приведены графики изменения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  при изменении значений  $\delta$ , которые наглядно иллюстрируют выполнение рассматриваемого требования к параметру  $\delta$ .

Анализ эталонных объектов осуществлялся на основе петрохимической информации, организованной в магматические серии с использованием  $\delta$  в качестве ранжирующего параметра. Выбору информативных признаков, закономерное изменение которых в наибольшей степени различает объекты альтернативных классов, способствовал визуальный анализ дендрограмм корреляционных связей между содержаниями петрогенных окислов. Матрицы корреляций и соответствующие им дендрограммы были построены для всех пяти объектов. Рассмотрение дендрограмм корреляционных связей для объектов альтернативных в данной задаче классов позволяет установить различия во взаимоотношениях содержаний петрогенных окислов. Так, для серий класса объектов с промышленной танталосодержащестью характерно наличие существенной корреляционной зависимости содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  при отсутствии подобной зависимости между содержаниями этих окислов и  $\text{K}_2\text{O}$ . В то же время для объектов с непромышленной танталосодержащестью фиксируется четкая корреляционная зависимость содержаний всех трех указанных окислов:  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ . Анализ дендрограмм позволил установить, что основное внимание должно быть уделено результатам сравнения объектов по характеру закономерного поведения именно этих трех окислов.

Дальнейшая процедура построения правила классификации состояла в определении меры сходства-различия функционального поведения содержаний окислов в магматических сериях. В результате проверки нулевых гипотез (4) и (6) с применением критерия (18) при рассмотренном выше способе реализации методики были определены признаки, функциональное поведение которых при формировании объектов альтернативных классов максимально различается.

Процедура анализа результатов проверки нулевых гипотез заключалась в следующем. По результатам сопоставления динамики каждого признака были построены дендрограммы. Анализ дендрограмм позволил выделить четыре петрогенных окисла, сравнение которых свидетельствует о существенно различном их поведении при формировании объектов разных классов и значительно меньших различиях — объектов одного класса. На рис. 26 приведены дендрограммы



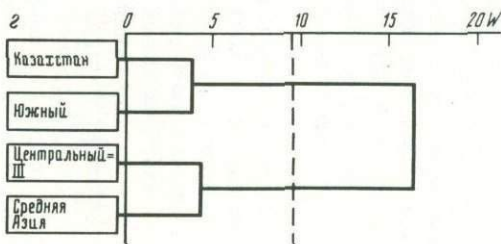
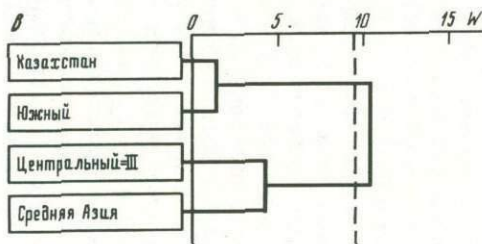
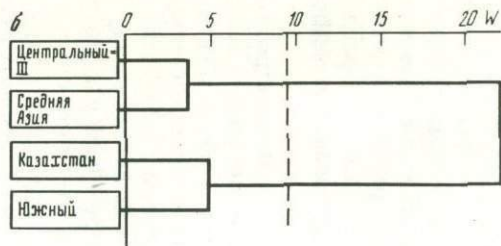
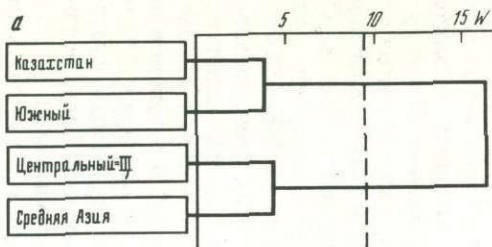


Рис. 26. Результаты сравнения характера изменения содержаний  $\text{SiO}_2$  (а),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (б),  $\text{Na}_2\text{O}$  (в),  $\text{K}_2\text{O}$  (г) в магматических сериях изучаемых объектов

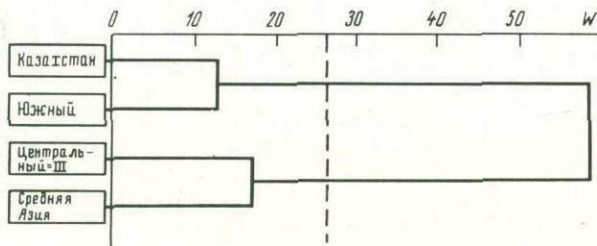


Рис. 27. Результаты сравнения характера изменения комплекса признаков (содержания  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ) в магматических сериях изучаемых объектов

Результаты сравнения динамики содержаний  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  при изменении значений условия (аргумента)

Объекты	Казахстан	Южный	Центральный-III	Средняя Азия
Казахстан		12,82	60,87	63,05
Южный			56,31	54,58
Центральный-III				16,61
Средняя Азия				

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 16 \text{ ст. св.}} = 26,3$ .

сравнения динамики содержаний  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  — признаков с интересующими нас свойствами. В табл. 26 и на рис. 27 приведены результаты сравнения динамики всех четырех перечисленных окислов и соответствующая дендрограмма. На дендрограмме (см. рис. 27) четко видно, что по характеру функционального поведения информативных признаков в процессе петрогенезиса объекты, принадлежащие одному классу по масштабам рудоносности, не различаются. В то же время весьма сильные различия в поведении данных признаков в процессе становления фиксируются между объектами альтернативных классов.

По результатам применения методики для сопоставления изучаемых объектов можно сделать следующий вывод: процессы формирования гранитоидных серий завершеного типа (подтип  $\gamma\text{B}^1$ ) с интенсивно проявленным ассоциированным рудогенезом и процессы становления аналогичных серий, но со слабо проявленным рудообразованием, отражают существенно различающиеся тектоно-магматические условия их реализации. Причем наиболее сильно эти различия в условиях реализации процессов петрогенезиса отражаются на факторах, определяющих функциональное поведение комплекса петрогенных окислов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Петрологическая интерпретация этих факторов и причин их возникновения рассмотрена в конце раздела.

Выявленные признаки, динамики которых в петрогенетическом процессе различает интересующие нас классы гранитных серий, позволили построить правило классификации для прогнозирования интенсивности проявления ассоциированного с изучаемой гранитной серией рудогенеза. Учитывая неотличимость по данным признакам объектов внутри классов, они были объединены в обобщенные совокупности, представляющие каждый из классов. Динамика признаков в каждом из классов приведена на рис. 28.

Анализ эффективности применения предложенного решающего



Результаты классификации изучаемых объектов по характеру динамики содержаний  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  в петрогенетическом процессе

Объекты	Южный + +Казахстан	Центральный-III + + Средняя Азия	Майкуль	Западное Забайкалье
Южный + Казахстан		30,32	39,29	16,99
Центральный-III + + Средняя Азия			18,77	58,91
Майкуль				38,30
Западное Забайкалье				

Примечание. Допустимое значение  $\chi^2_{0,05; 1 \text{ ст. св}} = 21,0$ .

правила осуществлялся на примере экзамена двух объектов: Западное Забайкалье ( $N = 17$ ) и Майкуль ( $N = 16$ ). Графики изменения содержаний входящих в решающее правило окислов для объектов экзамена приведены на рис. 28. В табл. 27 содержатся результаты вычисления критерия  $W$ , который в данном случае играет роль правила классификации, а на рис. 29 приведена дендрограмма, представляющая эти результаты в наглядном виде. Дендрограмма четко фиксирует итог классификации: объект Западное Забайкалье по характеру тектоно-магматических условий петрогенезиса и рудообразования принадлежит к классу объектов с интенсивно проявленным ассоциированным рудогенезом редкометального типа (танталовый подтип), а объект Майкуль отнесен к классу объектов со слабо проявленным рудогенезом того же типа и подтипа.

Таким образом, в соответствии с результатами классификации для объекта Западное Забайкалье прогнозируется возможность обнаружения ассоциированных с ним интенсивных проявлений рудогенеза. Объект Майкуль в этом отношении определен как неперспективный. Оценка результатов экзамена с более детальным анализом литературы и консультациями у специалистов подтвердила правильность классификации, несмотря на предварительное мнение о принадлежности обоих объектов одному классу.

Результаты прогнозирования интенсивности проявления ассоциированного с гранитоидными сериями рудогенеза имеют достаточно четкое петрологическое обоснование. Проблема генезиса субщелочных альбитовых гранитов ("апогранитов" в терминологии некоторых авторов) является одной из наиболее сложных и дискуссионных проблем магматической геологии. Причинами подобного положения являются как сложность магматических объектов, так и высокая практическая значимость проблемы происхождения редкометальных гра-

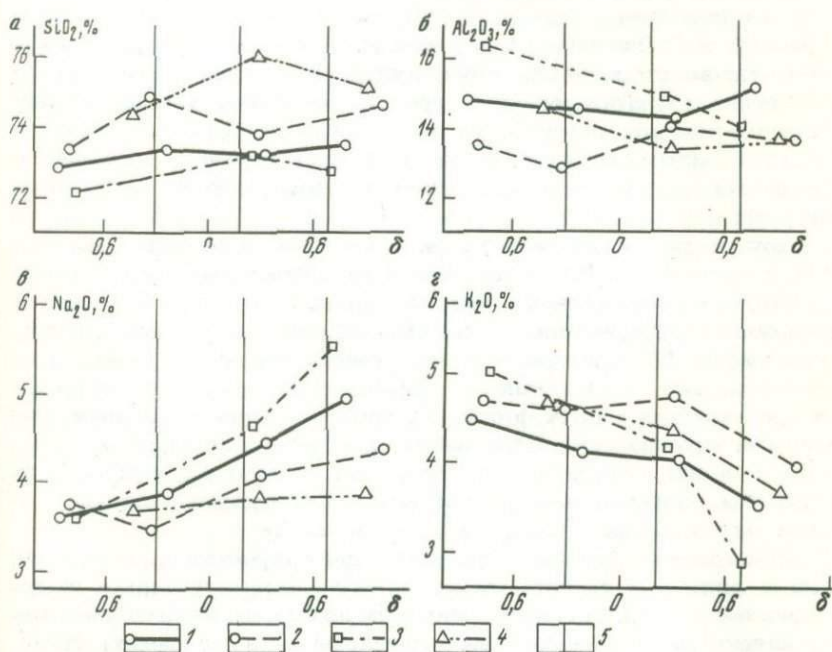


Рис. 28. Обобщенные графики изменения содержаний  $\text{SiO}_2$  (а),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (б),  $\text{Na}_2\text{O}$  (в) и  $\text{K}_2\text{O}$  (г) в магматических сериях эталонных по интенсивности проявления рудообразования объектов и классифицируемых серий.

Объекты: 1 — с интенсивно проявленным рудообразованием (Казахстан и Южный); 2 — со слабо проявленным рудообразованием (Средняя Азия и Центральный-III); 3 — Западное Забайкалье; 4 — Майкуль; 5 — значения аргумента, при которых измерилось расстояние между графиками

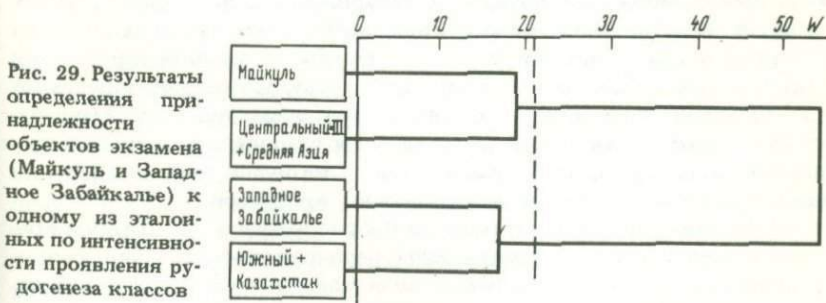


Рис. 29. Результаты определения принадлежности объектов экзамена (Майкуль и Западное Забайкалье) к одному из эталонных по интенсивности проявления рудообразования классов



нитов. В работе П.В. Коваля [16] достаточно полно рассмотрены гипотезы генезиса магматических объектов данного типа.

Широко распространено представление о метасоматическом генезисе редкометальных альбитизированных гранитов, развиваемое в работах А.С. Павленко, А.А. Беуса, Н.Е. Залашковой и др. При этом большинство сторонников этого направления полагает, что редкометальные альбитизированные граниты образуются в результате метасоматической переработки нормальных биотитовых гранитов (или лейкократовых гранитов поздних фаз внедрения) послемагматическими растворами, генетически связанными с этими же гранитами [16].

Другая группа исследователей (О.Д. Левицкий, В.В. Аристов, Р.М. Константинов, В.И. Коваленко и др.) определяет амазонитовые альбитовые граниты как продукт кристаллизации специфических расплавов — дифференциатов нормальной гранитной магмы. Авторы монографии [7] придерживаются близкого мнения на генезис рассматриваемого типа гранитов. Различие взглядов специалистов на происхождение литий-фтористых гранитов отражено в применяемой ими терминологии. В частности, если сторонники метасоматического генезиса определяют граниты как "альбитизированные", то в работах приверженцев магматического происхождения те же граниты сопровождаются термином "альбитовые".

Проведенный анализ петрогенетических процессов, отображенных в динамике свойств последовательно формирующихся разновидностей пород в достаточно широком диапазоне: от гранодиоритов до аляскитов и амазонитовых субщелочных (и щелочных) гранитов — определил предпочтительность гипотезы магматического генезиса амазонитовых альбитовых гранитов. Определяющей причиной является установленная выше связь между тектоно-магматическими условиями формирования главных интрузивных фаз гранитоидных серий и проявлением в завершающих комплексах специфических пород:  $\gamma B^I$  — субщелочных плюмазитовых, в том числе натриевых и натриево-литиевых гранитов или  $\gamma B^{II}$  — щелочных, в том числе агпаитовых с рибекитом и эгирином натриевых гранитов. Примеры уверенного прогнозирования характера завершающих фаз гранитоидных серий, в том числе и амазонитовых альбитовых гранитов, служат основанием для вывода о том, что специфика условий зарождения и проявления процессов петрогенезиса и рудообразования определяет всю последовательность интрузивных фаз, характер и свойства парагенетических ассоциаций пород на всех стадиях реализации петрогенетического процесса, а также тип и интенсивность проявления ассоциированных с ними рудообразующих процессов.

Естественно, что вполне реально предположение о некоторой временной оторванности формирования непосредственно завершающих субщелочных фаз от нормального хода магматической дифференциации процесса. Однако это не противоречит высказанным выше принципиальным положениям. Проявление, характер и состав подобных

фаз predeterminedены всем ходом процесса петрогенезиса, типичного для конкретных тектоно-магматических условий его проявления.

В итоге проведенного анализа петрохимических данных, а также исследования применимости и эффективности предлагаемой методики к проблеме количественного прогнозирования типа и интенсивности проявлений рудогенеза, ассоциированных с процессом формирования магматических объектов, установлены следующие принципиальные ее особенности.

С методологических и методических позиций методика типизации условий петрогенезиса и рудообразования не может быть отнесена ни к одному из известных типов математического решения проблемы и представляет собой новое направление в применении формальных методов к решению данной проблемы.

Мощный и адекватный содержанию рассматриваемой проблемы математический аппарат обеспечивает выявление тонких различий в тектоно-магматических условиях петрогенезиса и рудообразования, которые отображены в разном характере функционального изменения признаков при формировании магматических объектов с различным типом ассоциированной рудоносности и интенсивностью проявления рудогенеза.

Различия в тектоно-магматических условиях формирования батолитических гранитоидных серий (Казахстан и Средняя Азия), определяющие тип (редкометальный или вольфрамовый) ассоциированных проявлений рудогенеза, отображены в разном характере эволюции содержаний  $Fe_2O_3 + FeO$ ,  $MgO$  и  $CaO$  в петрогенетическом процессе. Возможной петрологической причиной отмеченных различий является разное распределение во времени мощности пульсаций источника гранитообразующих флюидов. Причем указанные признаки гранитоидных серий с определенным типом рудоносности сохраняются вне зависимости от возраста или региональной принадлежности типа эталонных или классифицируется с целью прогнозирования магматических объектов.

Специфика тектоно-магматических условий формирования редкометальных гранитоидных серий (танталовый подтип) с интенсивно проявленным ассоциированным рудогенезом определяет поведение  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$  при становлении завершающих интрузий единого петрогенезиса. Именно факторы, обуславливающие особенности повышения этих окислов при становлении аналогичных по типу и подтипу рудоносности серий, отличают объекты с различной интенсивностью проявления ассоциированных с петрогенезисом рудообразующих процессов. Правило классификации, построенное на различиях в характере динамики перечисленных выше признаков в петрогенетическом процессе, обеспечивает прогнозирование интенсивности проявления процессов рудогенеза, ассоциированных с формированием изучаемой серии.

Применимость и практическая значимость методики при решении задач прогнозно-металлогенетических исследований следуют, во-пер-



вых, из инвариантности методики к типу продуктов эндогенного рудогенеза, ассоциированного с петрогенетическими процессами, и, во-вторых, из отсутствия требований к проведению дополнительных специальных исследований магматических образований. Последнее следует пояснить.

Использование методики, основанной на анализе петрохимической информации, не требует построения и обоснования петрологических моделей процессов; необходимым является лишь требование генетической однородности фаз, тел, комплексов, представляемых в процедуре математической обработки как одна совокупность. В геологическом представлении это единственное требование следует рассматривать как требование непрерывности процессов формирования включаемых в один объект (эталлонный или экзаменационный) магматических фаз, тел, комплексов. В частности, с позиций рассматриваемой методики признаком дискретности петрогенетического процесса считается разделение времени формирования индивидуализированных магматических тел эпохой структурной перестройки региона (фазой тектогенеза). Подобные тела не могут быть объединены в одну генетически однородную совокупность и представлять в математическом аппарате один объект: они должны входить в процедуру как самостоятельные объекты. Однако это требование все же нельзя считать абсолютным. При геологических исследованиях и особенно в прогнозно-металлогенетических построениях подобные решения должен принимать исследователь в строгом соответствии со сформулированной конкретной задачей и следующими из нее соотношениями изучаемых объектов.

## Глава 8

### ПРИНЦИПЫ И ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АСОД

Широкое внедрение ЭВМ в практику работ отрасли, соответствующее современному уровню развития геологии, определило также разработку и распространение автоматизированных систем обработки данных (АСОД). В настоящее время в научно-исследовательских и производственных организациях созданы и функционируют десятки специализированных АСОД, предназначенных для целевой обработки количественной, полуколичественной и качественной информации. Подобные системы ориентированы на решение конкретной проблематики и учитывают не только содержательный смысл входящих в проблему задач, но и особенности информационной базы, необходимой для их решения. Во многих случаях аналогичные системы адаптированы к специфике объектов конкретного региона (региональные АСОД).

Практика эксплуатации специализированных АСОД показала их достаточную эффективность и широкие возможности применения для проблемно-ориентированного анализа геологической информации. Естественно, что создание АСОД в первую очередь направлено на решение проблем, наиболее важных в народнохозяйственном аспекте. Кроме того, эффективность АСОД тем выше, чем больший объем информации необходимо проанализировать исследователю для обоснования выводов по изучаемой задаче (проблеме). Поэтому наиболее широко распространены АСОД, ориентированные на прогнозирование рудоносности территорий, с одной стороны, и на анализ геохимической информации для поисков месторождений полезных ископаемых, с другой.

Широкое распространение АСОД, ориентированных на обработку информации для целей геохимических поисков месторождений, вполне объяснимо как с позиций практической значимости геохимических поисков, основанных на выявлении прямых признаков проявления процессов рудообразования, так и с учетом необходимости анализа огромных объемов информации. Однако все системы обработки информации при геохимических поисках месторождений по содержательному смыслу процедуры анализа данных основаны на предварительном исключении влияния породного (петрогенетического) фактора из проблемно ориентированного анализа, поэтому методологические принципы и их методическая реализация не могут быть непосредственно использованы при построении систем анализа петрохимической информации в формационных целях.

Системы анализа информации для прогнозирования рудоносности территорий (см. гл. 7) базируются в основном на принципе анализа геологической ситуации. В связи с этим подобные по направленности системы предназначены для анализа широкого круга разнородной геологической информации. Причем следствием этого является преимущественное представление признаков в качественном и полуколичественном виде с подчиненным объемом количественной информации. Системы рассмотренного типа, естественно, не могут игнорировать как выделенные на изучаемой территории магматические формации, так и их петрографические особенности. В АСОД указанного типа интересующая нас информация включается, как правило, в виде выделенных ранее формаций с фиксированными границами и жестко заданной формационной принадлежностью или средних значений (часто в виде уровней значений) некоторых наиболее интересных с позиций разработчика и пользователя петрохимических признаков. Другими словами, петрохимическая информация в подобных системах представляет собой один или несколько признаков в значительном по объему (сотни) ряду других признаков, описывающих наблюдаемую геологическую ситуацию. Подобное положение вполне соответствует существующему представлению об информационной (в задачах прогнозирования) значимости петрохимических данных. Указанное представление, естественно, отражает, во-первых, сложности прямого использования петрохимической



информации в прогнозных процедурах и, во-вторых, особенности рассматриваемых систем, основанных на анализе разнородной геологической информации.

При решении задач прогнозирования на базе математических методов и с использованием ЭВМ предпочтительнее (см. гл. 7) обработка информации по генетически однородным информационным массивам. Выше приведена иерархическая структура крупных систем прогнозирования. В полном соответствии с этой позицией кратко рассмотрим принципы построения комплекса программ анализа петрохимической информации, ориентированного на решение задач формационного анализа магматических объектов, а также на прогнозирование потенциальной рудоносности магматических комплексов. Последняя из перечисленных задач предполагает реализацию процедуры, аналогичной обсужденной в гл. 7.

Применение петрографической информации определяет возможность решения практически всех задач, составляющих процедуру формационного анализа, включая оценку перспектив рудоносности объектов. Эту процедуру составляет последовательное решение задач сравнения и классификации парагенетических ассоциаций пород по характеру функционального изменения признаков в процессе их становления.

Существующие комплексы программ обработки петрохимических данных, как правило, ориентированы на преобразование исходной информации с использованием известных систем пересчета (Ниггли, Барта, Заварицкого, *CIPW* и др.) и (или) на вычисление разнообразных петрохимических индексов и показателей. В некоторых случаях для анализа петрохимических данных используются методы сравнения и классификации, известные из математической статистики и основанные на представлении петрохимических составов пород парагенетических ассоциаций с помощью многомерной случайной величины. К подобного типа работам относится, в частности, недавно опубликованная монография [13]. Приведенные в ней программы весьма эффективны при обработке петрохимической информации, специализированной на решение конкретных задач петрологии, особенно в аспекте популяционного подхода к классификации магматических пород. Однако по характеру постановки задач, математическим моделям петрохимических составов пород и методам решения содержание работы [13] практически не выходит за рамки традиционного подхода к решению данной проблемы.

Предлагаемая ниже структура комплекса программ анализа петрохимических данных ориентирована на решение широкого круга распространенных задач изучения магматических объектов. Естественно, что это решение относится исключительно к обоснованию выводов на базе анализа вещественных (в частности, петрохимических) признаков объектов. Необходимо отметить, что рассматриваемый ниже комплекс программ инвариантен к характеру используемой количественной информации. С помощью функци-

онально взаимосвязанного комплекса может быть осуществлен анализ любой количественно измеримой информации с целью сравнения и классификации объектов по близости закономерного изменения признаков в упорядоченных последовательностях. Из приведенной конкретизации следует, что необходимым свойством анализируемых данных является существование закономерной взаимосвязи в комплексе признаков, характеризующих объект. Следовательно, задачи сравнения и классификации с применением рассматриваемой последовательности программ могут решаться на базе информации о количественном содержании порообразующих минералов (модальном или нормативном), с использованием данных о геохимических особенностях минералов изоморфных систем, а также по информации о поведении элементов-индикаторов в пределах геохимических аномалий и т. п. Однако основной направленностью обсуждаемого комплекса программ является анализ петрохимической информации.

Функциональная структура проблемно ориентированного комплекса программ обеспечивает возможность анализа петрохимической информации в аспекте следующих задач: 1) определение меры сходства-различия петрохимических составов одинаковых разновидностей пород двух магматических объектов; 2) установление меры сходства-различия изучаемых объектов по содержаниям каждого из участвующих в процедуре сравнения петрогенных окислов в одинаковых разновидностях пород; 3) определение меры сходства-различия петрохимических составов каждой из разновидностей пород парагенетических ассоциаций изучаемых объектов, представленных в методике соответствующими интервалами дискретизации; 4) реализация перечисленных выше задач попарным сопоставлением всех участвующих в процедуре  $k$  объектов с представлением соответствующих мер сходства-различия в виде дендограмм; 5) установление меры сходства-различия характера эволюции содержаний петрогенных окислов в магматических сериях изучаемых объектов (реализуется в аспекте всех задач, перечисленных в пунктах 1 — 4, с построением соответствующих дендограмм при более чем в двух объектах, участвующих в процедуре).

Следует отметить, что все указанные задачи могут быть реализованы с участием реальных объектов и петрологических моделей петрогенезиса, если существует возможность представления последних с использованием петрохимической информации. Эти задачи обеспечивают общую процедуру определения формационной принадлежности магматических объектов, прогнозирования типа и масштабов ассоциированных со становлением объектов проявлений рудообразования.

Процедуру установления формационной принадлежности и (или) прогнозирования рудоносности изучаемых магматических образований составляет последовательность этапов: 1) определение сходства-различия функционального поведения признаков в эталонных объектах интересующих исследователя классов (формаций, форма-



ционных типов или характера рудоносности); 2) выбор признаков, функциональное поведение которых максимально различает процессы формирования объектов разных классов формационной принадлежности или рудоносности; 3) построение правил классификации на основе выбранных информативных признаков для выяснения принадлежности объекта к одному из альтернативных по формационной принадлежности или рудоносности классов. Завершающий этап процедуры обеспечивает построение правила формационной диагностики или количественного прогнозирования ассоциированных с формированием изучаемого объекта проявлений рудогенеза.

Блок-схема последовательности алгоритмов, обеспечивающих процедуру определения меры сходства-различия в соответствии с содержанием перечисленных выше задач, приведена на рис. 30. В качестве информационного обеспечения (ввод, хранение и поиск информации, а также организация файлов и их преобразование) для осуществления процедур обработки петрохимических данных используется функционирующая в ИМГРЭ автоматизированная информационно-поисковая система (АИПС) "Геонавт".

Первой процедурой в алгоритмической последовательности анализа петрохимических данных (см. рис. 30) является выбор ранжирующего параметра, организующего информацию в магматическую серию (блок 2). В соответствии с условиями пользования комплексом программ исследователь может выбрать любой из  $m$  признаков (например, содержание кремнезема, суммарная щелочность, содержание натрия или калия, железистость и т.п.), составляющих петрохимическое описание объекта, с целью использования его в качестве ранжирующего параметра. Но иногда наилучшим выходом может оказаться использование в качестве ранжирующего параметра значений индекса дифференциации,  $A_c$  или любого из набора подобных индексов и показателей. В данном случае выбранный исследователем показатель может быть вычислен и введен как еще один признак дополнительного в петрохимическое описание пород объектов. Возможны ситуации, когда не удастся указать подобный показатель или индекс, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к ранжирующему параметру. В таких случаях выбор ранжирующего параметра осуществляется с помощью метода главных компонент.

При подборе показателя учитывается выполнение следующих требований. Главная компонента (линейная комбинация признаков), используемая в качестве ранжирующего параметра, должна по смысловому содержанию соответствовать оценке аргумента случайной функции с детерминированной компонентой: содержания петрогенных окислов должны закономерно изменяться при увеличении значений данного показателя. Кроме того, не менее важным требованием является наличие общего для всех изучаемых объектов множества значений ранжирующего параметра (показателя). Это требование определяется необходимостью обеспечения процедуры сравнения и классификации объектов на основе меры сходства-раз-

личия признаков при одинаковом значении ранжирующего параметра, т.е. при одном и том же состоянии моделируемого процесса петрогенезиса.

В соответствии с содержанием методики, реализуемой комплексом программ, выбор ранжирующего параметра завершается процедурой организации информации по каждому объекту в виде магматических серий — эмпирических аналогов ретроспективных моделей петрогенезиса. Магматическая серия представляет собой последовательность петрохимических составов разновидностей пород, упорядоченную в соответствии со значениями выбранного ранжирующего параметра. Этой процедурой завершается подготовка информации к дальнейшему анализу.

Необходимым условием определения меры сходства-различия является установление объема множества значений ранжирующего параметра, общего для всех участвующих в процедуре объектов (множество  $U$ ). Именно существование этого множества обеспечивает возможность реализации, процедуры сравнения объектов по совокупности свойств одинаковых разновидностей пород. Естественно, что если множество  $U$  является пустым, то процедура не может быть реализована. В рассматриваемом комплексе программ выбор множества общих для всех объектов значений ранжирующего параметра предусматривается в двух модификациях: во-первых, он может быть указан пользователем, во-вторых, определяется автоматически. Предоставление пользователю возможности указать анализируемый комплексом программ размах значений ранжирующего параметра обеспечивает исследователю право использовать для решения данной задачи наиболее интересующий его выбор разновидностей пород.

Таким образом, основой дальнейшей процедуры является петрохимическая информация, представленная в виде магматических серий с одинаковым размахом значений ранжирующего параметра. Для этих выборочных совокупностей вычисляются значения оценок среднего и дисперсии (безусловных, т.е. без учета значений условия — ранжирующего параметра).

Определение меры сходства-различия с дискретизацией множества значений условия (ранжирующего параметра) на интервалы применяется при выполнении одного ограничивающего требования: дискретизация возможна лишь при числе наблюдений в минимальной по объему (после выбора общего размаха значений условия) выборке, превышающем 20 наблюдений. В связи с этим следующий блок процедуры представляет собой логический оператор, определяющий возможность применения методов сравнения с дискретизацией множества значений условия. Если указанное выше условие об объеме минимальной выборки не удовлетворяется, то мера сходства-различия устанавливается с помощью метода сравнения условных средних при линейной интерполяции (блок 7). Данная ветвь комплекса завершается построением дендрограмм меры сходства-



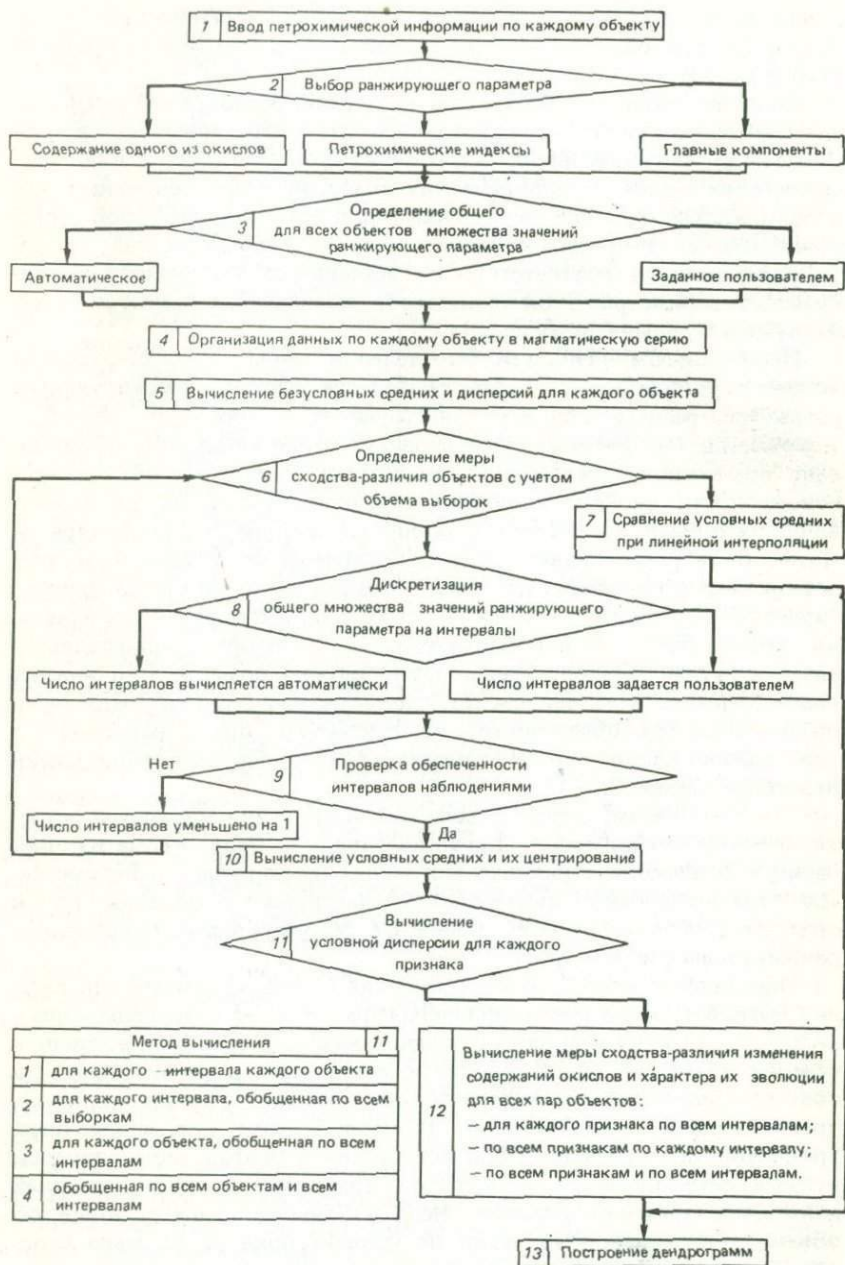


Рис. 30. Блок-схема комплекса программ сравнения и классификации магматических объектов на основе меры сходства-различия функционального изменения признаков в процессе петрогенезиса

различия и распечаткой информации, результирующей применением метода.

Блок 8 (см. рис. 30) реализует процедуру дискретизации магматических серий изучаемых объектов в пределах множества одинаковых значений ранжирующего параметра. Эта процедура осуществляется одним из приведенных в соответствующих блоках путей. Число интервалов дискретизации может быть указано пользователем. При этом подразумевается, что при постановке и решении задачи исследователь может руководствоваться собственными представлениями об объеме и числе петрографических разновидностей пород. Таким образом, пользователь имеет возможность задавать число и объем интервалов дискретизации в точном соответствии со своими представлениями и требованиями решаемой задачи. В тех ситуациях, когда он не имеет возможности или оснований для априорного задания интервалов дискретизации, их число и границы определяются автоматически. Автоматическая процедура основана на установлении числа интервалов  $k$  с помощью выражения  $k \approx \log_2 n + 1$ .

Следующее действие — распределение наблюдений каждой выборки по интервалам дискретизации. При этом возможны ситуации, когда в одном (или более) интервале число наблюдений равно нулю или единице. В подобном случае невозможно определение величины оценки условного среднего для интервалов с  $n_i = 0$ , а оценку условной дисперсии и для интервалов с  $n_i = 1$ . При  $n_i = 0$  программно предусмотрено объединение каждого такого интервала с соседним по оси значений ранжирующего параметра. Естественно, что подобное объединение осуществляется для всех объектов, участвующих в процедуре. При  $n_i = 1$  в одном или более интервале и невозможности, следовательно, вычисления для них оценки условной дисперсии программно реализуются два решения.

Если число одновременно сравниваемых объектов в данной задаче равно двум и применяется соответствующий критерий с обязательным вычислением условной дисперсии в каждом интервале (см. рис. 30, блок 11.1), то процедура реализует сокращение числа интервалов на единицу. В других случаях (блоки 11.2, 11.3, 11.4) эта операция необязательна. Условная дисперсия для этого интервала объекта принимается равной нулю, что не отражается на возможности вычисления обобщенных оценок условной дисперсии.

Необходимо кратко пояснить содержание понятия "центрирование условных средних" (см. рис. 30, блок 10). Проверка гипотезы о равенстве характера эволюции признаков в процессе предусматривается приведение условных средних к единому масштабу измерений, исключая влияние возрастных и латеральных петрохимических особенностей пород изучаемых объектов. Подобная операция совершенно необходима при формационном анализе на уровне абстрактных формаций и при прогнозно-металлогенетических исследованиях, которые, как правило, базируются на изучении магматических объектов разного возрастного и регионального положения. Операция центрирования осуществляется вычитанием величины



оценки безусловного среднего для данного окисла из эмпирического значения условного среднего для каждого интервала дискретизации, которая осуществляется для каждого объекта.

Содержательный смысл операций, реализуемых объединенными в блок 11 программами (см. рис. 30), очевиден. Следует лишь отметить, что основой вычисления оценок условных дисперсий является процедура установления выборочных значений дисперсии для каждого интервала дискретизации с последующим использованием этих, в определенной мере базовых, оценок при вычислении значений условной дисперсии по всем интервалам одной выборки, одному интервалу всех выборок и, как максимум обобщения, по всем интервалам и всем выборкам для каждого из участвующих в процедуре признаков.

Непосредственное вычисление меры сходства-различия реализуется программами, объединенными на рис. 30 в блок 12. На блок-схеме указаны варианты вычисления меры сходства-различия. В результате реализации программ блока 12 устанавливаются числовые значения меры сходства-различия для каждой пары изучаемых объектов. Результаты попарного сравнения всех участвующих в процедуре объектов с помощью соответствующих критериев, реализованных программами этого блока, служат основой для построения дендрограмм, иллюстрирующих взаимоотношения всех объектов по соответствующим вариантам меры сходства-различия.

Вся информация по результатам осуществленной процедуры — оценки параметров по интервалам, значения всех критериев дендрограммы результатов определения меры сходства-различия как по петрохимическим особенностям, так и по характеру эволюции — представляются в виде распечатки, результирующей реализацию описываемого комплекса программ. Содержание описанной и представленной в блок-схеме процедуры (см. рис. 30) реализовано на ЭВМ (ЕС-1033). В то же время работу над комплексом программ нельзя считать полностью завершенной. Так, ожидается программной реализации существующее математическое решение некоторых дополняющих общую процедуру блоков. В первую очередь речь идет о реализации автоматической процедуры выбора ранжирующего параметра на основе применения метода главных компонент. Кроме того, не полностью реализовано логическое продолжение процедуры анализа петрохимических данных в формационных и прогнозно-металлогенических целях. Так, после уровня операций, объединяемых в блоки 12 и 13 (см. рис. 30), предполагается реализовать процедуру автоматического выбора информативной комбинации признаков. В данном случае такую комбинацию составляют признаки, функциональное поведение которых максимально различает изучаемые объекты или их классы. Основное содержание этой процедуры базируется на алгоритме анализа дендрограмм в аспекте логики выбора признаков для правила классификации. Определение информативной комбинации признаков для различия всех объектов (или их классов) позволит программно реализовать

процедуру построения правила классификации. Завершать процедуру предполагается блоком определения принадлежности изучаемого объекта к одному из классов эталонных по формационной принадлежности или рудоносности, реализованной в автоматическом режиме.

Выше рассмотрен комплекс программ, реализующий сравнение и классификацию магматических объектов на основе меры сходства-различия функционального изменения признаков в петрохимических моделях петрогенезиса. Эта последовательность взаимосвязанных и проблемно ориентированных программ может быть включена в виде подсистемы в любую систему общегеологического и прогнозно-металлогенического назначения. Применение ее может служить основой для количественного обоснования формационного давления магматических пород региона, количественной оценки металлогенической специализации магматических объектов и т.п. Результаты применения рассматриваемой методики и реализующего ее программного комплекса обеспечивают информационную основу для прогнозно-металлогенических систем более высокого уровня.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальные положения об отображении условий и характера проявления петрогенетического процесса в наблюдаемых свойствах парагенетических ассоциаций магматических объектов, а также о единстве источника петро- и рудогенеза определяют необходимость анализа петрохимических данных с учетом использования этой исключительно важной информации. В современных условиях широкого внедрения в практику работ отрасли вычислительной техники, развертывания исследований по крупномасштабному геологическому картированию и поискам, а также при возрастающей значимости прогнозно-металлогенических обобщений указанная проблема тем более актуальна. В связи с этим содержание работы построено с учетом всех перечисленных требований современного развития исследований в отрасли.

Выше детально рассмотрены методические аспекты количественного анализа петрохимической информации при решении широкого круга задач формационного изучения магматических объектов, а также применение математических методов обработки петрохимических данных для прогнозирования типа, подтипа и масштабов проявления рудогенеза, ассоциированного с становлением гранитоидных серий. Основные результаты проведенных и обобщенных в работе исследований кратко можно охарактеризовать следующим образом.

1. На базе концепции об эндогенном петрогенезисе как реализации термодинамической системы разработаны методологические принципы организации петрохимической информации в виде последовательности разновидностей пород, упорядоченных по относитель-



ному времени их формирования. В результате этой процедуры данные представляются в форме петрохимических моделей петрогенезиса (магматических серий) и составляют информационную базу для реализации задач сравнения и классификации объектов по близости функционального изменения признаков в процессе их формирования.

2. Построение количественной меры сходства-различия закономерной изменчивости петрохимических составов пород в магматических сериях определяется подбором адекватной содержанию задач сравнения и классификации математической модели: случайной функции с детерминированной компонентой априорно неизвестного вида. Адекватность модели определяется следующими ее свойствами: сохранением функциональной структуры и многомерного характера петрохимической информации; неискажением вида природных закономерностей при моделировании функционального изменения признаков в петрохимических моделях петрогенетических процессов; обеспечением возможности построения математических методов определения меры сходства-различия с учетом указанных свойств петрохимических данных.

3. Разработаны математические методы сравнения и классификации магматических объектов по близости характера закономерного изменения признаков в петрохимических моделях петрогенезиса. Определение меры сходства-различия функционального поведения признаков при формировании изучаемых объектов обеспечивает решение широкого спектра задач формационного и прогнозно-металлогенетического анализа. Эффективность применения предложенных методов сравнения и классификации следует из существенно меньшей величины условной дисперсии по сравнению с безусловной. В связи с тем что дисперсия входит в количественное выражение меры при сравнении и классификации в качестве нормирующего множителя, относительная мощность критериев сравнения и правил классификации, основанных на использовании условной дисперсии, значительно выше, чем аналогичных по смыслу традиционных методов с безусловной дисперсией в нормирующем множителе.

4. Применение предлагаемой методики и методов для решения задач формационного анализа позволило обосновать выводы при поведении проблемно ориентированных исследований магматических объектов: 1) определена информативная комбинация признаков, закономерное поведение которых в процессе петрогенезиса различает продукты вулканической деятельности, объединяемые в структурно-фациальной зоне Центрально-Камчатского вулканического пояса в пять разновозрастных формаций; 2) осуществлена формационная диагностика предъявленных объектов с помощью правила классификации, при построении которого использованы информативные признаки; 3) установлена близость условий магмагенерации при проявлении процессов вулканизма в период становления всех пяти вулканических формаций разного возраста; 4) для интрузивной формации габбро-гранодиоритов Камчатки определена комагматичная ей вулканическая формация (липарит-

го-дацитов). Указанные образования представляют собой вулканическую и плутоническую составляющие единой вулкано-плутонической формации; 5) подбор петрохимических моделей процесса для описания характера перераспределения вещества при становлении пяти вулканических формаций Камчатки привел к следующему результату. Модель смещения неприменима для описания характера изменения признаков при формировании андезитовой и липарито-дацитово-вой формации, но вполне точно отражает характер изменения составов разновидностей пород в процессе становления обеих андезито-базальтовых формаций (неогеновой и четвертичной). Установленное соотношение модели смещения и формаций соответствует относительному положению времени проявления вулканической деятельности при их становлении и времени формирования в регионе коры континентального типа как источника материала для обеспечения процессов смещения. Для модели трехстадийной фракционной дифференциации (вариант М.И. Розина и Д.И. Колесникова) на установлено соответствия динамики признаков в процессе становления ни с одной из изученных формаций; 6) определение принадлежности четырех интрузивных формаций Камчатки и двух — Нижнего Приамурья к одному формационному типу позволило сгруппировать их в три класса близости по характеру эволюции признаков в процессе. Один класс составляют три формации Камчатки и верхне-удоминская серия Нижнего Приамурья, второй — субщелочные породы формации трахибазальт-сиенитов Камчатки и третий — образования мяо-чанской серии Нижнего Приамурья; 7) установлена принадлежность шести постороженных базальтовых формаций трех регионов (Камчатки, Армении и Карпат) к одному формационному типу.

5. Анализ петрохимических данных с помощью предложенной методики обеспечил количественно обоснованные заключения по прогнозной оценке рудоносности магматических объектов. Концепция единства источника петро- и рудогенеза и отображения условий реализации петрогенетического процесса в наблюдаемых петрохимических свойствах парагенетических ассоциаций позволила осуществить решение следующих задач: 1) построение правила классификации для предсказания наличия и характера завершающих интрузий и, как следствие, типа потенциальной рудоносности (редкометальной или вольфрамовый) по информации о процессе становления главных интрузивных комплексов батолитических гранитоидных серий Казахстана и Средней Азии; 2) реализация процедуры прогнозирования подтипов рудоносности изучаемого объекта (для редкометальных серий: преимущественно ниобиевый или танталовый) на аналогичной методической и информационной основе; 3) построение правила классификации для прогнозирования масштабов потенциальной рудоносности (промышленный или непромышленный) для батолитических серий редкометального типа и танталового подтипа на основе анализа функционального поведения признаков в процессе становления кислой части серий (от нормальных гранитов до субщелочных и альбитизированных лейкократовых гранитов).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович И.И., Груза В.В.* Фациально-формационный анализ магматических комплексов Л., Недрa, 1972.
2. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М., Финансы и статистика, 1983.
3. *Белоусов А.Ф.* Сериальная модель в исследовании ассоциаций магматических пород. — Геология и геофизика, 1978, № 12, с. 14 — 20.
4. *Белоусов А.Ф.* Популяционная модель в исследовании ассоциаций магматических пород. — Геология и геофизика, 1979, № 1, с. 35 — 45.
5. *Белоусов А.Ф., Кривенко А.П.* Магмогенез вулканических формаций. Новосибирск, Наука, 1983.
6. *Белоусов А.Ф., Кривенко А.П., Полякова З.Г.* Вулканические формации. Новосибирск, Наука, 1982.
7. *Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б.* Редкометалльные гранитовые формации. Л., Недрa, 1979.
8. *Бескин С.М., Марин Ю.Б.* Некоторые вопросы изучения гранитоидов малых и средних глубин. — Зап. Всесоюз. минерал. об-ва, 1972 ч. 101, вып. 2, с. 203 — 222.
9. *Бондаренко В.Н.* Статистические решения некоторых задач геологии. М., Недрa, 1970.
10. *Бондаренко В.Н.* Сравнительный анализ геологических объектов с закономерной изменчивостью свойств. М., Недрa, 1978.
11. *Бондаренко В.Н., Соловьев В.А.* Применение математических методов в сравнительном петрохимическом изучении объектов. М., "Экспресс-информация" ВИЭМС, серия: Математические методы исследований в геологии, 1974, вып. 3, с. 1 — 27.
12. *Бугаец А.Н., Дуденко Л.Н.* Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Л., Недрa, 1976.
13. *Василенко В.Б., Холодова Л.Д., Блинчик Т.М.* Математическая статистика. Проблемы, алгоритмы, программы. Новосибирск, Наука, 1982.
14. *Изох Э.П.* Оценка рудоносности гранитоидных формаций в целях прогнозирования. М., Недрa, 1978.
15. *Ифантопуло Т.Н.* Минералого-геохимические особенности щелочных пород Центрального Туркестано-Алая. М., Недрa, 1975.
16. *Коваль П.В.* Петрология и геохимия альбитизированных гранитов. Новосибирск, Наука, 1975.
17. *Константинов Р.М.* Математические методы количественного прогноза рудоносности. М., Недрa, 1979.
18. *Коржинский Д.С.* Проблемы петрографии магматических пород, связанные с сквозьмагматическими растворами и гранитизацией. — В кн.: Магматизм и связь с ним полезных ископаемых. М., 1955, с. 220 — 234.
19. *Коржинский Д.С.* Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М., Наука, 1973.
20. *Крамбейн У., Кауфман М., Мак-Кеммон Р.* Модели геологических процессов. М., Мир, 1973.
21. *Кузнецов Ю.А.* О состоянии и задачах учения о магматических формациях. — Геология и геофизика, 1973, № 8, с. 3 — 11.
22. *Кутолин В.А.* Проблемы петрохимии и петрологии базальтов. Новосибирск, Наука, 1972.
23. *Налетов Б.Ф., Изох Э.П.* Региональная петрохимия гранитоидов (на примере Западного Узбекистана). Новосибирск, Наука, 1976.
24. *Магматизм и рудоносность Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана* / В.В. Лопатников, Э.П. Изох, П.В. Ермолаев и др. М., Наука, 1982.

25. *Математические методы при прогнозе рудоносности* /Под ред. В.И. Смирнова. М., Наука, 1977.

26. *Петро-геохимические особенности пород Большого трещинного Толбачинского извержения 1975 — 1976 гг. в связи с вопросами петрогенезиса* / О.Н. Волынец, Г.Б. Флеров, В.Н. Андреев и др. — В кн.: Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975 — 1976 гг. М., 1978, с. 86 — 105.

27. *Прохоров Ю.В., Родионов Д.А.* Формальная постановка задач геологического прогнозирования. — В кн.: Математические методы при прогнозе рудоносности. М., 1977, с. 17 — 23.

28. *Родионов Д.А.* Статистические решения в геологии. М., Недра, 1981.

29. *Родионов Д.А., Коган Р.И., Белов Ю.П.* Сравнительный анализ алгоритмов и программ для прогнозирования геологических свойств и рудоносных объектов. — В кн.: Математические методы при прогнозе рудоносности. М., 1977, с. 243 — 269.

30. *Розанов Ю.А.* Случайные процессы. М., Наука, 1971.

31. *Розинов М.И., Колесников Д.И.* Магматические формации зон новейшего вулканизма. Л., Недра, 1975.

32. *Системы островных дуг* Корякско-Камчатской складчатой области / М.М. Лебедев, С.Е. Апрельков, Б.В. Ежов и др. — Вулканология и сейсмология, 1979, № 5, с. 30 — 36.

33. *Формационный анализ гранитоидов Западного Узбекистана.* / Э.П. Изох, З.А. Юдалевич, А.П. Пономарев и др. Новосибирск, Наука, 1975.

34. *Чумаченко Б.А., Власов Е.П., Марченко В.В.* Системный анализ при геологической оценке перспектив рудоносности территорий. М., Недра, 1980.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
Глава 1. Состав и свойства разновидностей пород как источник информации о характере процесса петрогенезиса . . . . .	8
Глава 2. Петрохимические данные в формационных и прогнозно-металлогенических исследованиях . . . . .	22
Глава 3. Задачи сравнения и классификации объектов по петрохимическим данным . . . . .	36
Глава 4. Математические модели петрохимической информации для сравнения и классификации геологических объектов . . . . .	55
Глава 5. Математические методы сравнения и классификации геологических объектов по петрохимическим данным . . . . .	66
Глава 6. Анализ петрохимических данных при формационных исследованиях магматических объектов . . . . .	85
Глава 7. Анализ петрохимической информации при прогнозно-металлогенических исследованиях . . . . .	125
Глава 8. Принципы и пример построения комплекса программ обработки петрохимических данных в специализированных АСОД . . . . .	172
Заключение . . . . .	181
Список литературы . . . . .	184

Валентин Николаевич Бондаренко

АНАЛИЗ ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
ПРИ ФОРМАЦИОННЫХ И ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ

Редактор издательства О. Л. Виноградова  
Обложка художника В. Б. Строганова  
Художественный редактор В. В. Шутько  
Технический редактор О. А. Колотвина  
Корректор В. Т. Юдович  
Оператор Л. А. Миронова

ИБ № 5938

---

Подписано в печать 10.06.85. Т-10976. Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1. Набор выполнен на наборно-пишущей машине. Гарнитура "Сенчури". Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,75. Усл. кр.-отт. 12,0. Уч.-изд. л. 13,32. Тираж 1700 экз. Заказ 791. /288-2. Цена 70 коп.

---

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",  
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли,  
г. Тула, проспект Ленина, 109.



**УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!**  
**ИЗДАТЕЛЬСТВО "НЕДРА"**  
**ГОТОВИТ К ПЕЧАТИ — НОВЫЕ КНИГИ**

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ** информационно-диагностическая система для минералов: Справочное пособие / Фекличев В.Г., Григорашенко Н.Д., Поздняков Э.Н. и др. 1986. 15 л. — 75 к.

Описана система для хранения и использования минералого-диагностической информации на базе машин серии ЕС, включающая: систему сбора первичной информации, автоматический банк данных для массивов различных минералов (прозрачных, непрозрачных, дисперсных, прозрачных редкометалльных), комплекс программ автоматической диагностики минералов в этих массивах, программы ввода — вывода и программы для получения справок из банка данных. Программы даны в основном на языке Фортран-IV.

Для минералогов, петрографов, геологов, занимающихся автоматической диагностикой минералов и вопросами автоматической информационной службы.

**КАРАСИК М.А., КИРИКИЛИЦА С.И., ГЕРАСИМОВА Л.И.** Атмогеохимические методы поисков рудных месторождений. — 1986. — 19 л. — 1 р. 30 к.

Рассмотрены условия формирования ореолов природных газов и паров химических элементов в процессе их миграции от подземных источников. Изложена методика атмогеохимических поисков рудных месторождений, основанная на результатах изучения этих ореолов в атмосфере природных вод, почвах и горных породах. Описаны прямые и косвенные индикаторы месторождений полезных ископаемых. Детально рассмотрена методика атмогеохимических съемок при поисках и разведке различных типов руд. Большое внимание уделено интерпретации выявленных геохимических аномалий.

Для геологов и геохимиков, занимающихся поисками месторождений полезных ископаемых.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел "Книга-почтой" магазинов:  
№ 17 — 199178, Ленинград, В.О., Средний проспект, 61;

Издательство "Недра"

1  
70 коп.

Зр СК-2

4628

НЕДРА