

МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

НЕДРА

МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Под редакцией И. И. АБРАМОВИЧА

2405



ЛЕНИНГРАД
„НЕДРА“
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1978



Методы теоретической геологии. Под ред. И. И. Абрамовича. Л., «Недра», 1978. 335 с. Авт.: И. И. Абрамович, Ю. К. Бурков, В. В. Груза и др.

Освещаются вопросы дедуктивного моделирования важнейших геологических явлений, что рассматривается как определяющее условие развития теоретических основ науки.

Особое внимание уделяется вопросам методологического плана, играющим главную роль при уяснении путей и средств развития теоретической геологии. Анализируются методы теоретической геологии, в том числе конструирования моделей, получения следствий из этих моделей, а также верификации дедуктивных построений на эмпирическом материале. Кратко освещаются методические разработки, касающиеся внедрения языка и методов математики в геологическую науку. Авторы делают упор на описание методов решения теоретических задач стратиграфии, литологии, петрологии, геофизики и тектоники. При этом наряду с обзором состояния дел в каждой из этих дисциплин значительное место уделяется описанию собственных оригинальных теоретических разработок.

Книга представляет интерес для широкого круга геологов и геофизиков всех специальностей, она может быть полезной также для студентов и аспирантов соответствующих вузов.

Табл. 15, ил. 33, список лит. 597 назв.

Авторы: *И. И. Абрамович, Ю. К. Бурков, В. В. Груза, Р. А. Жуков, И. Г. Клушин, А. И. Коробков, В. Л. Масайтис, С. И. Романовский, Ю. Р. Ткачев, С. С. Шульц (мл.)*.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Шестидесятые и особенно семидесятые годы текущего столетия отличаются существенным расширением сферы научных интересов геологов. Сюда относится всестороннее изучение морских акваторий, определение состава верхней мантии с помощью сверхглубокого бурения, анализ результатов дистанционных космических измерений, сравнительная планетология и многое другое. Этому в значительной мере способствовала модернизация арсенала технических и методических средств, среди которых можно выделить новые физические приемы анализа вещества и обработку данных с помощью электронных вычислительных машин.

Наряду с этим явно обострился интерес к методологической составляющей науки. Традиционный теоретический стереотип геологии — сочетание неконтролируемых гипотетических построений с культом первичных данных, якобы свободных от методологических установок исследователя, — уступил место решительному пересмотру научной парадигмы и стремлению в максимальной мере эффективизировать процедуру получения теоретического знания. Важно отметить, что среди исследователей нет единодушия в выборе наиболее перспективных путей решения указанной задачи. Свидетельством тому служат многочисленные публикации представителей разных школ и направлений, подчас с весьма несходных позиций оценивающих состояние и пути развития науки о Земле.

Авторов этой книги объединяет единообразное понимание как фундаментальной задачи теоретической

X геологии — познания механизмов геологических явлений, так и ее прикладной задачи — предвидения экономически важных геологических эффектов, включая прогнозирование месторождений полезных ископаемых. Методологической платформой авторского коллектива является модельно-целевой подход к решению любых задач геологии, а также признание большой роли языка и методов математики в построении теорий. В соответствии с отмеченным главной целью настоящей книги служит анализ путей получения теоретического знания, иначе говоря, рассмотрение методов дедуктивного моделирования при решении теоретических вопросов в разных областях геологии, методов выявления нетривиальных следствий генетических (в широком смысле) гипотез и методов проверки соответствия этих следствий геологической реальности. Все перечисленное выше, т. е. и методы дедуктивных построений и методы верификации отправных гипотез, авторы рассматривают в качестве методов теоретической геологии.

Конструктивность и эффективность дедуктивного моделирования авторы старались проиллюстрировать решением разнотипных задач, относящихся к различным областям геологии. Так, например, в одном из разделов книги показано, что стохастические динамические модели слоенакопления позволяют решать принципиально новые типы геологических задач, связанных, в частности, с вероятностной оценкой количества размытых слоев; это, очевидно, может иметь разветвленные приложения в палеотектонических реконструкциях. Большие эвристические возможности математических моделей и их инвариантность иллюстрируются на примере изучения ассоциаций химических элементов, объединенных иерархической системой корреляционных связей. Решенные таким путем задачи варьируют от палеоклиматических и палеогеографических построений до оценки потенциальной рудоносности осадочных толщ.

Концепция новой глобальной тектоники открыла перед исследователями широкие возможности теоретического моделирования в тех сферах науки, которые

традиционно развивались путем эмпирических обобщений. В связи с этим значение указанной концепции выходит далеко за пределы задач тектонического анализа. В книге подробно рассматриваются петрологические аспекты мобилизма, приведены многочисленные примеры тех петрологических эффектов, которые обусловлены динамикой литосферных плит и ранее не привлекали внимания исследователей. Кроме того, показаны некоторые новые подходы к теоретическому обоснованию рудоносности крупных регионов.

В разделе книги, посвященном методологическим проблемам геофизики, показано, что совершенствование и адаптация интерпретационных моделей тесно связаны с верификацией их на широкой эмпирической основе. При этом сведение типичных для геологии и геофизики результатов пассивных экспериментов (в которых исследователь лишь фиксирует сочетание значений различных переменных) к результатам активных экспериментов содействует получению нового знания в тех случаях, когда обнаруживаются систематические отклонения экспериментальных данных от следствий модели.

Проблема преодоления конвергентности характеристик геологических объектов, являющихся следствием принципиально различных процессов, заставляет обращаться к комплексной геологической, геофизической и геохимической информации, включая материалы космического фотографирования и траекторных спутниковых измерений аномального гравитационного потенциала. Возможность и необходимость такого подхода особенно ясны при рассмотрении основных для геологии моделей геотектоники. Авторы книги ставили перед собой цель — показать, что конструктивность моделей и степень их адекватности геологической реальности не исчерпываются полностью способом их описания. Наряду со стохастической характеристикой геологических ситуаций показаны возможности дедуктивных детерминированных моделей.

Изложение материала в книге подчинено следующей схеме. Вначале рассматриваются общеметодологические проблемы науки. При этом дается авторское понимание теоретической геологии и формулируются требования, предъявляемые к средствам получения теоретического знания. С общих позиций анализируются такие вопросы, как роль и место математики в решении теоретических и прикладных задач, моделирование природных явлений как основа теоретизации науки и т. д. Ответы на все эти вопросы составляют в совокупности методологическое кредо авторского коллектива.

Последующие разделы книги посвящены конкретному анализу методических средств, используемых в разных областях геологии. Вместе с тем, учитывая во многом инвариантный характер обсуждаемых моделей и схем их эмпирического контроля, можно полагать, что предпринятый анализ касается более широкой сферы исследовательской деятельности и не лимитируется приведенным перечнем геологических дисциплин. Следует отметить, что наряду с обзором существующих подходов и методов решения геологических задач в книге нашли достаточно широкое отражение результаты оригинальных разработок авторов.

Участие авторов в написании книги распределилось по главам следующим образом: 1 — В. В. Груза, Ю. Р. Ткачев; 2 — Р. А. Жуков; 3 — А. И. Коробков; 4 — С. И. Романовский; 5 — Ю. К. Бурков; 6, 9, 10 — И. И. Абрамович; 7 — И. И. Абрамович, И. Г. Клушин; 8 — В. Л. Масайтис; 11 — С. С. Шульц (мл.); 12, 13, 14 — И. Г. Клушин. Общее редактирование книги выполнено И. И. Абрамовичем.

Авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю признательность члену-корреспонденту АН СССР Н. Б. Вассоевичу и М. Г. Бергеру за внимательное ознакомление с рукописью и полезные замечания.

ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ

СОСТОЯНИЕ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Наблюдаемый в геологии уже около четверти века устойчивый интерес к проблеме построения теоретического знания отражает естественное стремление глубже осмыслить ее конкретно-научные достижения и тем самым полнее использовать скрытые методологические резервы. В последние годы под явным влиянием процесса математизации науки указанная задача привлекла весьма пристальное внимание и конкретизировалась в виде проблемы создания теоретической геологии, которая стала особым предметом исследования.

Попытки решить вопрос о содержании, границах и методах теоретической геологии отмечены потоком разноречивых публикаций и бурными дискуссиями. Спектр высказываемых при этом точек зрения чрезвычайно широк. Наиболее скептически настроенные исследователи не только отрицают существование у геологии теоретической базы, но и ставят под сомнение саму возможность ее создания. Напротив, самые радикальные «математизаторы» настаивают на необходимости и возможности абстрактного аксиоматического построения теоретических основ геологии. Эти исследователи, однако, не имеют единого мнения не только о том, каким путем может наиболее оптимально развиваться теоретическая геология, но и о ее содержании, назначении и роли в геологическом познании.

Хотя термин «теоретическая геология» давно фигурирует в геологической науке [8], он не стал общепринятым элементом ее языка, что подтверждается, в частности, отсутствием соответствующей статьи в новом издании «Геологического словаря» [5]. Более того, сам этот термин неопределен и многозначен, отсутствует согласованная точка зрения на то, какой именно части геологии следует дать определение «теоретическая».

О ПОНИМАНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Несмотря на определенные успехи в решении вопросов, относящихся к проблеме теоретизации геологического знания, у геологов еще преобладает неконструктивное отношение как к конкретным теоретическим разработкам в разных областях, так и к теоретической геологии в целом. Суть этого отношения состоит в том, что теоретизация рассматривается как абсолютно объективное, стихийное и неуправляемое явление. Тем самым предполагается, что исследователям, ведущим теоретические разработки, достаточно следовать только логике геологической ре-

альности и они могут быть совершенно свободны от того, чтобы придерживаться каких-либо общих формально-логических правил и методов построения теорий, а также от необходимости заранее предъявлять к ним вполне определенные (необходимые и достаточные) требования. Так, не формулируются в явном виде концепции, положенные в основу теорий в качестве постулатов, а сами постулаты оказываются выводимыми друг из друга; не задаются условия справедливости входящих в теории законов; не определяются правила эмпирической интерпретации следствий теорий и т. п.

Подобный подход характерен не только для всей традиционной практики теоретических разработок в геологии, но нередко отмечается и в исследованиях тех претендующих на строгость ученых-математизаторов, которые занимаются построением формализованных теоретико-математических моделей геологических явлений. Не удивительно поэтому, что в представлении многих геологов теоретическая геология выступает просто как область нестрогих теоретических знаний и достижений, суммированных по всем отраслям геологии; как совокупность всего, что имеет хоть какое-то отношение к геологическим теориям, включая сами теории, концепции, принципы, законы, понятия, методы построения теорий, следствия, выводимые из них, и т. п.

Такой взгляд на теоретическую геологию проявляется и в большинстве предпринятых до сих пор попыток ее определения, которые основываются обычно на некотором расчленении геологических исследований. При этом, однако, не достаточно полно вскрывается содержание, структура и назначение теоретической геологии, не проясняется вопрос о ее методах; иными словами, остаются неопределенными качественные, содержательные границы расматриваемой области.

Попытки очертить внешние границы теоретической геологии, как правило, основываются на ее противопоставлении эмпирической и прикладной или даже производственной областям геологии. В крайнем варианте такого противопоставления теоретической считается вся геологическая наука в целом как противоположность производству, в частности горнодобывающей промышленности. Подобный подход, хотя и неявно, проглядывает в обзорах «теоретических» достижений геологии, к которым причисляется получение разнообразных сведений о внутреннем строении Земли и закономерностях размещения месторождений, внедрение новых методов наблюдения и эксперимента и т. п. [12, 16, 18 и др.]. Естественно, что при этом сама геологическая наука остается нерасчлененной. «Теоретическая геология» становится синонимом «геологической науки», т. е. излишним термином.

Наиболее распространено выделение теоретической геологии в качестве альтернативы эмпирической, т. е. той области геологической науки, которая занимается получением, анализом и индуктивным обобщением опытных данных. Нередко она

противопоставляется и прикладной области геологической науки, занимающейся конкретным применением теорий (например, прогнозированием месторождений). При этом соотношение получающегося расчленения с традиционно сложившимися отраслями геологии либо вовсе не рассматривается, либо в неявном виде подразумевается, что все они равноправны — каждая отрасль имеет свою эмпирическую, теоретическую и прикладную части.

В некоторых случаях учитывается определенная иерархия отраслей геологии. Так, иногда к теоретической геологии относят некоторую совокупность дисциплин, противопоставляемую другой совокупности, которая понимается как прикладная геология. Такой подход характерен, в частности, для А. И. Перельмана [13], который к теоретическим фундаментальным геологическим наукам причисляет стратиграфию, тектонику, петрографию, минералогию, геохимию, а к прикладным — инженерную, угольную, нефтяную и подобные им геологии, учение о поисках полезных ископаемых и т. д. Первая группа наук, предметом которых выступают общие научные проблемы геологии, составляет, по мнению А. И. Перельмана, теоретические основы геологии, в то время как науки второй группы, опираясь на теоретические основы, «развивают собственную теорию, имеющую отношение только к поискам, строительству и т. д.» [13, с. 12], т. е. к соответствующим прикладным отраслям.

В последнее время предпринимаются попытки дать определение теоретической геологии в соответствии с существующими представлениями об инвариантной структуре и методах построения научных теоретических систем, а также по аналогии с соответствующими теоретическими областями других наук. При этом появляется возможность точнее определить и границы теоретической геологии в общей системе современного геологического знания, а главное — установить ее назначение и функциональную роль в динамической структуре геологии как научной системы. По своей сути такой подход может считаться дедуктивным, конструкторским [3], модельно-целевым [7]. Он позволяет на базе инвариантного проекта теории познания с учетом конкретных образцов других наук логически определить все необходимые элементы теоретической геологии: объект, предмет, цели, методы и средства, а также их взаимосвязи, т. е. структуру данной научной системы. Наиболее отчетливо конструкторский подход к построению теоретической геологии провозглашается А. М. Боровиковым [3], менее явно — Ю. А. Ворониным и некоторыми другими представителями новосибирской школы. Существенно, однако, что мнения о содержании и структуре теоретической геологии, равно как и о способах построения геологических теорий, у этих исследователей подчас значительно различаются.

Принципиальное значение подобного конструкторского подхода состоит в том, что в его рамках формируется представление о теоретической геологии как о новой сознательно создаваемой

области геологического познания, обладающей всеми атрибутами полноправной научной системы и призванной со временем заместить нынешнюю расплывчатую теоретическую составляющую геологической науки. Таким образом, конструкторский подход предполагает, что определение теоретической геологии должно исходить из «общенаучного опыта, из единой системы методологических установок и общенаучных принципов формирования теоретических знаний» [3, с. 5]. При этом имеется в виду, что понятие «теория» и различные производные от него — понятия гносеологические. Строгое их использование позволяет в полной мере учитывать все достижения теории познания и прежде всего законы логики как науки о формах организации знания. Из этого следует, что отделение теоретической составляющей геологии от других ее областей не может быть проведено на основе онтологических особенностей природных объектов, вводимых в сферу геологических исследований. Иными словами, теоретическая геология не может быть чем-то параллельным стратиграфии, петрологии, минералогии или тектонике, т. е. являться областью знания с объектом исследования, отличным от объектов этих дисциплин.

Проблема теоретизации геологии в принципе не является новой. Достаточно сослаться на длительный опыт теоретизации физики и химии и на сравнительно недавние успехи в этом плане, достигнутые биологией и географией. Этот опыт, конечно, и сейчас используется геологией, однако недостаточно целеустремленно. Более кардинальным является иной путь, основанный на очевидном факте сходства структуры знания и логических принципов его построения в самых разных науках и, в частности, на том, что определяющей формой логической организации знания оказываются научные теории. Из этого факта следует, что проблема теоретизации геологии, несмотря на всю специфику этой области знания, может рассматриваться и решаться как общая проблема теории познания. Обращение к концепциям, понятиям, законам и методологическим установкам теории познания позволит сформулировать общие требования к теоретическим конструкциям геологии и ко всей теоретической геологии, вычленяемой способом, принятым в гносеологии. Разумеется, при этом должна быть учтена и познавательная специфика самой геологии и отдельных ее отраслей, приняты во внимание особенности объектов, целей, методов, накопленных знаний и т. п.

Обратимся теперь к главным особенностям теоретической формы познания в геологии, затронув в общих чертах методологические основы конструирования геологических теорий. Затем с этих позиций попробуем оценить современное состояние теоретической геологии в целом и наметившуюся методологию ее перестройки.

ТИПЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИИ

Содержание, границы и методологическую роль теоретической геологии можно установить на основании анализа геологической науки в двух аспектах: по типу исследовательских задач и уровню общности получаемых знаний.

Основанием для разделения задач на типы служит степень опосредованности исследований относительно природных объектов. Главное назначение геологии состоит в получении знаний о строении и развитии Земли, которые могут быть названы предметными знаниями. Для непосредственного достижения этой цели ставятся и решаются исследовательские задачи, которые следует считать задачами предметного, или конкретно-научного, типа. Одновременно с этим возникает множество дополнительных задач, направленных на выработку правил проведения исследований, создание нормативов, которым должны удовлетворять результаты, введение оценочных критериев и т. п. Характер и роль вспомогательных задач можно показать, рассматривая общую схему постановки и решения предметной задачи. Считается, что сформулировать такую задачу — это значит указать цель исследования, которую необходимо достичь. Конструктивное определение цели состоит в построении знаковой модели результата, а тем самым — во введении некоторых ограничений на него.

Решение задачи находится путем оперирования некоторой совокупностью ранее полученных предметных знаний и исследовательскими приборами и установками на основе специально создаваемых правил, или методов, исследования, которые представляют собой знания в регулятивной форме. Приборы и установки — о вещественные знания — в совокупности с предшествующими предметными знаниями и их знаковыми выражениями могут быть названы средствами исследования. Таким образом, задачу можно определить как множество, включающее цель, средства и методы ее решения, т. е. как тройку $\langle \text{средства, метод, цель} \rangle$. При постановке некоторых промежуточных целей исследования задачу можно представить и в виде совокупности подобных троек, находящихся в различных соотношениях.

Нередко возникают ситуации, когда конкретно-научные задачи не могут быть решены из-за того, что не известны методы или средства, которые следует использовать. В связи с этим при наличии фиксированной цели конкретно-научных исследований возникает необходимость либо разработки методов ее достижения при заданных средствах, либо выявления средств, которые позволят достичь цели с помощью заданных методов, либо определения средств и обоснования методов одновременно. Вырожденный случай, когда известны средства и методы, но не известно, чего можно достичь и что фактически получается при решении, не рассматривается. Эта ситуация по существу равносильна отсутствию задачи и зачастую возникает при формальном

обращении к современным математическим методам и вычислительным средствам.

Задачи, предусматривающие решение перечисленных вопросов, а также обоснование конкретно-научных целей, относятся к методико-методологическому типу исследовательских задач геологии. Методические задачи касаются разработки методов, необходимых и достаточных для получения определенных видов предметных знаний исходя из заданных средств, либо выработки требований к средствам при фиксированных методах, либо, наконец, обоснования того и другого одновременно. Методологические задачи предусматривают выработку правил создания самих методов и требований к ним, выявление условий применения методов разной степени общности, обоснование существования решений задач разных типов. Цепочка последовательных методологических обоснований и соответствующих задач замыкается в конечном итоге на некоторых гносеологических положениях философского толка, затрагивающих уже такие аспекты, как отношение субъекта к объекту, знания к внешнему миру и т. д. В этом случае можно говорить о философском типе исследовательских задач в геологии.

Задачи перечисленных типов, имея собственные цели исследования, базируются и на специфических подходах к их решению. И хотя результаты решения многих из них не приводят непосредственно к достижению конкретно-научных целей геологии, т. е. к получению знаний о тех природных объектах, которые вводятся в ее сферу изучения, эти задачи входят в геологическую науку как необходимые составляющие. В связи с этим можно отметить, что существует необоснованная тенденция рассматривать в качестве геологических лишь те исследования, которые направлены на получение конкретно-научных результатов. Исследования же методического, а особенно методологического и философского характера, трактуются в качестве абстрактно-математических (логических, философских) и считаются не относящимися к геологической проблематике.

Имея много точек соприкосновения с «чистой» методологией, логикой, философией, исследования соответствующей направленности, проводимые в рамках любой естественнонаучной области знания, в том числе геологии, обладают тем не менее некоторой спецификой. Они выполняются с учетом целей данной науки, особенностей рассмотрения ею тех объектов, которые вводятся в сферу изучения, чем и отличаются от «чистых» методологических исследований, направленных на выявление общих законов познавательной деятельности, на формулировку таких общих требований к ее средствам и методам, которые не зависят от конкретных целей познания. Иными словами, задачей «чистой» методологии является поиск инвариантов, присущих процедурам научного исследования, и выработка универсальных требований к методам и средствам познания.

Без развития исследований всех типов немислимо гармоничное развитие геологии в целом. Вместе с тем вполне естественно, что в разные моменты интерес к исследованиям того или иного типа может повышаться или, наоборот, ослабевать. Последние годы отмечены резко возросшим вниманием геологии к методологической проблематике, к вопросам рационализации и эффективизации исследовательских процессов. Массовость работ методологической направленности симптоматична и свидетельствует о том, что их появление неслучайно. Основную причину этого процесса следует искать в неудовлетворительном состоянии как накопленных конкретно-научных знаний, так и методов их получения.

УРОВЕНЬ ОБЩНОСТИ ЗНАНИЯ КАК ОСНОВА ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Важным основанием для разделения геологических исследований служит уровень общности знания, на получение которого они направлены. Соотношение типов конкретно-научных задач, при решении которых извлекаются и используются знания различной степени общности и опосредованности, показано на рис. 1.1.

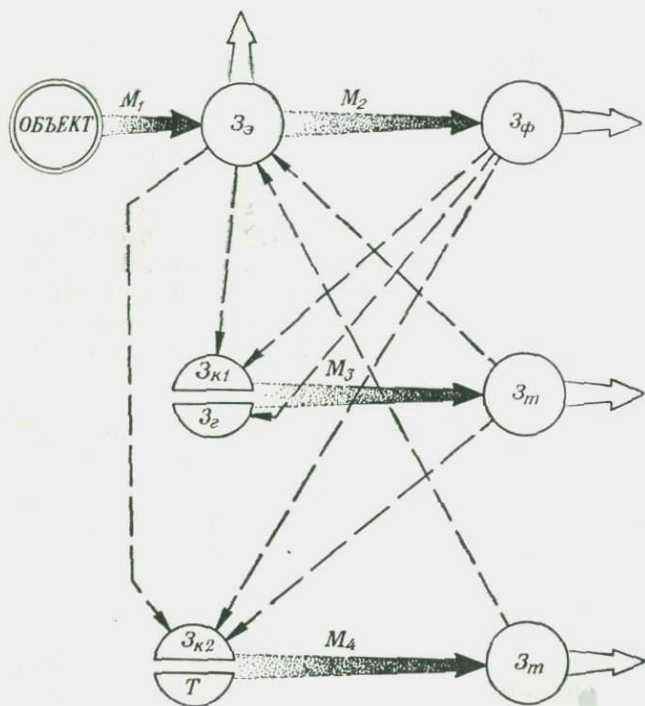


Рис. 1.1. Соотношение геологических знаний разных уровней общности.

При этом учитывается возможность использования знаний, получаемых при решении одних типов задач, в качестве средства при решении других типов как внутри фиксированной научной области, в данном случае геологии, так и вне ее.

Исходными операциями, результаты которых служат предпосылками геологического познания, являются операции «прямого задавания вопросов природе». Они проводятся с помощью органов чувств, измерительных и экспериментальных установок, в совокупности образующих средства наблюдения и эксперимента. Правила проведения этих операций составляют множество M_1 методов наблюдения и эксперимента. Получаемые в результате знания Z_3 обычно называют опытными или эмпирическими. Будучи отображенными в какой-либо знаковой системе, результаты опытных процедур выступают далее как средства получения новых знаний логическим путем, не требующим непосредственного взаимодействия с объектами познания. Одна из групп подобных операций основывается на ранее добытых опытных знаниях Z_3 и правилах M_2 оперирования знаками, которые установлены в логике и математике. Обычно эти правила называют методами обработки данных. Получаемые при их использовании результаты Z_4 либо фиксируют некоторые закономерности Z_7 — стабильно повторяющиеся отношения между теми или иными признаками объектов (самими объектами, событиями, явлениями), либо задают значения новых признаков исходных объектов. В первом случае получают знания более высокого, чем ранее, уровня общности.

Наличие знаний генерализованного плана Z_7 в совокупности со знаниями $Z_{к1}$ о единичных объектах позволяет опосредованным путем найти новые дополнительные теоретические сведения Z_7 об этих объектах. Правила M_3 проведения экстраполяционных процедур формулируются в рамках теорий принятия решений, исследования операций, распознавания образов и т. п. Добываемые при этом результаты могут в свою очередь вовлекаться в сферу отмеченных исследовательских операций, замещая опытные данные.

Множества правил M_1 и M_2 отвечают индуктивному в широком смысле пути обобщения знаний и построения познавательных средств геологии, который состоит в получении и анализе конечных совокупностей опытных данных. Будучи необходимым, этот путь тем не менее не является единственным и достаточным. Он не позволяет, во-первых, выйти за пределы круга непосредственно наблюдаемых явлений, во-вторых, увязать воедино всю совокупность наличных знаний и, следовательно, создать достаточно эффективную систему получения знаний опосредованным путем и оценки их достоверности, а именно эта цель выдвигается перед наукой в качестве важнейшей задачи.

Как свидетельствует накопленный опыт познания, задачи экстраполяции наиболее обоснованно решаются на основе знаний

конкретно-научного типа Z_{k2} и тех логических конструкций, которые обычно называются теориями и законами T . При этом под законом подразумевается универсальное максимально высокого уровня общности высказывание, которому часто придается форма условного, под теорией — логическая конструкция, задающая соотношение между отдельными законами, или, иначе, система законов. Универсальность закона определяется не тем, что фиксируемое им отношение должно иметь место где угодно и когда угодно, а тем, что интенционально (указанием свойств) задаются классы объектов, которым это отношение приписывается. В отличие от закона любая закономерность индуктивного плана задается экстенционально — перечислением объектов, на которых установлено фиксируемое отношение.

Как отмечено на схеме, теории не возникают в результате обобщения или математической обработки конкретно-научных знаний. Построение теорий представляет собой специфическую задачу, которая по мере развития науки становится для нее основной. Иными словами, задача получения знаний о тех или иных свойствах окружающего мира трансформируется в задачу выработки теорий как средства, позволяющего минимизировать затраты на приобретение этих знаний.

В теории различают исходные понятия, принципы (постулаты), связывающие эти понятия, и следствия. В логическом плане теория должна быть непротиворечивой, т. е. нельзя из одних и тех же постулатов, считающихся независимыми, выводить и суждения и их отрицания. Основная функция, которую выполняет теория, — экстраполяционная; важнейшей дополнительной функцией является регулирующая.

Работа на основе общепринятой, хотя, быть может, и неудовлетворительной в тех или иных отношениях, теории способствует единообразному подходу исследователей к расчленению окружающего мира, выбору одних и тех же свойств для изучения и в конечном итоге накоплению больших массивов сопоставимых опытных знаний. В качестве примера можно упомянуть современные теории физико-химической петрологии. Даже при возможных недостатках эти теории играют значительную роль в геологии, способствуя единообразному подходу к изучению минералов и пород, накоплению сопоставимых данных и выявлению на их основе интереснейших закономерностей индуктивного плана. Таким образом, регулирующая функция выполняется теорией по отношению к науке в целом или к ее отдельным крупным областям в процессе объяснения или экстраполяции.

В соответствии с приведенным разделением знаний по уровню общности под теоретической геологией целесообразно понимать область исследований, направленных непосредственно на выработку законов и теорий. Тем самым теоретическая геология противопоставляется областям исследований, направленных на получение знаний невысокого уровня общности любым путем (в том

числе и на основе ранее разработанных теорий), т. е. областям фактуальных исследований, которые имеет смысл называть описательными ввиду привычности этого термина. Рассмотренное разделение правомочно отнести не только к конкретно-научным исследованиям. Соответствующие области целесообразно различать также в методических и методологических исследованиях. Поэтому можно говорить о предметных (конкретно-научных), методических и методологических теориях в геологии. В частности, теории поисков месторождений полезных ископаемых, геологической съемки и картирования относятся к числу методических.

2405
Отметим, что в основу представления о главных классах познавательных процедур часто кладется разделение знаний на эмпирические (опытные) и теоретические (логически опосредованные). При таком подходе к теоретической геологии относят любые исследования, направленные не только на построение теорий и законов, но и на добывание знаний малой степени общности любым логическим путем. Подобный подход вряд ли можно признать удачным по той причине, что граница между эмпирическими и теоретическими знаниями условна, так как даже получение опытных данных предполагает некоторую рациональную опосредованность и основывается на каких-то теориях и законах. Например, при спектральном определении содержаний элементов в пробах непосредственно измеряется интенсивность почернения спектральных линий на фотопластинке. Последующее вычисление оценок содержаний элементов основывается на ряде физических теорий. Учитывая это, любые подобные исследования можно было бы трактовать как теоретические, а любого исследователя рассматривать как теоретика. Очевидно, такой подход иррационален, по крайней мере в практическом, организационном отношении.

Кроме того, возможность считать знания, характеризующие наблюдаемые объекты, теоретическими или эмпирическими зависит от практической обоснованности тех теорий, которые лежат в основе их получения. Поэтому при изменении степени гипотетичности теоретических конструкций и переоценке объема предметной области, к которой могут быть приложены те или иные законы, границы между эмпирическими и теоретическими знаниями смещаются, т. е. они имеют исторический характер. Знания, относимые к эмпирическим, с течением времени все более обременяются элементами теории. Напротив, многим из тех знаний, которые на определенном уровне развития науки считались теоретическими, приписывается статус эмпирических. Более того, отнесение знаний к теоретическим или эмпирическим часто зависит от того, с позиций каких наук они рассматриваются. Например, многие результаты определения содержаний элементов химии интерпретируют как теоретические, а геологи эти же данные рассматривают в качестве эмпирических.

Таким образом, деление знаний на эмпирические и теоретические имеет релятивный характер даже несмотря на то, что в науке существует область знаний, которые принципиально не могут быть включены в состав эмпирических. В геологии к подобному типу относятся знания о прошлых состояниях объектов, получаемые путем временной экстраполяции. По степени использования знаний такого рода геология во многом превосходит другие области и, следовательно, столь же «теоретична», как физика или химия. Однако геологию обычно относят к описательным, эмпирическим или гипотетико-эмпирическим наукам в отличие от той же физики, которую считают эталоном теоретических или точных наук. Такое разделение базируется не на учете количества знаний, получаемых опосредованным логическим путем, а на степени разработанности средств для их получения.

СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ГЕОЛОГИИ

Приведенные выше соображения о содержании и познавательной роли теоретической формы знания позволяют проанализировать современное состояние и наметившиеся пути совершенствования теоретико-методологических основ геологии. Особый интерес в связи с этим представляют работы, специально посвященные вопросам теоретизации геологии.

Остановимся сначала на существующих оценках общих концепций и принципов геологии, в которых фиксируются общепринятые в этой науке представления об объектах, методах и методологии познания и которые называют обычно концептуальным базисом или парадигмой. Недостатки современной геологической парадигмы широко известны, они неоднократно обсуждались, хотя проанализированы пока явно недостаточно.

О степени развитости концептуального базиса геологии наиболее определенно высказывается И. П. Шарапов. Отмечая разнообразие уровней общности концепций — от низших (необходимых для формирования единичных эмпирических обобщений) до высших (общих концепций отдельных наук или даже естествознания в целом), он, в частности, пишет: «На роль концепции в геологии претендует идея актуализма, но она еще недостаточно хорошо сформулирована и не имеет определенного статуса... Это просто идея, используемая без проверки ее фактической или хотя бы логической обоснованности» [21, с. 49]. Точно так же обстоит дело и со многими другими основополагающими онтологическими идеями, в частности космогоническими.

Еще более непоследовательна и противоречива методологическая составляющая геологической парадигмы. Показательным примером здесь могут служить методологические установки, касающиеся соотношения физических и химических методов с соб-

ственно геологическими. Эти противоречащие друг другу установки вытекают из известных онтологических концепций сводимости или, напротив, несводимости геологических явлений к физическим или химическим.

Другим примером прямо противоречащих друг другу методологических концепций является подход к проблеме выделения геологических объектов и так называемых «уровней организации». И здесь расхождения определяются лежащими в основе концепций онтологическими представлениями: одна сторона исходит из идеи объективной единственности объектов и их границ (концепция естественности), другая — из представлений об их множественности (модельно-целевая концепция). Сосуществование этих концепций объясняется тем, что имеющая определенную объективную основу концепция естественности, будучи следствием глубоко эмпирического подхода к познанию, не только традиционно исповедуется многими геологами, но и развивается некоторыми специалистами, занимающимися вопросами методологии. Несостоятельность этой концепции и ее бесплодность в конкретных приложениях неоднократно были показаны в работах многих ученых [7, 19 и др.].

Состояние номологического базиса геологии — совокупности ее законов — также признается не вполне удовлетворительным. Еще в 1953 г. В. В. Белоусов отмечал, что «в геологии существует множество считающихся установленными и доказанными заключений, которые в физике и химии считались бы в лучшем случае рабочими гипотезами» [1, с. 18]. Еще более негативно и, пожалуй, излишне резко оценивает положение дел И. П. Шарпов: «У геологии нет своих собственных законов. Она пользуется законами физики, химии и биологии, лишь слегка приспособленными для ее нужд. У нее нет также своих твердых принципов, которые бы регулировали ее исследования. Каждый геолог ссылается на те или иные принципы, но не формулирует их» [21, с. 53—54].

Для геологии характерно стремление к «уклонению» от выявления принципов и законов, отказ от ясного формулирования концептуальных установок и номологических высказываний, что также можно считать прямым следствием преобладания эмпирического подхода. По этому поводу Ю. С. Салин пишет, что «в существующих формулировках законов было бы напрасным искать отражение фундаментальных связей геологических объектов. Если геолог в своей работе сталкивается с многократно повторяющейся связью объектов, свойств или явлений, он обычно принимает эту связь как саму собой разумеющуюся и не заслуживающую даже упоминания» [14, с. 67]. В. И. Оноприенко подчеркивает, что «фактом остается такое положение, когда зачастую затрудняешься перечислить основные законы той или иной геологической науки, так как они не выражены в явном виде» [11, с. 14]. По данным А. М. Боровикова [3], в результате методоло-

гического анализа формулировок 47 законов геологии были признаны в достаточной степени формализованными всего четыре.

Существующие оценки развитости самих геологических теорий варьируют в широком диапазоне, однако среди них явно преобладают весьма сдержанные: «Роль теории в геологии играют эмпирические обобщения и гипотетические построения» [10, с. 5]; «Считается, что в геологии есть некоторые теории, но они не удовлетворяют... [специальным] требованиям, поэтому фактически могут лишь считаться гипотезами и простыми догадками» [21, с. 53]; «Пока представления о специфике, особенностях, структуре геологических теорий весьма расплывчаты и неопределенны» [11, с. 3]; «Характерным для геологических теорий является и то, что большинство из них находится на сравнительно низком этапе зрелости» [Там же, с. 12]; «В области теоретических обобщений для геологии характерно существование различных, независимых и пересекающихся, теорий и гипотез об одних и тех же объектах и тесно связанных теорий о различных объектах; переплетение физико-химических, механических и физических моделей, «качественных» и математических, с собственно геологическими моделями» [2, с. 122].

Займствование моделей физики без учета специфики геологии в большинстве случаев не позволяет реализовать весьма важную — экстраполяционную — функцию теории. Особенность же собственно геологических теорий заключается в том, что они формулируются в терминах естественного разговорного языка, многозначного, неопределенного и не имеющего строгих правил вывода. Это нередко вызывает логические противоречия. Право называться теорией признается пока лишь за единичными обобщающими построениями, такими как теория типов литогенеза Н. М. Страхова, теория минералообразования Д. С. Коржинского и некоторые другие. Конституируя такое положение, большинство исследователей единодушны во мнении о необходимости совершенствовать теоретические основы геологии.

Особого внимания, по нашему мнению, заслуживают исследования методологического плана, призванные ответить на вопросы, как, каким путем могут быть улучшены существующие теории и построены новые, каким требованиям должны удовлетворять такие конструкции. Эти исследования включают создание методологических программ анализа и построения геологических теорий, а также теоретического аппарата геологических дисциплин и геологии в целом. Так, В. И. Оноприенко [11] на примере теории типов литогенеза делает попытку методологического анализа отдельной геологической теории; Ю. А. Косыгиным [9] проведены методологические разработки, касающиеся теоретической тектоники; Ю. А. Воронин [4] предлагает программу построения теоретической геологии; А. М. Боровиков [3] разрабатывает вариант системы теоретической общей геологии. Проведен методологический анализ фундаментальных положений стратиграфии,

который включал, с одной стороны, содержательный анализ законов, принципов, аксиом, постулатов стратиграфии, а с другой — логическую интерпретацию их формулировок. Результаты анализа дают возможность наметить «направления необходимых увязок, уточнений и дополнений в системе законов, а все это позволит сконструировать формальную систему, которая могла бы стать аксиоматической базой — костяком теоретической стратиграфии, строгой и точной науки» [17, с. 121].

Весьма симптоматично, что смещается акцент методологических исследований. До недавнего времени предметом анализа служили в первую очередь онтологические принципы и в меньшей мере гносеологические рекомендации, которые могут быть из них получены. «Методологический анализ в геологии направлен почти исключительно на содержательные аспекты методов актуализма, историзма и т. п. Реже затрагиваются отдельные логические и гносеологические стороны теоретического познания» [2, с. 122]. В последнее время анализируются уже и логические особенности, и эвристические возможности познавательных конструкций геологии. Наиболее последователен в этом отношении И. П. Шарапов, развивающий идею метагеологии [20, 22] — науки о структуре, теориях и методах геологии, первоочередной задачей которой должен стать «методологический анализ концептуальной, номологической и понятийной баз геологии» [22, с. 128].

Однако в целом, хотя «методологические исследования прочно завоевывают себе место в сфере интересов современной геологии» [11, с. 3], положение дел с геологической методологией, особенно если речь идет о сознательной и последовательной ориентации ее на решение проблем теоретической геологии, обстоит пока не вполне удовлетворительно. Нельзя не согласиться с общей оценкой этого положения, даваемой И. П. Шараповым: «В настоящее время ученые, исследующие Землю, проявляют интерес к методологии, но в литературе по этому вопросу много неясностей. Методологию путают с методикой, т. е. совокупностью методов, или даже с предметной компонентой естественной науки. Другие авторы всю методологию сводят к математической обработке эмпирического материала» [23, с. 11].

Методологическая составляющая геологической парадигмы оформилась около века назад в результате осмысления эмпирического опыта бурно развивавшейся тогда геологии и под влиянием общенаучной методологической доктрины индуктивизма, освященной авторитетом таких выдающихся мыслителей, как Ф. Бэкон и Д. Милль. По этой причине в рамках современной геологической парадигмы невозможно разрешить целый ряд методологических противоречий, например между такими специфическими задачами геологии, как реконструкции ненаблюдаемых процессов и явлений, и предлагаемыми способами их решения, основанными на принципах индуктивизма.

Эти же принципы лежат в основе одной из наиболее распространенных точек зрения на теорию: геологическая теория может быть построена в результате обобщения эмпирических данных, принципы теории — это твердо установленные эмпирические закономерности. Между тем логики, анализируя многочисленные прецеденты построения теорий, давно пришли к выводу, что теории не возникают в результате одного только обобщения эмпирических данных, хотя при формулировании теорий, естественно, учитываются и закономерности индуктивного плана. Исходными принципами теории являются предельно общие гипотезы, которые подбираются таким образом, чтобы обеспечить достаточно хорошую сходимость следствий теории и соотношений, устанавливаемых опытным путем.

Такие теории являются типичными гипотетико-дедуктивными системами. Исходные понятия развитой теории, как правило, не соотносятся с объектами, свойствами, явлениями, доступными чувственному восприятию. Представление же о теории как об индуктивном обобщении опытных данных является следствием несовершенства самой геологии и объясняется малым опытом построения теорий, удовлетворяющих современным требованиям.

Как известно, одним из следствий доминирующего в геологии индуктивного эмпирического подхода является ориентация ее исследований на познание реальности такой, «какая она есть на самом деле». Это положение переносят и в область теоретического познания, требуя, чтобы теория во всех отношениях адекватно отражала природу. При этом забывают, что процесс приближения к истине бесконечен, а основная функция теории — быть постоянно совершенствуемым средством познания. При рассмотрении теорий или теоретических моделей вопрос об их эвристичности подменяется вопросом о том, насколько исходные принципы или частные допущения «правильны» и «адекватны» реальности.

Теория представляет собой знаковую модель, при построении которой упрощение и идеализация выступают как плата за появляющиеся познавательные возможности. С позиций «как есть на самом деле» может быть разрушена любая теория, в частности механика (ведь материальная точка, если исходить из здравого смысла, — нонсенс), классическая термодинамика (обратимый процесс, идеальный газ или изолированная система являются абстракциями, которым ничего не соответствует «на самом деле»), статистическая физика (в ее рамках допускаются бесконечные скорости частиц) и т. д. Но именно с подобных позиций критикуется в геологии, например, теория минеральных равновесий Д. С. Коржинского [15]. Вряд ли процесс развития теоретической геологии можно будет ускорить, если не перенести акцент с обоснования истинности принимаемых допущений на познавательные возможности теоретических моделей.

Одной из особенностей геологии на современном этапе является то, что методология эмпиризма в виде операционализма прививается ей вполне сознательно. В соответствии с концепцией операционализма в науку, и в теорию в частности, могут быть допущены только те понятия, смысл которых устанавливается посредством экспериментально осуществимых операций. Поскольку сведения о генезисе геологических объектов не могут быть получены опытным путем, целесообразность построения генетических теорий, по существу, отрицается [6], предлагается ограничиться опытными данными и знаковыми моделями, в которых фигурируют термины, имеющие операциональный смысл. Проникновение этих идей в методологию геологии является реакцией на крайнюю гипотетичность многих построений. Сами эти идеи возникли в результате поиска пути, который позволил бы избавиться от абсолютно непроверяемых положений в науке. Однако при последовательном проведении принципов операционализма надо было бы разрушить все здание современной науки, начиная с физики.

Убедительная критика этой концепции содержится во многих работах общеметодологического и общезначимого плана, и мы не будем этим заниматься. Отрицание необходимости познания геологического прошлого вряд ли может принести пользу геологии. Однако вполне законен вопрос, как, какими способами можно поставить генетические построения на современную основу, как сделать, чтобы генетические теории позволяли, с одной стороны, получать более или менее достоверные знания о прошлом, а с другой — способствовали решению насущных прикладных задач, в первую очередь предсказательного плана. По всей вероятности, перспективным здесь может оказаться анализ принципов построения микро- и астрофизических теорий, которые, так же как и традиционные геологические, призваны устанавливать связи между наблюдаемыми явлениями исходя из представлений о ненаблюдаемых.

Подводя итог, подчеркнем, что дальнейшие успехи в развитии теоретической геологии будут определяться не только исследованиями конкретно-научных геологических проблем, но и выработкой такой методологии, которая учитывала бы как достижения других естественных наук, обобщенные в рамках теории познания, так и специфику самой геологии. Без подобной методологии процесс получения позитивных результатов может быть весьма длительным и противоречивым.

Принципиальное значение имеет тот факт, что в последние годы начинает постепенно осознаваться необходимость кардинальной методологической переориентации геологии. В качестве альтернативы существующей методологической концепции геологического познания, основанной на принципах индуктивизма и эмпиризма и восходящей к научным традициям классической физики, все настойчивее выдвигается интенсивно развиваемая системно-тектологическая концепция, которая сулит геологии новые познавательные возможности.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

В геологии, пожалуй, более, чем в других областях знания о Земле, как отмечает Дж. Бернал, «утвердившийся взгляд на науку описывает ее законы и теории как закономерные и даже логические выводы из экспериментальных фактов. Сомнительно, чтобы при наличии такого ограничения существовала бы какая-нибудь наука» [8, с. 33]. Не ставя под сомнение научность геологии, следует тем не менее признать удручающую бедность используемых ею познавательных средств. Культ первичного материала, всевозможных данных наблюдений, якобы свободных от субъективизма и теоретических установок исследователя, определил преимущественно индуктивный стереотип теоретико-геологических построений — обобщений и выводов, которые выполняют функции теорий геологической науки. Поэтому в геологии собственно наука, т. е. теоретическая геология, призванная создавать дедуктивные конструкции и совершенствовать познавательные средства, не обладает даже относительной автономией и весьма неопределенна по своим границам и задачам*. Вопросы же методологии долгое время вообще оставались вне поля зрения геологов и традиционно относились ими к философской проблематике.

Математические методы, призванные в геологию лавинообразным ростом первичных, особенно лабораторных, данных не только не облегчили ее положения, но и осложнили его, сыграв роль троянского коня: за одно десятилетие они внесли в геологию больше методологической смуты, чем, пожалуй, два последних века. Разгоревшиеся дискуссии отличает знаменательная особенность: в центре внимания оказались проблемы научного метода, оцениваемого сквозь призму опыта фундаментальных наук. Резкое усиление методологического взаимодействия с другими областями познания означает, что и геология вовлекается в неизбежно болезненный, но благотворный процесс выработки новой научной парадигмы, в процесс, который называют новейшей революцией в естествознании [83].

Основной смысл этой революции, ознаменованной рождением кибернетики, состоит в разрушении методических перегородок,

* В этом легко убедиться, ознакомившись, например, с работой В. И. Смирнова «Состояние и задачи теоретической геологии», представляющей собой «основной», хотя и «далеко не полный перечень достижений в области наук о Земле за последние годы» [70, с. 20], а также с более ранней статьей Ю. А. Косыгина [47], одного из пионеров создания теоретической геологии.

возведенных между науками многовековой специализацией их по объектам исследования, широком методообмене между науками, выработке конструктивного монистического взгляда на мир и отвечающих такому взгляду конструктивных познавательных инвариантов.

Ключевым понятием современного взгляда на мир и его познание служит **система** — один из самых емких и плодотворных инвариантов познания за всю его историю. Быстро развивающаяся наука о системах (общая теория систем и науки кибернетического цикла) возродили на более строгом уровне основные идеи непонятой современниками «всеобщей организационной науки» (тектологии) А. А. Богданова — первой и до сих пор не превзойденной по общности, полноте и стройности системной концепции [68, 72]. Как подчеркивает ее автор, «организационная наука характеризуется прежде всего и больше всего своей **т о ч к о й з р е н и я**» [10, ч. 1, с. 109].

Распространение в науке организационной (тектологической) точки зрения или, что то же самое, системного подхода, проникающего постепенно и в науки о Земле, объясняется в конечном итоге тем, что «**в с я к а я задача практики и теории сводится к тектологическому вопросу: о способе наиболее целесообразно организовать некоторую совокупность элементов, реальных или идеальных**»; что «**в с я к и й научный вопрос возможно ставить и решать с организационной точки зрения**»; что такая точка зрения «...вынуждает ставить и **н о в ы е научные вопросы, каких не способны наметить и определить, а тем более решить нынешние специальные науки**» [Там же, с. 108—109].

В этой главе обсуждаются особенности системного подхода и перспективы совершенствования на его основе методов теоретической геологии. Актуальность подобного обсуждения определяется не только недостаточным вниманием, уделяемым в геологической литературе этой теме, но и теми досадными искажениями самого существа системной концепции, которые допускаются в некоторых публикациях. Одним словом, «мы должны быть постоянно готовы к пересмотру наших научных теорий, а это значит, что в первую очередь необходимо понимать, какими методами мы их строим» [30, с. 74].

ОСНОВАНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Подчеркнем со всей категоричностью: системный подход — это не наука и не теория, а образ мышления, методологическая концепция, исследовательская точка зрения, позиция или «системная ориентация» [91]. Нельзя не согласиться с И. А. Ушаковым: «Системный подход, системные исследования не являются чем-то принципиально новым, возникшим лишь в последние годы. Это естественный и единственно научный метод решения

и теоретических и практических проблем, используемый на протяжении веков» [2, с. 5].

Идея, лежащая в основе системного подхода, во-первых, стара, как само познание, во-вторых, непреходяща, как закон познания, и заключается в модельности любых научных представлений и утверждений о мире. Мы обязаны отдавать себе отчет в том, что никто (никакой субъект) никогда не изучал и не сможет изучать во всей полноте и сложности никакую часть реального мира: тело, процесс, явление, т. е. никакой объект, — это принципиально невозможно. Постулатами системного подхода, его мировоззренческим фундаментом служат также далеко не оригинальные утверждения.

Первое заключается в объективной* бесконечности любых мыслимых характеристик, качеств, признаков и тому подобных свойств реальности в целом и любых ее фрагментов. Допущение различных свойств неявным образом связано с допущением дискретности, поэтому для краткости это утверждение будем называть постулатом бесконечности дискретных свойств. С этих позиций очевидно, что «ни одна объективно научная теория не имеет дела с объектами реальности как таковыми; она всегда исследует объекты, определенным образом препарированные мышлением. Все естественные науки работают с моделями объектов реальности» [44, с. 26].

На необходимость учета этого обстоятельства при геолого-теоретических построениях указывалось неоднократно [19, 22—25, 33—37, 73]. В частности, подчеркивалось, что вне зависимости от нашего желания, осознанно или нет, но, «типизируя структурно-металлогенические зоны, коррелируя разрезы или классифицируя месторождения, мы фактически имеем дело не с объектами — фрагментами литосферы, а лишь с их аналитическими, графическими или мысленными моделями: геологическими или специализированными картами, схемами, таблицами, словесными описаниями, наконец, фиксированными памятью впечатлениями» [36, с. 96].

Второе утверждение касается отсутствия в объективной реальности каких бы то ни было критериев и эталонов значимости, важности, существенности или предпочтительности одних характеристик, качеств и границ любым другим. Это утверждение будем называть постулатом равнозначности свойств.

Принятие второго постулата равносильно признанию того важного положения научной философии, которое стало одним из принципов системной методологии, — тезиса об активной роли исследователя в его взаимодействии с реальностью, что и обозначается термином «познание». Ибо только исследователь (точ-

* Здесь и далее определение «объективный» употребляется в собственном смысле, т. е. как присущее изучаемому объекту и независимое от познающего субъекта.

нее, его цель, отражающая более или менее опосредованно некую практическую потребность) «...оказывается ориентиром, по отношению к которому наполняются содержанием такие созданные человеком понятия, как «существенное» и «несущественное», «главное» и «второстепенное», «необходимое» и «важное» и т. д.» [19, с. 140]. Принцип активности проявляется в фокусировании внимания системного подхода на особенностях исследовательской процедуры, в расширении возможностей и повышении ответственности познающего за результаты исследования на всех его стадиях, начиная с выделения объектов исследования. Сама мысль о том, что объекты исследования однозначно не заданы нам реальностью априори и что их надо как-то выделять, является абсурдной с позиций многих геологов и географов по сей день [5, 33, 37].

Принцип активности, пронизывающий все понятия и установки системного подхода, оказывает без преувеличения поистине революционизирующее влияние на стиль и эффективность конкретно-научного, в том числе и геологического, познания. Должно быть очевидно, что модель и как объект исследования и как продукт познания представляет единство, сплав объективного и субъективного, причем «вне активной деятельности субъекта совсем не возникает то, о соответствии чего с объективной реальностью можно вообще ставить вопрос» [54, с. 83].

Третьим постулатом системного подхода, или «решающим объективным основанием моделирования», служит признание объективного структурно-динамического единства реальности — в всеобщего гомоморфизма, «...некоторого не зависящего от субъекта соответствия между моделью и моделируемым объектом» [62, с. 30]. Гомоморфизм как неполное, по У. Р. Эшби [85], сходство (в отличие от изоморфизма) структур и функций объектов, — пожалуй, самый эффективный инвариант науки, — завоевал право гражданства через посредство кибернетики, доказавшей не только правомерность, но и поразительную плодотворность методов, эксплуатирующих казавшееся бессмыслицей единство животного и машины. Этот частный гомоморфизм за четверть века до кибернетики был предвосхищен А. А. Богдановым, утверждавшим всеобщность единства «...в психических и физических комплексах, в живой и мертвой природе, в работе стихийных сил и сознательной деятельности людей» [10, ч. 1, с. 29].

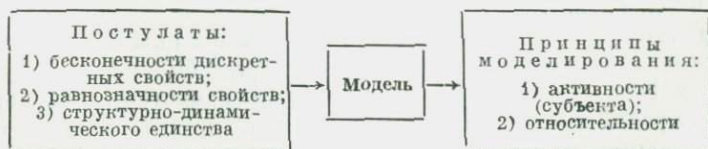
Однако как в «досистемную эпоху», так и в наши дни «не только обывательское сознание, но и мышление большинства ученых специалистов, сталкиваясь с глубоким сходством соотношений в самых различных, самых далеких одна от другой областях опыта, успокаивается на формуле: «это — простые аналогии, не более». Точка зрения — детски наивная; для нее вопрос исчерпывается как раз там, где выступает загадка и возникает необходимость исследования» [Там же]. Сегодня, как и полвека назад, наиболее

важные для геологии гомоморфизмы живой и неживой природы категорически отвергаются многими учеными, соответственно отрицается не только плодотворность, но даже и правомерность использования в геологии методов биологии или кибернетики. И это происходит тогда, когда в самой геологии открыты такие гомоморфизмы, как геологический аналог онто- и филогенеза биологии, впервые установленный в минералогии Д. П. Григорьевым и распространенный на процессы рудообразования Д. В. Рундквистом [66]; когда одним из провозвестников идей тектологии по праву считают Е. С. Федорова * [72].

Итак, если два первых постулата системного подхода определяют необходимость модельности, то третий обосновывает ее возможность, в силу чего «...любую вещь можно представить себе как модель некоторой вещи, и на этом основано и описание и объяснение всякого явления» [30, с. 75]. Модельность в качестве фундаментальной идеи воплощает в себе, синтезирует и как бы преобразует названные постулаты в принципы системного подхода — те руководящие идеи, требования, которые пронизывают все без исключения его понятия и установки вне зависимости от степени их общности и назначения. Выше уже обсуждался один из принципов системного подхода — принцип активности. С ним тесно связан не менее важный принцип относительности любых конкретно-научных утверждений о реальности — принцип относительности моделей.

Как известно, относительность означает неабсолютность, безусловность, т. е. справедливость лишь в определенном осознаваемом и фиксируемом отношении. Поэтому относительность научной модели в целом тем меньше, чем большему отвлечению подверглась соответствующая реалья в процессе моделирования, и, напротив, тем больше, чем конкретней модель и каждая из входящих в нее характеристик. Относительность — это принцип точных наук, который, однако, сохраняет силу и в науках неформализованных, не располагающих конструктивными моделями. Как и постулаты системного подхода, идея относительности не нова для диалектического материализма, настаивающего на приблизительном, относительном характере всякого научного положения о строении материи и ее свойствах, на отсутствии абсолютных граней в природе.

Изложенное можно иллюстрировать следующей схемой.



* В обоснование этого А. Л. Тахтаджян ссылается на забытые геологами статьи Е. С. Федорова «Перфекционизм» (1906 г.) и «Природа и человек» (1917 г.).

ИДЕИ И ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Отправное положение, что модельность лежит в основе системного подхода, служит его исходным принципом, отнюдь не равносильно утверждению тождественности системного подхода моделированию. Познание всегда было модельным, характеризовалось активностью исследователя и относительностью результатов, но назвать его системным, конечно, было нельзя. Модель и система — понятия гомоморфные, связанные отношением, односторонним лишь в одну сторону: всякая система есть модель, но не всякая модель есть система. Иными словами, модельность — это необходимый, но не достаточный признак системного подхода. Наша ближайшая задача — выяснить, благодаря чему модель становится системой, универсальным ключом познания.

Систему можно определить как совокупность элементов любой природы и их связей, выступающую в заданном отношении как целое. Ни система, ни ее элементы и связи не поставлены в соответствие каким бы то ни было материальным объектам, поэтому «манера выражения: этот материальный комплекс не есть система, а вот тот, напротив, обладает признаками системы, — непривильна» [43, с. 118].

Относительность систем как моделей, порождаемых структурированием, неоднократно подчеркивалась в геологической литературе [34—37]. Тем не менее некоторые геологи, искажая саму суть системной концепции, неоправданно объективизируют понятие системы, определяя ее как «комплекс некоторых материальных объектов» [39, с. 6] и сводя ее фактически к «природному телу» или «материальной вещи» [53], чем игнорируют или как минимум недоучитывают модельность системного подхода. В связи с этим приведем высказывание одного из творцов системной концепции У. Р. Эшби. «Мы должны ясно представить себе, как должна определяться «система». Первое ваше побуждение — показать на маятник и сказать: «Система есть вот эта вещь». Этот метод имеет, однако, принципиальный недостаток: каждый материальный объект содержит не менее, чем бесконечное число переменных, и, следовательно, не менее, чем бесконечное число возможных систем... Система... означает не вещь, а перечень переменных... Мы и только мы окончательно решаем, что нам признавать за похожее на машину (систему. — Р. Ж.) и что не признавать» [85, с. 63—64, 66].

Вопрос о природе системы отнюдь не является чисто академическим, в зависимости от ответа на него системный подход либо реализуется в качестве действительно плодотворной познавательной концепции, либо остается пустым звуком. «В каждой экспериментальной науке, — замечает И. Клир, — исследуются именно системы, а не объекты. Дело в том, что если каждую

систему можно точно задать... а относящиеся к ней проблемы можно точно сформулировать, то этого нельзя сказать про объект. Понятие «объект» всегда является до некоторой степени туманным, а относящиеся к нему проблемы — недостаточно ясными» [45, с. 289—290]. Поэтому в геологии не только желательно, а просто необходимо, следуя примеру географии, мыслить системы «не как реальные вещи, а как удобные абстракции, облегчающие определенный способ анализа» [78, с. 432].

Итак, ингредиентами абстрактных модельных конструкций, называемых системами, служат элементы и связи, представляющие собой, как нетрудно заключить, столь же абстрактные модели соответственно составных частей объектов (т. е. других объектов или любых их свойств) и объективных зависимостей частей. Нерасчлененность элемента относительна и отражает нежелание или неспособность исследователя различать внутри его какие-либо части, например, представлять разрез с детальностью до свит. Однако при необходимости можно изменить «уровень разрешения» [45], назначив элементами стратиграфические горизонты, что будет означать переопределение системы. Можно, наконец, переопределить систему таким образом, чтобы она состояла из систем другого уровня, т. е. подсистем (допустим, горизонтов), а те в свою очередь — из «неделимых» элементов, например литологических разностей. В этом случае тот же объект (разрез) будет представлен простейшей иерархической системой. Определение системы диктуется познавательной задачей, целью исследователя и его возможностями.

Таким образом, в отличие от модели система — это, во-первых, формализованная, четко определяемая, сознательно создаваемая познавательная конструкция, во-вторых, конструкция априори изоморфная любым, в том числе природным, объектам (рассматриваемым как целое, состоящее из взаимосвязанных частей), т. е. универсальная.

В нашем изложении нет необходимости приводить многочисленные математически строгие определения системы [40, 45, 60, 64]. Важно лишь подчеркнуть, что понятие системы родственно понятию множества* и при использовании соответствующего языка является столь же строгим и гибким, но гораздо более конструктивным, эвристичным, ибо «система определяется как математическая структура с несравненно более богатыми свойствами, чем структуры теории множеств» [40, с. 79].

* Создатель теории множеств Г. Кантор определил множество как «объединение в одно целое объектов, хорошо различаемых нашей интуицией или нашей мыслью». Многоликий Н. Бурбаки полагал, что «множество образуется из элементов, обладающих некоторыми свойствами и находящихся в некоторых отношениях между собой или с элементами других множеств» [74, с. 9—10]. На «глубокое родство между аксиоматическими подходами к изучению множеств и системным подходом к изучению больших систем» указывал также А. А. Ляпунов [58, с. 16].

Целесообразно, по-видимому, системы, конструируемые в геологии, именовать геологическими. Не должны вводить в заблуждение сплошь и рядом употребляемые термины «реальная», «реально существующая», «материальная», «природная», «конкретная», «абстрактная» системы, «системный объект» и т. п. Из контекста практически всегда ясно, предназначаются ли подобные эпитеты для указания на объект и особенности его рассмотрения, употребляются ли они как термины свободного пользования, являются ли результатом методологической безграмотности автора.

Системе противопоставляется ее окружение (среда), либо учитываемое исследователем в той или иной мере (в зависимости от задачи), либо игнорируемое им. Соответственно говорят об открытых и закрытых (изолированных, замкнутых) системах. Различают также частично изолированные, или относительно обособленные, системы, связи которых со средой немногочисленны и определены.

Таким образом, система и среда — понятия относительные [2], так же как и понятия замкнутой и открытой систем, поскольку они «определяются относительно тех операций, которые допускаются или принимаются во внимание» [43, с. 117]. Действительно, при переносе внимания исследователя среда и система меняются местами: ведь нас могут интересовать как эндоконтактные изменения интрузии под влиянием вмещающих пород, так и экзоконтактные превращения вмещающих пород под влиянием внедрившегося расплава. Иными словами, среда — это комплекс принимаемых исследователем во внимание условий, влияющих на поведение данной системы; этот комплекс и сам является системой.

Игнорирование или, напротив, учет исследователем изменений изучаемого объекта в рамках задачи приводит соответственно к статическим или динамическим (а среди геологических к геостатическим или геодинамическим) системам. Противопоставление названных типов систем правомерно и удобно практически, если не упускать из виду, что статическая система — вырожденный случай динамической, ее некоторое состояние, так сказать, мгновенный снимок. Упорядоченное во времени множество состояний динамической системы называют ее поведением, и, что принципиально важно для системных построений в геологии, — в принципе безразлично, отделены ли соседние состояния микросекундами или миллиардами лет, т. е. выглядят ли изучаемые изменения процессами в обычном житейском смысле [9].

В связи с этим мы не можем разделить на первый взгляд безупречно логичную и ставшую уже привычной точку зрения, согласно которой сфера использования геодинамических систем ограничена лишь современными геологическими процессами [48, 49, 51, 52]. Несоизмеримость по длительности истории человечества и истории Земли, определяющая принципиальную

невозможность даже для коллективного геолога быть современником, допустим, палеозойских процессов, и неизбежная гипотетичность геологических систем, моделирующих эти процессы, отнюдь не означают, что эти системы, т. е. познавательные конструкции, теряют право быть динамическими, как это иногда считают [49]. Этот вопрос имеет принципиальное значение: ответ на него определяет либо применимость, либо непригодность методов кибернетики для изучения явлений геологического прошлого.

При выборе исследовательских средств и языка для описания динамических систем весьма важно их разделение на детерминированные и вероятностные — по степени достижимой определенности предвидения исследователем их поведения в заданных условиях [9]. Для вероятностных систем в отличие от детерминированных предсказанное состояние наступает с вероятностью, меньшей единицы. В геологии, не избалованной детерминистскими предсказаниями и оперирующей, как правило, не законами, а лишь приблизительными закономерностями, всегда с готовностью встречались объяснения этого обстоятельства не зависящей от нас объективной вероятностностью самих по себе геологических явлений, их якобы чисто объективной спецификой. Это положение даже привлекалось в качестве теоретического обоснования исключительной роли в геологии именно стохастических методов [21]. Пагубность подобной позиции, как нетрудно понять, заключается в утверждении принципиальной невозможности открыть в геологии невероятностные законы.

Ошибочность этого утверждения определяется наивной верой в абсолютную объективность того, что мы называем геологическими явлениями и объектами; непониманием, что «некоторые вопросы, которые мы ставим, изучая явления и проблемы природы, можно классифицировать как физические, химические, биологические и т. д., но этого отнюдь нельзя делать с явлениями как таковыми» [1, с. 70].

Важно осознать, что детерминированными и вероятностными являются именно системы, которые, как мы знаем, в принципе можно переопределять; иногда это очень трудно, но необходимо. Так, всегда объективно вероятностным считался процесс формирования алтайских полиметаллических месторождений, однако А. Н. Кену удалось смоделировать его практически детерминированной системой [41]. Разумеется, «вероятностный» не означает «второсортный» и далеко не все научные задачи требуют непременно детерминистских построений. И тем не менее во многих случаях вероятностное представление — лишь разведка, первое соприкосновение науки с непознанным. При необходимости рано или поздно тем или иным путем оно заменяется более глубоким, детерминистским, представлением.

Крайне важна такая отличительная черта систем, как целостность, уживающаяся с их составленностью из элементов и связей. Целостность систем проявляется в наличии у них так называе-

мых эмерджентных свойств, которые «...не могут быть предсказаны на основе знания (реально достижимого. — Р. Ж.) частей и способа их соединения» [85, с. 159]. В этом смысле иногда говорят, что система оказывается больше суммы своих элементов. Эта особенность системных моделей делает их незаменимыми в науках содержательных, таких как геология или биология, которые в отличие от физики или химии изучают реальность многоаспектно и целостно. По этой причине в содержательных науках лишены перспектив традиционные простые (аддитивные) модельные конструкции [34, 36]. Такими конструкциями являются многие используемые в геологии математические модели, вызывающие совершенно резонную (несправедливо отвергаемую некоторыми «математизаторами») критику.

Так, немало едких слов было сказано В. А. Соловьевым [71] по поводу одного явно им не понятого замечания В. В. Белоусова, который подчеркивал, что представители точных наук «...так жестко схематизируют природные процессы, что геолог категорически отказывается видеть в этой схеме действительное геологическое явление. Математику оказывается недоступной сложность природного явления и внутренняя его неразделимость; он упускает из вида, что при всякой попытке расчлнить такое явление теряется нечто весьма существенное и искажается природа всего явления» [7, с. 17].

Антисистемный, анатомический, омертвляющий целостность метод анализа, против которого, по существу, направлено приведенное высказывание и который известен в кибернетике под названием «губительного *divisio*» [9], определяет и соответствующий аддитивный способ объединения частей в псевдоцелостность («*compositio*», по Ст. Бирю). Этот весьма существенный недостаток методологического плана обнаруживается практически во всех науках, не исключая и математику*. Отсюда понятна особая ценность для геологии системного мировоззрения, «...которое считает «целое» отправной точкой исследования» [64, с. 87] и располагает модельными конструкциями, сочетающими доступность формализованной инвариантной схемы с целостностью (конечно, лишь в некоторых заданных отношениях) природных явлений, объектов.

Парадоксальная, казалось бы, способность систем сохранять эмерджентность ряда свойств целого объясняется особой ролью связей между элементами. Осознание первостепенной важности взаимодействия частей в конструировании целого и отличает системный подход от традиционного стихийно-модельного способа исследования. Эта особенность в конечном итоге определяет познавательную «мощь» и успехи системной методологии

* Критикуя «ошибки *divisio*», Ст. Бир отмечает, что «некоторые виды математических рассуждений... можно было бы подвергнуть той же критике» [9, с. 298].

в конкретных науках, причем тем в большей степени, чем сложнее предмет данной науки, чем она содержательнее. «Осмыслить сущность системы можно только тогда, — подчеркивает Ст. Бир, — когда связи между элементами, динамические взаимодействия всей системы становятся объектом исследования» [9, с. 22].

По степени и характеру связанности элементов целесообразно различать три класса систем.

Первый характеризует простейшая, аддитивная, вырожденная система, или «несистема» в строгом смысле: она состоит из одних элементов и может быть изображена нуль-графом. Ее иллюстрирует, например, множество несоприкасающихся минеральных зерен, отвечающих по составу аркозу, но не образующих из-за несвязности даже системы «песок». Однако, как будет показано ниже, аддитивной системе отвечает такое важное в системном подходе понятие, как полная груша, чем и объясняется внимание к этим примитивным бесструктурным конструкциям.

Следующий класс образуют квазицелостные системы, отличительной особенностью которых является отсутствие обратных связей между элементами. Изображением таких систем могут служить графы с одинарными ребрами. Квазицелостными являются все статические системы и некоторые динамические. К статическим квазицелостным системам можно отнести стратиграфический разрез, структуры пород, месторождений и т. д.

Класс целостных систем составляют динамические системы с обратными связями между элементами, т. е. системы, в которых элементы взаимодействуют*. Их графическим образом служат полные графы с двойными разноориентированными ребрами.

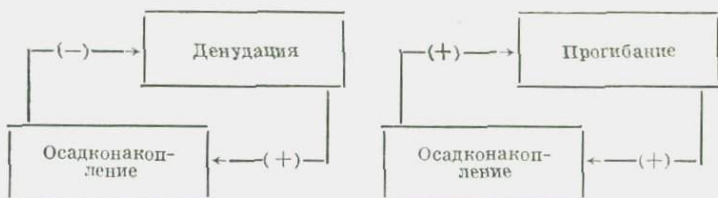
Элементы A и B соединены прямой и обратной связями, т. е. взаимодействуют, если переход элемента A из состояния a_{i-1} в a_i является хотя бы частичной причиной смены состояний элемента B с b_{j-1} на b_j , что в свою очередь влияет на переход элемента A в состояние a_{i+1} , и т. д. по схеме

$$\dots (a_{i-1} \rightarrow a_i) \rightarrow (b_{j-1} \rightarrow b_j) \rightarrow (a_i \rightarrow a_{i+1}) \dots,$$

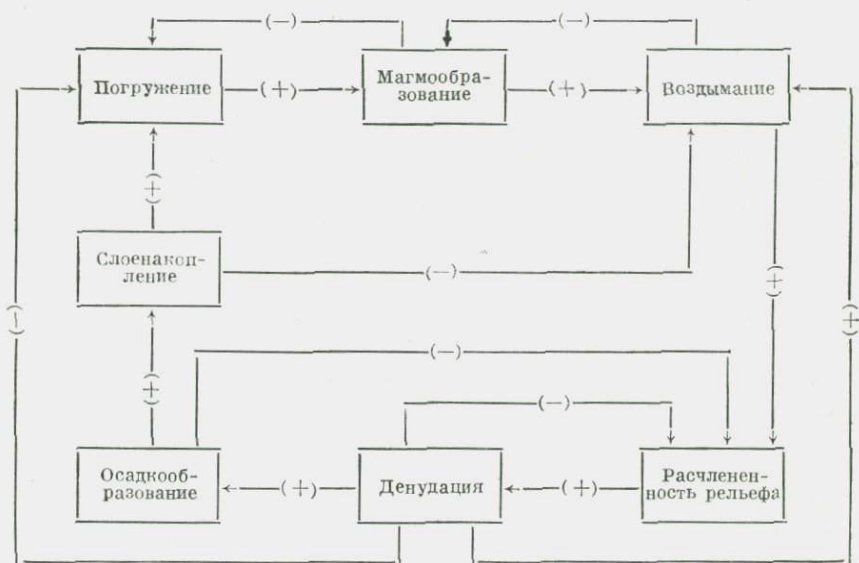
которую более компактно изображают в виде $A \rightleftarrows B$.

Стабилизирующе-нейтрализующее ответное влияние носит название отрицательной, а отклоняюще-усиливающее — положительной обратной связи. Вопрос о том, какую из связей (AB либо BA) называть прямой, а какую обратной, — не принципиален. Примеры простейших геодинамических систем с отрицательной (—) и положительной (+) обратными связями приведены на схемах.

* Речь идет именно о системах, а не о реальных процессах, ибо «... строго говоря, есть только процессы с обратной связью, с взаимодействием» [43, с. 157].



Система значительно усложняется с каждым дополнительно вводимым элементом, каковым в зависимости от цели исследования может быть любой принимаемый во внимание фактор: контрастность тектонических движений, замутненность атмосферы продуктами вулканической деятельности, интенсивность этой деятельности, глубина бассейна седиментации, его конфигурация и т. п.



Конечно, чтобы служить действенным инструментом познания, подобные модели требуют формализации условий решаемой задачи и формализованного представления элементов, что в геологии связано, как правило, с большими трудностями. Эти трудности, однако, не являются непреодолимыми, что подтверждается опытом математического моделирования на ЭВМ подобных геодинамических систем Дж. Харбухом и Г. Бонэм-Картером [77]. С этих позиций представляется в высшей степени важным следующий вывод: любое геологическое явление как процесс, интересующий нас с точки зрения его механизма, может быть представлено целостной простой или сложной геодинамической системой управления.

От целостности, насыщенности системы связями зависит ее сложность — важнейшая для исследования характеристика, интуитивно переносимая нами на объекты реальности, в частности на геологические явления. Сложность изучаемых геологией явлений справедливо усматривают в их несводимости к физическим и химическим процессам, конвергентности свойств и многоуровненности объектов исследования, ярко выраженной их индивидуализированности, затрудняющей типизацию, в постепенности перехода, препятствующей однозначному разграничению, казалось бы, совершенно разных явлений, и т. п. Системная концепция позволяет, уяснив генезис этой сложности, оценивать ее и соразмерять с ней познавательные возможности имеющихся в распоряжении исследователя методов. Число элементов и характер связей, их конкретно-научный смысл, особенности задачи — все это оказывает влияние на сложность системы, мерой которой служит разнообразие ее возможных состояний (или разновидностей).

Если, допустим, 7 литологических разновидностей пород, типичных для исследуемой территории, изучаются независимо одна от другой, то разнообразие такой аддитивной системы соответствует числу ее элементов. Однако если для исследования существенны типы разрезов, определяемые последовательностью этих же 7 разновидностей, т. е. изучается квазиделостная система, то, выбирая методы исследования, оценивая его результаты и делая какие-либо выводы относительно геологической реальности, необходимо считаться с разнообразием этой системы, равным уже 5040 (7 элементов и 6 связей порядка). Конечно, из этого числа реализуется, как правило, лишь небольшая часть типов разрезов, но определить ее и уяснить ограничение разнообразия нельзя, не ведая о полной группе возможных типов и прибегая к бытующему в геологии «методу избранных примеров».

Несоизмеримо большей сложностью характеризуются собственно целостные геодинамические системы, представляющие механизмы и генетические схемы геологических явлений. Теоретическое разнообразие целостной системы, состоящей, положим, тоже из 7 элементов и, значит, 42 связей (поскольку связь AB не тождественна связи BA) превышает 10^{12} [36]. Подобные оценки обычно не воспринимаются геологами серьезно, но именно такой подход позволяет уяснить, почему «каждое отдельное извержение вулкана, каждая складка слоев, даже каждый выход одной и той же по названию породы в себе какие-то индивидуальные черты...» [7, с. 14]. Это заставляет трезво взглянуть на очевидное несоответствие выдвигаемых задач и используемых геологией методов охвата мыслью таких чудовищных разнообразий*, а отсюда уже остается один шаг до попыток сознательной ассимиляции более строгих, главное более эффективных, методов, используемых в науках, которые, подобно геологии, изучают очень сложные системы.

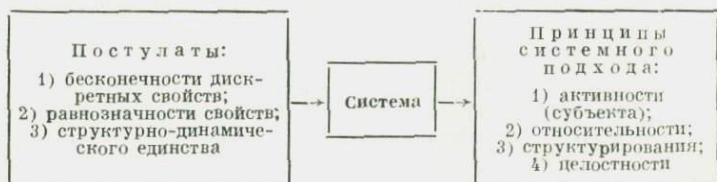
* В этом смысле совершенно справедливо, что геологические задачи «...трактовались, как правило, исходя из желаемого, без должного учета возможностей...» [23, с. 45].

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД КАК МЕТОД

Несмотря на внешнюю тавтологию, этот заголовок отражает наиболее важный для целей нашего изложения гносеологический аспект системной концепции, который лишь вскользь затрагивался при рассмотрении основных понятий системного подхода. Ибо, как справедливо замечает Д. Харвей, «пропасть различий отделяет способы изложения уже созданной теории от способов, используемых нами при ее создании» [78, с. 161]. Как и понятие системы, основанный на нем подход применим не только к явлениям и объектам природы, но и к самому процессу познания. Представляется поэтому целесообразным рассмотреть определяющие методические особенности системного подхода, а для этого сначала подытожить его принципы. Два из этих принципов — активности и относительности, — как указывалось при обсуждении мировоззренческих основ системного подхода, вытекают из основополагающей для него идеи модельности познания, но не выражают специфики системной концепции.

Как подчеркивалось выше, системы — это формализованные (а значит, сознательно создаваемые) модельные конструкции, обладающие в принципе инвариантной структурой и в некотором роде сочетающие содержательность конкретных наук с абстрактной всеобщностью математики. В соответствии с этим позволительно говорить о требовании формализованного инвариантного структурирования познаваемого объекта как о принципе системного подхода (п р и н ц и п с т р у к т у р и р о в а н и я). Важнейшей специфической особенностью системного исследования, проявляющейся и при анализе и при синтезе систем, служит требование целостности (предмета изучения, метода, результата), которое выступает в качестве определяющего, стержневого принципа системной концепции (п р и н ц и п ц е л о с т н о с т и).

Используя приведенную на с. 28 схему и заменяя понятие «модель» более конструктивным понятием «система», можно проиллюстрировать аналогичным образом взаимоотношения этого понятия с принципами системного подхода.



Первые два принципа системного подхода, вытекающие из неизбежной (и в этом смысле объективной) модельности познания, а потому свойственные даже примитивным его формам, сами по себе не содержат указаний на метод и, следовательно,

неконструктивны. Они наполняются методическим содержанием, становятся более плодотворными лишь при учете двух других, собственно системных, принципов: требований формализованного инвариантного структурирования и целостности.

Вопреки бытующему мнению исследование на системной основе вовсе не сводится лишь к представлению в виде систем подлежащих изучению объектов: ведь средства теоретического познания на всех его стадиях — от гипотезы до теории — это тоже системы, хотя и не тождественные первым*. То обстоятельство, что гипотезы и теории, трактуя предвидимые изменения познаваемых объектов, являются динамическими моделями исходных моделей, играет весьма важную, но двойственную роль. С одной стороны, при нестрогом подходе возникает реальная опасность путаницы — смещения одинаковых лишь по названию систем (например, когда гипотетическое представление о палеозойском развитии некой геосинклинали в изложении автора гипотезы претендует на роль такого же факта, как выбранная этим автором исходная модель геосинклинали — совокупность контролируемых геологических данных). С другой стороны, то обстоятельство, что гипотезы (теории), будучи и инструментом и результатом исследования, выступают и как модели его объектов, приводит к следующему принципиальному выводу: процесс конкретного исследования с теоретической стороны (т. е. за вычетом эмпирической составляющей) не содержит ничего сверх конечной последовательности процедур определения и переопределения системы, моделирующей познаваемый объект**.

МЕТОДИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ ПРИНЦИПА ФОРМАЛИЗОВАННОГО ИНВАРИАНТНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ

Из приведенных рассуждений должно быть понятно, сколь важную роль в геологическом исследовании призвана играть процедура определения исходной геологической системы, т. е. конкретного объекта исследования, отнюдь не тождественного моделируемому объекту во всей его полноте и бесконечной сложности. Следует признать весьма неудачным понятие «системный объект», подразумевающее, естественно, наличие и «несистемных объектов» [39].

«Разветвленное городское хозяйство Нью-Йорка представляется совершенно по-разному экономисту, социологу, инженеру-связисту, историку и т. д. Когда эти специалисты говорят «эта система», они в действительности имеют в виду совершенно

* Этот факт лучше, чем любые соображения, обнажает неприемлемость представления о системе как «комплексе некоторых материальных объектов».

** Этот вывод развивает известное положение о том, что «постановка проблемы и результат ее решения — это два полюса, которые воедино связывают процесс продуктивного, действительного (как в научном, так и в узко-практическом смысле) мышления» [79, с. 34].

различные вещи и, начиная спорить о свойствах этой системы, вскоре приходят к путанице» [87, с. 81]. Этот пример можно отнести и к теоретической геологии, особенно к геотектонике, где за массой быстро плодящихся терминов, призванных, в частности, обозначать специфические объекты исследований, нередко скрываются весьма громоздкие и эклектичные понятийные конструкции.

Порождаемая ими путаница в рассуждениях, к сожалению, ставшая в геологии едва ли не нормой, априорно обесценивает большинство теоретических выводов. Что, например, привнесет в геотектонику такой объект исследований, как «новая разновидность эпикратонных геосинклиналей», если из 11 (!) признаков, приводимых ее автором в качестве характерных для тектонотипа, этой разновидности отвечает лишь один — заложенность на кратоне [3]? Речь идет, конечно, не о праве ученого выделять новые объекты исследований или их разновидности, а о ложной, методически не обеспеченной многоаспектности выделения — причине неизбежной путаницы. Поэтому следующее утверждение полностью справедливо и для геологии: «При современных возможностях науки ученый-физиолог не в состоянии взять в качестве объекта исследования мозг во всей его сложности — от атомов, которыми занимается кристаллограф, до комплексов, которые изучает психоаналитик. Он должен наметить для изучения лишь какую-то небольшую часть мозга либо какой-то аспект его деятельности. Определение «системы» поэтому заключается, по существу, в выделении некоторой части из целого» [87, с. 81].

Конструирование исходной системы или, что то же самое, выделение объекта исследования в принципе является строгой формой научной идеализации, достигаемой методом упрощения [90]. Сущность его заключается в сознательном замещении неконтролируемого сложного бесконечномерного объекта реальности (тела, явления, процесса) гомоморфизмом — системой, которая, будучи адекватной в выбранном отношении моделируемому объекту, обладает в отличие от него контролируемой сложностью и допускает оперирование с привлечением аппарата теории множеств. Этим и объясняется квалификация систем И. Б. Новяком как «объектов-заместителей», или «квазиобъектов» [62].

Следующее высказывание У. Р. Эшби может служить практическим руководством по применению рассматриваемого метода. «С точки зрения формальной тот, кто хочет определять конкретную машину (например, пишущую машинку, солнечную систему, комара), должен начинать с указания множества ее состояний. Определить это множество означает не что иное, как сделать недвусмысленным то, о чем идет речь. «Чувствительность комара к ДДТ», очевидно, относится к взрослому насекомому, но относится ли она к личинке и яйцу? «Комар» включает в себя много форм — старых и молодых, самцов и самок, голодных и сытых, летающих и сидящих, безвредных и малярных, — поэтому, прежде чем приступить к исследованию, мы должны

точно указать множество состояний комара, подлежащих рассмотрению. Здесь «комар» есть множество, его различные состояния — элементы. Эти состояния дают нам базисное множество, на которое опираются все понятия Бурбаки... Состояния можно определять количественно, как астрономия определяет состояние планетной системы с помощью координат и моментов, или посредством произвольных наименований, как метеоролог обозначает типы облаков» [90, с. 428].

Ввиду методической направленности изложения важно подчеркнуть в связи с этим высказыванием следующие обстоятельства.

1. Любой «геологический комар», т. е. геологический объект именно как объект исследования (слой, геосинклиналь или формация) есть объект-заместитель, научная и д е а л и з а ц и я, т. е. нечто создаваемое исследователем и никогда не существовавшее в природе. «Многие разделы теоретической физики рассматривают объекты, которые не существуют и никогда не существовали: частицы, имеющие массу, но не имеющие объема, шкивы без трения, пружины без массы и т. п. Однако из того обстоятельства, что такие объекты не существуют, еще не следует, что математическая физика — пустая фантазия» [89, с. 129].

Бытующие в геологии представления о «естественности» геологических объектов [33, 37], тождественности понятий «реальный объект» и «объект исследования» и допустимости идеализации якобы лишь в сфере «точных наук» абсолютно беспочвенны. «И в естественных и в общественных науках, — замечает Д. Харвей, — легко обнаружить несметное множество идеализированных понятий. Фактически без них невозможно никакое объяснение» [78, с. 88]. Действительно, даже если изучению подлежит природный объект «ледниковый валун», то объектом исследования, или предметом [73], фигурирующим в науке, выступает лишь небольшая в пространстве свойств часть валуна, некая идеализация, модель, принципиально такая же, как пружина без массы и без множества других свойств и характеристик.

«Нужно изучать н а и п р о с т е й ш у ю систему, которая, по вашему мнению, имеет интересующие вас свойства... Многие из недавних триумфов в молекулярной биологии были достигнуты фактически благодаря использованию «сверхупрощенных модельных систем...» [63, с. 74]. О неизбежности и важности научной идеализации в теоретическом познании, особенно в связи с тенденцией математизации, имеется огромная литература, в том числе специальная [26, 28]. Применительно к геологии обсуждаемую мысль удачно резюмировал Л. И. Четвериков: «Математический моделируется не сам объект, а его геологическая модель» [81, с. 164].

2. Именно схематизированность модели, отвлеченность от индивидуальностей единичных объектов расширяет множество ее прообразов, благодаря чему идеализация оказывается эвристически более плодотворной, чем любая «всеобъемлющая» модель с чертами единичного, конкретного объекта.

Сказанное, однако, справедливо лишь при условии достаточной строгости определения идеализаций. Ибо только при этом условии «мы точно знаем, что имеем в виду, когда говорим «кристалл». Когда мы определяем кристалл как нечто обладающее определенными свойствами симметрии, то, по сути дела, утверждаем, что кристалл должен иметь некоторые другие свойства симметрии, что последние необходимо вытекают из первых, иначе говоря, что они суть те же свойства, но рассматриваемые с другой точки зрения» [89, с. 128]. В уже цитированной работе [90] У. Р. Эшби прямо связывает строгость упрощения с эвристическими возможностями этого метода.

Поскольку «строго определить» и «формализовать» — понятия тождественные и поскольку система строится на основе единого структурного инварианта, постольку очевидно, что метод упрощения есть не что иное, как конструктивное выражение важнейшего принципа системного подхода — требования формализованного инвариантного структурирования.

3. Выделение (определение) системы как квазиобъекта представляет собой первейшую и неизбежную, сложную и неалгоритмизованную процедуру, что является проблемой даже в тех случаях, когда реальный объект физически автономен и, казалось бы, очевидны его «естественные» (например, пространственные) границы. Тектологически идентичная проблема выделения «геологического комара» практически оказывается несоизмеримо более сложной, ибо объекты неживой природы менее автономны (их актуальные связи с окружением более тесны и многоаспектны), чем живые организмы. «Безответность» неживых объектов и масштабы многих из них сводят почти на нет возможности прямых экспериментов и настолько затрудняют контроль над правомочностью выделения тех или иных геосистем, что геологию буквально захлестывает поток фактически неопределенных объектов исследования.

Нелегким оказывается становление и достаточно строгих (по геологическим меркам) абстракций, ибо границы их применимости для объяснения познаваемых природных процессов, за редкими исключениями, расплывчаты. Показательна в этом отношении более чем десятилетняя дискуссия [59, 69] по вопросу о реальности (!) и эвристических возможностях в теории минераобразования «вполне подвижных» и «инертных» компонент — идеализаций, введенных в науку акад. Д. С. Коржинским.

После замечаний, оттенявших субъективную составляющую систем и их относительность, нельзя не рассмотреть вопрос о том, что определяет формирование исследовательской точки зрения на реальные объекты при построении познавательных конструкций, в частности объектов исследования. Понятно, что ссылка на существенность избираемых признаков не является ответом, так как трансформирует тот же вопрос в иную форму: что формирует критерии существенности? В принципе ответом может

служить одно слово: цель. Однако это понятие требует пояснений, во-первых, из-за расплывчатости бытового его понимания и, во-вторых, из-за недостаточной разработанности теории целей даже в общей теории систем и кибернетике.

«С точки же зрения кибернетики под целью в самом широком смысле понимается то состояние, к которому объективно приходит система в результате своего движения» [67, с. 85], т. е. одно из объективно реализуемых при определенных условиях ее состояний. Поскольку кибернетика далека от приписывания абстрактным системам сознательного целеполагания, выбор этого состояния (или определяющих его условий), конечно же, остается за исследователем.

Впрочем, специфически кибернетическим такое представление о цели считать не совсем оправданно, поскольку еще К. Маркс указывал, что будущий результат трудового процесса имеется в представлении человека, т. е. идеален уже в начале этого процесса.

Таким образом, цель — это нереализованная, зачастую мысленная, более или менее определенная модель желательного состояния некой системы. Привлекая аналогии, научную цель можно уподобить проекту (эскизному или рабочему) познавательной системной конструкции.

Критика подобного тезиса обычно сосредоточивается именно на целях науки, усматривая в таком их понимании порочный круг: чтобы нечто познать, необходимо это нечто знать заранее. Убедительный на первый взгляд этот довод основан на наивном представлении о научной проблеме как о практически полном незнании, т. е. на игнорировании того решающего факта, что «незнание может проявиться только как осознание неполноты з н а н и я» [79, с. 35]. В справедливости последнего утверждения нетрудно убедиться, пристрастно проанализировав геологические проблемы, как уже решенные, так и актуальные сегодня. К тому же выводу можно прийти и другим путем — осознав тектологическое подобие понятий «научная цель» и «гипотеза», которые предопределяют результаты исследования, а не сопутствуют ему. В целом же предопределение результата исследования, если не забывать о гипотетичности априорного знания, столь же необходимо для продуктивного исследования, как формулирование теоремы для ее доказательства.

Таким образом, кажущийся замкнутый круг «знать, чтобы познать» фактически разомкнут: во-первых, в любой немнимо научной проблеме доля действительно неизвестного несоизмеримо меньше доли познанного; во-вторых, в подавляющем большинстве случаев цель как априорная модель будущего результата по своей структуре примитивнее, грубее последнего (не изоморфна, а лишь гомоморфна ему); в-третьих, даже в случаях практического изоморфизма априорная модель в отличие от результата гипотетична.

Что же касается источника ограничений, накладываемых исследователем на познаваемую реальность и определяющих его субъективную точку зрения, то им является не сама познаваемая реальность (согласно принятым постулатам), а общественная практика. Хочет того исследователь или нет, признает или отрицает этот факт, но в своей деятельности он исходит из потребностей общественной практики и соотнобразует ее с ее возможностями. Потребности практики в общем случае, конечно, не следует отождествлять с прямым заказом экономики*. Отражаясь, преломляясь и трансформируясь в разнообразных сферах деятельности, эти потребности проявляются в научных умонастроениях, направлениях, подходах, предпочтениях, заблуждениях и науки в целом, и отдельных коллективов, и личностей. Правомерность этого утверждения, и не только для техники и узко прикладных наук, подтверждается, в частности, авторитетным свидетельством А. А. Ляпунова: «Если аксиоматический метод является стилем современной математики, то потребности практики (понятные в самом широком смысле, включая сюда также и потребности смежных наук) являются ее фундаментом» [57, с. 115].

Столь же широкое понимание подразумевают, говоря о возможностях, определяемых не только мировым или национальным уровнем науки и техники, но и методической, технической и прочей вооруженностью конкретного исследователя, его квалификацией, индивидуальными особенностями органов чувств и мышления. Ярким примером стимулирующей роли возможностей, вызвавших буквально всестороннюю переориентацию всей науки, включая геологию, служит бурное развитие электронно-вычислительной техники.

Мерой конструктивности цели может быть разнообразие систем, удовлетворяющих целевым ограничениям. Идеально конструктивная цель, предопределяющая одну единственную систему, в естествознании недостижима. Поэтому, говоря о конструктивной цели, подразумевают лишь некоторое приближение к идеалу. Чем обширнее список ограничений, накладываемых исследователем на познаваемую реальность, тем конструктивнее цель, определеннее объект исследования, способы его рассмотрения и конечный результат.

Разумеется, степень осознанности налагаемых ограничений самым непосредственным образом влияет на логическую стройность исследования, его полноту, продуктивность и обоснованность результатов. В этой связи особой сложностью отличаются такие проблемы геологии, постановка которых осуществлялась

* Впрочем, и прямой заказ экономики играет немаловажную роль в развитии даже таких фундаментальных наук, как физика и химия. Геологию же в этом отношении пронизывает непосредственная ответственность за состояние минерально-сырьевой базы и сохранность природной среды.

не отдельными учеными или коллективами, а всей отраслью знания, причем стихийно и длительно, нередко в течение нескольких десятилетий. Обрастая противоречивыми уточнениями, такие проблемы с течением времени становились не менее, а более неопределенными по своей постановке, примером чего может служить проблема выделения геологических формаций.

С одной стороны, упорство, с каким штурмуется вот уже 100 лет эта общегеологическая проблема, неоспоримо свидетельствует о наличии объективной потребности в некоторых моделях породных ассоциаций. С другой стороны, неудовлетворительность предлагаемых вариантов решения свидетельствует, что ясности в том, какими должны быть эти насуточно необходимые геологии модели, нет, а следовательно, лобовая целепостановка невозможна. В этих условиях, по-видимому, следует, оставляя невыясненными геологические требования к формационным типам, ориентироваться при их конструировании на эталоны (флиш, молассы), т. е., опираясь в целепостановке на требования общенаучные (соответствие эталону, полнота и т. п.), подходить к решению проблемы «с тыла».

Подводя итог рассмотрению особенностей целевого абстрагирования систем, можно констатировать следующее.

1. Термин «цель» обозначает и некоторое объективно возможное состояние системы (цель системы), и проект познавательной конструкции (гипотеза), от которого зависит список ограничений, налагаемых на реальность при выделении объекта исследований.

2. Определяемая исследователем составляющая системных конструкций является субъективной лишь по отношению к познаваемой реальности, поскольку отражает другую не менее объективную реальность — общественную практику.

Итак, метод модельно-целевого упрощения, конкретизирующий принцип формализованного инвариантного структурирования, играет чрезвычайно важную роль в постановке, а тем самым и в решении научных проблем.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПРИНЦИПА ЦЕЛОСТНОСТИ

Если бы имел смысл вопрос, какой из собственно системных принципов методически более важен, то, по-видимому, следовало бы назвать принцип целостности. Заметим, однако, что даже в работах, специально посвященных системному подходу в геологии, целостность нередко трактуется как требование «всестороннего охвата объекта изучения» [39], т. е. как требование, противоречащее постулатам системного подхода, принципиально невыполнимое и методически дезориентирующее.

Из предшествующего изложения должно быть очевидно, что требование целостности родилось в результате осознания методического примитивизма «губительного *divisio*» (и соответствующего ему *compositio*) при более глубоком изучении явлений,

чем это имело место в прошлом столетии. «Разделяй на части и изучай их в отдельности» — этим правилом настолько широко пользовались, что появилась угроза превращения его в догму; более того, это правило часто рассматривали как оселок, на котором оттачивался подлинно научный подход» [89, с. 127]. Это правило и по сей день служит законом в геологии, хотя уверенность геологов в его непреложности сильно пошатнулась за последнее десятилетие.

Требование целостности обусловлено потребностью гарантированно сохранить эмерджентные свойства создаваемых модельных конструкций и обеспечить тем самым большую адекватность этих конструкций познаваемым явлениям действительности. Системная концепция располагает несколькими неальтернативными приемами, удовлетворяющими этому требованию. Один из них — широко известный метод черного ящика.

Другой научный прием, именуемый нами методом полной группы, формально не является изобретением системного подхода, поскольку «...широко применялся в прошлом и доказал свою ценность во многих прочно сложившихся науках» [89, с. 128], например в кристаллографии. Однако осознание его как важнейшего методического инварианта произошло в рамках именно теории систем, и эта заслуга принадлежит У. Р. Эшби. Метод полной группы, определяемый как «метод исследования всех возможных систем независимо от того, существуют ли они в реальном мире», заключается в том, что «вместо того чтобы исследовать сначала одну систему, затем вторую, третью и т. д., следуют противоположному принципу — рассматривают множество «всех мыслимых систем» и потом сокращают это множество до более рациональных пределов» [Там же]. Классическим примером служат 230 пространственных групп симметрии Е. С. Федорова, образующих «...своего рода основу или структуру, более емкую и богатую, чем эмпирический материал, и на этой основе реальные кристаллы могут быть естественным образом упорядочены и сопоставлены друг с другом» [89, с. 129].

Традиционный скепсис геологов по отношению к методу полной группы основан на недоумении: зачем создавать абстрактную и, как правило, избыточно широкую классификацию «сверху», если имеется привычный путь «снизу» — систематизация конкретных естественных тел. Так, по-видимому, и следует поступать в тех случаях, когда все подлежащие классифицированию объекты априори известны и определены; когда вопрос о том, «что такое комар», уже решен, или когда имеется возможность соотнести данные объекты с другой, более общей, классификацией, — одним словом, в исключительных для геологии случаях.

Однако сторонники систематизации «естественных геологических тел» (т. е. ученые антисистемного склада, в принципе игнорирующие процедуру выделения объектов исследования как проблему) неполноту классификации не считают, по-видимому,

недостатком, усматривая в ней чуть ли не стимул научных открытий: «Индивидуальное тело (кристалл, минерал, животное, растение) относят к одному из известных видов, или же, если это не удается, выделяют новый вид и тогда говорят о его открытии» [32, с. 6]. Но, как справедливо указывал В. В. Белоусов, «где проходит грань между непринципиальными, случайными отклонениями и уже новым видом явлений? На этот вопрос не существует определенного ответа, и эта трудность в том объеме, как она существует в геологии, едва ли известна какой-либо экспериментальной и точной науке» [7, с. 15]. Поэтому реализуемый в условиях геологии путь «снизу» объясняет не исключительность, а, напротив, типичность «открытий», вызывающих ничем не оправданный лавинообразный рост понятий*.

Из-за отсутствия однозначной расчлененности природы на объекты исследователь, приступая к изучению поначалу туманно очерченного круга явлений, неминуемо сталкивается с неопределенностью, с тем, что У. Р. Эшби называет «пространством возможностей». «Главная черта пространства возможностей состоит в том, что оно содержит больше, чем существует в реальном физическом мире... Реальный мир образует подмножество, заключающее то, что существует, тогда как пространство возможностей представляет неопределенность, с которой сталкивается наблюдатель» [88, с. 317].

Метод полной группы, своего рода индикатор логической строгости исследования, одинаково применим для обзора как моделей материальных объектов, так и аспектов проблем. Например, по А. М. Боровикову [13], полную группу парных поперечных сочленений тектонических элементов (однопорядковых и линейных в данном сечении), рассматриваемых с точки зрения их взаимного расположения, ограничивают три типа: Г-, Т- и Х-образные (или крестообразные). В другой работе того же автора [12] анализируется полная группа аспектов рассмотрения проблемы математизации геологии. Согласно принятым в этой работе ограничениям (два понимания математики и два — геологии) соответствующее пространство возможностей характеризует полная группа из четырех вариантов отношения к проблеме математизации геологии. Если бы автор считал целесообразным не бинарное представление «пониманий», а какое-либо иное, то соответственно изменилась бы и полная группа вариантов.

* Например, в тектонике, по данным А. М. Боровикова [11], период удвоения числа понятий составляет менее 8 лет. «Протест на чрезмерное разномножение названий был заявлен много раз, но ученые, пристрастные к дроблению групп, всегда отвечали на него гордым молчанием, — иронизировал Н. А. Головкинский, — они, кажется, смотрят на такой протест, как на жалобу некоторым образом школьную, недостойную науки, преследующей серьезную цель — естественную классификацию. Но... естественная классификация, понимаемая таким образом, не приводит к цели, а уводит от нее» [27, с. 352].

Таким образом, пространство возможностей, их полная группа характеризуют разнообразие соответствующих познавательных конструкций и тем самым служат мерой их сложности, которая, как было показано выше, не является абсолютно объективной характеристикой и зависит от цели, условий и способов исследования. Поэтому имеется принципиальная возможность сознательно регулировать и сложность познаваемых систем, и характеристики познавательных процедур.

Обязательность такого регулирования вытекает из закона необходимого разнообразия* У. Р. Эшби [85]. В своей гносеологической модификации закон утверждает, что теоретическое средство (классификация, теория, метод, теоретическая конструкция) должно обладать разнообразием, не уступающим разнообразию познаваемой системы. Это не означает, конечно, что требуемое соответствие разнообразий познаваемой и познающей систем должно устанавливаться непременно за счет ограничения последней. Напротив, отсутствие «хорошей» теории, объясняющей полную группу состояний выделенной системы; удовлетворительной генетической классификации, систематизирующей предвидимое морфологическое разнообразие; программы, позволяющей переложить трудоемкий перебор вариантов на плечи ЭВМ, — все это заставляет упрощать (огрублять, генерализовать) именно познаваемые конструкции путем уменьшения числа принимаемых во внимание признаков.

Разумеется, трудности выделения геосистем, формализации объектов исследования и средств изучения снижают эффективность применения в геологии и метода полной группы, и закона необходимого разнообразия по сравнению, скажем, с их результативностью в теориях связи или управления. Однако скептическое отношение геологов к методу полной группы и тем более к закону необходимого разнообразия имеет иные корни: это — непонимание генезиса сложности систем и недооценка ее следствий.

Рассмотрим для примера логику выделения уже упоминавшейся «новой разновидности эпикратонных геосинклиналей». Помимо основного, так сказать, родового признака — заложности на кратоне — автор разновидности принимает во внимание и четко фиксирует минимум 11 видовых характеристик тектонотипа, таких, например, как «отсутствие типичных эвгеосинклинальных образований», «отсутствие длительных перерывов и несогласий», «одноактность замыкания всей геосинклинальной системы» и т. п. [3, с. 122]. В несколько ином порядке, но столь же четко перечисляются реализации признаков вновь выделяемой разновидности, в их числе «длительный и асинхронный процесс замыкания», «присутствие типичных эвгеосинклинальных магматических образований» и «наличие внутриформационных перерывов и несогласий разных масштабов» [Там же, с. 123—124].

* Этот закон основывается на 10-й теореме К. Шеннона, утверждающей, что с помощью канала коррекции, характеризуемого пропускной способностью H , количество устранимой неопределенности не может быть большим H .

Нетрудно заметить, что в данном случае принимается во внимание минимальное число реализаций каждого признака, а именно две: наличие — отсутствие, одноактное — длительное асинхронное и т. д. При такой редкой в геологии четкости задания признаков легко убедиться, что выделяемая разновидность — наименее близкая тектонотипу из полной группы, состоящей из $2^{11} = 2048$ разновидностей. Эта полная группа есть теоретическая классификация, которая автоматически вводится в науку вместе с новой разновидностью, представляя ее методический вклад. Конечно, учесть все эти соображения имело бы смысл до выделения разновидности, отягощенной столь громоздкой и информационно «жидкой» классификацией. Тогда, учитывая взаимозависимость видовых признаков, можно было бы свести их к трем-пяти другим, более независимым, характеризующим геологически такую же модель, за которой, однако, стояла бы более концентрированная, информемкая и удобная классификация из 8, 16 или 32 классов.

Для сравнения приведем не требующую комментариев теоретическую классификацию моделей терригенного седиментогенеза, построенную при сознательном удовлетворении требованиям полной группы [65] (табл. 2.1).

ТАБЛИЦА 2.1

Классификация моделей терригенного седиментогенеза [65]

Значение h	$v_n = v_d$	$v_n > v_d$	$v_n < v_d$
$h = 0$	Модели межслоевых границ		
	I Закрепление фациальной обстановки	IV Нулевая седиментация в условиях частичной докомпенсации	VII Нулевая седиментация в условиях временной перекомпенсации
$h > 0$	Модели действительных («окоячательных») мощностей		
	II Положительная синхронная седиментация	V Положительная резко асинхронная седиментация	VIII Положительная синхронная седиментация
$h < 0$	Модели промежуточных мощностей		
	III Отрицательная синхронная седиментация	VI Отрицательная резко асинхронная седиментация	IX Положительная синхронная седиментация

Примечание. v_n — скорость прогибания дна бассейна седиментации; v_d — скорость денудации; h — емкость пространства возможного накопления.

Требование полноты группы как конструктивное выражение принципа целостности существенно на всех стадиях исследования, начиная с формирования представления о контурах будущей системы и осознания аддитивного априори полного множества ее элементов. Это особенно ярко проявляется при

разработке систем поиска, обработки информации и управления ввиду простоты критерия их качества: функционирует созданная система или нет. Здесь следствие неполноты группы, например элементов систем, сказывается настолько явно и быстро, что негодную конструкцию не могут спасти обычные для науки ссылки на равноправие точек зрения или на авторитет автора.

Понятно, что гарантию полноты группы (элементов, их связей, аспектов проблемы и т. д.) дает только подход «сверху», т. е. дедуктивный. При этом подходе подлежащие изучению явления, пока еще неопределенные по своим границам, связям, другим характеристикам, как бы охватываются заведомо включающей их всех какой-либо теоретической и поначалу простой (например, бинарной) классификацией. Затем классификация последовательно усложняется путем разбиения каждого класса на два или несколько подклассов по тем или иным основаниям и т. д.

Особую ценность представляют такие инвариантные основания деления, которые, будучи примененными для многократного иерархического расчленения целого «вглубь», позволяют интерпретировать классы различных уровней в терминах изучаемых типов явлений. Когда же по мере расчленения интерпретация классов некоторого уровня становится затруднительной из-за недостатка сведений о том или ином, часто новом и неожиданном типе явления, то соответствующие конкретные, формализованные вопросы выступают в качестве цели и программы необходимых эмпирических исследований, а подлежащие изучению типы явлений — в качестве объектов исследования, причем последние в силу их формализованности являются системами.

Таким образом, метод полной группы воплощает в себе такой дедуктивный теоретический подход, который не только не исключает, как это иногда утверждают, но, напротив, предполагает эмпирическое исследование и целеустремляет его. К сожалению, мы не можем привести примеров геологических исследований, представляющих собой действительную оптимизацию теоретического и эмпирического подходов на основе последовательного применения метода полной группы.

Не теряет своего значения метод полной группы и при индуктивном подходе, т. е. при обобщении данных (пусть «снизу»). Здесь роль полной группы проявляется в требовании охвата всего множества известных на какой-то момент исходных объектов, данных, фактов, хотя детальность охвата, конечно, не регламентируется, поскольку зависит от мощности этого множества, от используемых методов, а также целей, средств и других условий исследования.

Доказательством оправданности рассматриваемого требования служит его фактически определяющая роль в таком важнейшем методе геологического познания, каким является геологическая

съемка. Поэтому поистине парадоксально, что в своей теоретической ветви правомерный геологический метод обобщения уступает место сомнительному заменителю — своеобразному «методу избранных примеров». Его суть заключается в том, что закономерности, эмпирически установленные на одном или нескольких объектах, явно или неявно распространяются на все множество соответствующих объектов. Считается почему-то само собой разумеющимся, что солидное, детальное и многоаспектное изучение одного-двух месторождений или регионов во всех случаях предпочтительнее, чем знание всех однотипных объектов в некоем заданном отношении. Стоит ли, однако, доказывать, что при игнорировании хотя бы эмпирической полной группы результат научного обобщения visколько не ценнее, например, представлений дикаря о мировой архитектуре, сформированных на основе глубокого проникновения в устройство хижин его племени.

Обыденность «метода избранных примеров» подчеркивают названия научных работ, в которых всеобщность темы исследования контрастирует со словами «на примере...». В работах по геотектонике и металлогении подобным образом названа каждая 10-я статья. Так, хотя авторы работы [6] сами подчеркивают прикладное назначение своих исследований — облегчить разведку Какадур-Ханикомского свинцово-цинкового месторождения, — тем не менее придают ее названию общеметаллогеническую значимость, контрастирующую с традиционной припиской «на примере...».

Метод полной группы приобретает особое значение в постановке и решении мегапроблем геологии. Так, проблему осадочных формаций целесообразно трактовать как задачу формирования полной группы эталонных типов разрезов, которые бы отвечали полной группе типов тектонических режимов (и соответствующей схеме районирования) и представляли любые конкретные разрезы с детальностью до соответствующей литологической легенды — полной группы «разрезообразующих» и «акцессорных» типов осадочных пород. При этом критерием оправданности выделяемых формаций должно быть соответствие (в выбранной литологической легенде) некоторых из них таким эталонам формационных типов, какими являются, например, молассы и флиш. Условием необходимой всеобщности формаций может служить только полный охват стратисферы, детальность которого определится дробностью схемы тектонического районирования и литологической легенды.

Метод полной группы не является единственным выражением принципа целостности. Однако, несомненно, этот метод, с одной стороны, — самый универсальный и доступный среди системных методов, а с другой — самый необходимый и обязательный, поскольку его использование является важным условием правомерности научных выводов, эффективности теоретических построений.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Подведем итог основным методологическим инвариантам геологии (схемам, установкам, пристрастиям), т. е. элементам ее современной научной парадигмы, рассматриваемым сквозь призму постулатов и принципов системного подхода. Основное внимание при этом уделим тем вопросам и проблемам, важность которых выявлена в дискуссиях о путях и трудностях математизации геологии.

КОНЦЕПЦИЯ ЕСТЕСТВЕННОСТИ

Несомненно, одной из ключевых проблем в науках о Земле является выделение объектов исследования. Системная схема решения этой проблемы, исходящая из постулатов о бесконечности дискретных свойств реальности и объективной их равнозначности, обсуждалась выше. В соответствии с этими постулатами природу характеризует бесчисленное множество равносущественных объективных границ, определяющих бесконечное же множество возможных объектов. Это и рождает проблему выделения биологических, физических, геологических и прочих «комаров» — конструктивных объектов исследования, моделей реальности, представляющих единство объективного и субъективного.

Противоположный подход, подразумевающий постулат об однозначности предопределенной объективной составленности природы из фиксированных объектов, в том числе геологических, был назван концепцией естественных природных тел (или для краткости — концепцией естественности) и более подробно проанализирован в работе [37], развивающей идеи Д. Л. Арманда [5] и Э. А. Еганова [33]. Приписывая реальности свойство содержать объективно однозначные объекты (физические, геологические и т. д.) с объективно единственными границами, эта концепция отождествляет их с объектами исследования, соответственно полагая проблему выделения последних мнимой, а учет целей и познавательных возможностей исследователя — излишним. Таким образом, считается, что геологические объекты «...занимают столь же фундаментальное место в природе, как астрономические, физические, биологические...» [53, с. 4].

Вопрос, конечно, не в том, объективны ли оригиналы научных моделей, — в этом ни у кого нет сомнений. Вопрос в том, как строить модели, например, «по какому принципу выделять метаморфические формации — в зависимости от первичного состава или от характера метаморфических преобразований?» [75, с. 5]. Но именно вопросы «как?», «по какому принципу?» и подобные им, действительно важные для теоретической геологии, замалчиваются концепцией естественности. Эти вопросы составляют суть проблемы выделения, которую концепция

естественности фактически объявляет мнимой, ограничиваясь определениями типа «формация — природное тело, состоящее из элементов — парагенезисов минералов (преимущественно монопородных тел), находящихся в однородных структурных отношениях» [18, с. 284].

Можно сколько угодно говорить, что Земля — естественное тело, объект исключительно геологический (а не физический, экономический и т. д.) и что не в силах исследователя изменить как-либо этот объект, превращая его в «конструкции ума», однако остается фактом, что «механик, рассматривающий задачу движения Земли вокруг Солнца, может представить ее как материальную точку, обладающую массой, но не имеющую формы и размеров...» [20, с. 6], что понятие «Земля» (так же как «Урал», «мезозой Приамурья» и т. д.) в общем случае не менее различно в сознании геофизика, петролога, стратиграфа, гидрогеолога, чем понятие «город» в сознании архитектора и сантехника.

«Природа не предстает перед нами разделенной на дисциплины. Нет явлений физических, химических, биологических и т. д. Дисциплины — это способы, которыми мы изучаем явления: они обусловлены точками зрения, а не объектами наблюдений» [2, с. 12]. Мы предполагаем, что концепция естественности — единственная концептуальная схема XX в., которая оспаривает справедливость приведенного тезиса.

Критика концепции естественности в геологии имеет большую историю. Вот что, например, более 100 лет назад писал Н. А. Голловинский о роли субъективной составляющей в геологическом исследовании: «Делая первый шаг к изучению, мы уже вносим субъективный произвол во взаимные отношения предметов, и не должно забывать, что эта субъективность входит постоянным множителем во все комбинации, какие мы сделаем из нашего материала... Увлекаясь гипотезой, вносящей в природу удобный для нас систематический порядок, мы часто смотрим на нашу искусственную, условную группировку, как на истинные отношения классифицируемых предметов, как на выражение их генетической связи» [27, с. 350—351]. Аналогичным образом и А. П. Карпинский призывал к отказу от взглядов, будто «... существующая хронологическая классификация осадочных образований представляет естественную их систему»; С. Н. Никитин и Ф. Н. Чернышев справедливо подчеркивали, что эту «...классификацию можно считать только искусственным построением, предназначенным для удобства усвоения предмета, для удобства группировки фактов и данных исследования — и не более того» [76, с. 10].

И эти столь современные модельные представления Л. Л. Халфин [76] объясняет... «философской беспомощностью» (!) их авторов. Другой сторонник концепции естественности И. В. Круть настолько убежден в ее будущем, что, анализируя модельно-целевые взгляды на выделение объектов исследования в геологии

в связи с ее математизацией, не останавливается перед искажением фактов. Он пишет: «Итак, вместе с новаторскими тенденциями в современную геологию привносится вирус «антиестественности», против которого такие уже «переболевшие» науки, как биология, выработали иммунитет. Отказ от признания естественности объектов отражает гипертрофирование структурного подхода в науке» [53, с. 52]. Однако если даже считать непоказательным, что неоднократно цитированный здесь один из создателей системного подхода У. Р. Эшби является известнейшим биологом, автором «Конструкции мозга» [86], то вряд ли можно опровергнуть тот исторический факт, что системная парадигма «антиестественности» впервые заявила о себе рождением кибернетики — науки, возникшей, как известно, на почве прежде всего биологии.

Подчеркнем еще раз: никем не отрицается реальность и естественность природных тел, в том числе тех, которые мы называем геологическими. Отрицается другое: тождественность каких бы то ни было фрагментов реальности, различаемых с помощью органов чувств, приборов и анализов, тем познавательным конструкциям, которыми фактически оперируют в своей исследовательской деятельности даже самые последовательные сторонники концепции естественности.

Насколько велика пропасть между признанием естественных тел и нереализуемой на практике концепцией естественности, лучше всего свидетельствует автор понятий о естественном (природном) теле и природном явлении акад. В. И. Вернадский, указывавший, что эти исходные понятия науки лежат в основе всего естествознания. Апеллируя к этому указанию В. И. Вернадского, сторонники концепции естественности представляют его своим единомышленником. Но вот как характеризует методологическое кредо В. И. Вернадского исследователь его творчества и взглядов И. И. Мочалов: «Какие бы формы научного познания ни рассматривал ученый, их объединяет одна последовательно проводимая им центральная мысль: все они — лишь способы отражения реальности в человеческом разуме, более или менее односторонние подходы, приближения разума человека к бесконечно сложному миру — подходы, которые эту реальность неизбежно упрощают, идеализируют, рационалистически огрубляют... Отсюда чрезвычайная подвижность, изменчивость науки, которая выступает перед нами не как мертвая копия реальности, а как полное противоречий, сложное создание человеческого разума, лишь приближающееся с известной степенью точности к этой реальности» [61, с. 110—111]. В подтверждение И. И. Мочалов приводит следующее высказывание В. И. Вернадского: «Научное объяснение, математическая схема, механическая модель, значительная часть законов природы представляют логические подходы, как бы рационалистическую сетку,

которую наш разум набрасывает на сложный, эмпирически научно охарактеризованный Космос» [Там же].

Частным, но, пожалуй, наиболее ярким выражением концепции естественности служит представление об уровнях организации материи [31, 53], или «концепция уровней организации» [24]. Широко и плодотворно используемое в науке понятие об уровнях иерархической соподчиненности частей в организации, строении, функционировании, рассмотрении объектов, явлений, операций, понятий, конечно же, просто необходимо, если не забывать о том, что любая иерархия (хоть и особая — субординационная) — это не более чем «рационалистическая сетка».

Но именно об этом и «забывает» концепция естественности, которая канонизирует одну из «естественных» иерархических сеток (свою у каждого автора), настаивая на ее объективной единственности. Так, по И. В. Крутку, «к главным уровням организации естественных объектов, устанавливаемых в результате эмпирических обобщений, предварительно относятся субатомный, атомный, геологический, биологический, а также планетный и т. д. Каждый из уровней организации является многоступенчатым. Так, геологический уровень составляют уровни организации второго порядка — минеральный, горных пород, геологических формаций, геотектонических и стратиграфических подсистем геосфер» [53, с. 58]. Согласно другому варианту перечисляются уже другие «естественные тела»: химические элементы, минералы, парагенезисы (горные породы. — *Р. Ж.*), парагенерации, формации, категории, оболочки [18], причем в качестве элементов должны выступать, в частности, «для парагенераций — горные породы, но не минералы, а для формаций — парагенерации, но не горные породы» [17, с. 25], хотя двое из трех авторов этого правила в другом «творческом парагенезисе» определяли формацию как природное тело, состоящее именно из пород.

Противоестественно требовать, чтобы литокластические туфы, брекчии, конгломераты и многие другие породы мыслились состоящими исключительно из минералов и ни в коем случае не из пород. И совсем фантастично утверждение, что «каждый более высокий уровень организации возникал позже более низших уровней, что приводило к прогрессирующему усложнению близ поверхности Земли» [18, с. 288], ибо нельзя допустить, что и минералы, и породы, и все прочие «естественные тела» возникли в космическом пространстве раньше образования планеты, признаваемой наиболее высоким уровнем организации.

Подобные «открытия» — яркие примеры того, какими поистине противоестественными могут оказаться выводы концепций, провозглашающих своим девизом абсолютно объективную естественность*. Абсолютизируя на словах объективную составля-

* Необходимо подчеркнуть, что столь категоричная оценка адресована исключительно методологическим рекомендациям рассматриваемой концеп-

ющую научных моделей и на словах же игнорируя исследовательскую, субъективную, их составляющую, эти концепции оказываются, с одной стороны, непозволительно произвольными в своих рекомендациях, а с другой — в целом совершенно беспомощными во всем, что составляет собственно геологическое исследование, т. е. в конструировании моделей действительности и оперировании ими.

МОДЕЛЬНЫЙ РЕГИСТРАЦИОНИЗМ

Этим термином в нашем изложении обозначена концептуальная схема, получившая распространение в геологии благодаря работам главным образом Ю. А. Косыгина [48—52]; эта схема в зависимости от угла зрения принимает формы статизма, структуризма и косвенно агнетизма. Очевидная условность этих «измов», используемых лишь для краткости, не лишает, однако, смысла обозначаемые ими методологические ограничения, рекомендации и установки. Эти установки тем более ответственны, что они определяют, по мысли их авторов, основные типы теоретико-геологических задач; и тем менее уязвимы для критики, что они, во-первых, основываются на очевидно важном для большинства исследователей отношении к параметру «время», а, во-вторых, принадлежат ученым, чей вклад в совершенствование геологии, превращение ее в действительно строгую теоретическую дисциплину переоценить невозможно.

По этой причине, прежде чем перейти к обсуждению названной концептуальной схемы, мы считаем необходимым подчеркнуть, что эта схема сыграла и продолжает играть роль мощного стимула к обсуждению ключевых методологических проблем теоретической геологии. Авторы этой концепции, несомненно, явились открывателями новой эпохи в развитии геологии — эпохи методологической строгости. Но именно эта доселе неведомая в геологии методологическая строгость создает возможность конструктивного обсуждения и критики предлагаемого

дии. Ибо в своей конкретно-геологической деятельности сторонники этой концепции вопреки ими же пропагандируемым рекомендациям откровенно используют модельные аппараты и неизбежно вносят тот самый исследовательский произвол, против которого выступают в своих методологических установках. Например, как это ни парадоксально, на первый взгляд, казалось бы, неотъемлемые от естественности «парагенерации» получают свое геологическое воплощение в результате сознательно осуществляемой типично-модельной процедуры, регламентированной алгоритмом Д. А. Родионова [32]. Известно, что границы выделяемых в разрезе таким способом осадочных пачек, даже если их именовать «парагенерациями», не являются объективно однозначными, как того требует концепция естественности, а, напротив, получают свое определение лишь в зависимости от выбираемых исследователем уровня значимости и начала отсчета. По этой причине в любом номотонном разрезе в принципе выделяется не одна-единственная «естественная» комбинация «естественных тел», а большее или меньшее множество комбинаций естественных, но разных по объему пачек.

ТАБЛИЦА 2.2

Характеристика статических, динамических и ретроспективных систем [49]

Класс	Тип	Элементы	Отношения
Системы, имеющие оригинал	Статический	Геологические тела	Пространственные
	Динамический	Геологические процессы и состояния	Пространственно-временные
Системы, не имеющие оригинала	Ретроспективный	Реконструированные геологические события и процессы	Реконструированные отношения последовательности

концепцией варианта постановки задач, а тем самым и возможность совершенствования наших представлений о методах теоретического исследования в геологии.

Уходя корнями в «Некоторые фундаментальные понятия структурной геологии» [50], и прежде всего в понятие статического геологического пространства, модельный регистрационизм позднее нашел обстоятельное выражение в сравнительной характеристике статических, динамических и ретроспективных геологических систем, а также отвечающих им трех групп геологических задач (направлений) [48, 49] или «областей геологии» [23]: статической, динамической и исторической. Рассмотрим, как характеризуют названные типы систем и отвечающие им группы геологических задач сами авторы; с этой целью табл. 2.2, занимающую из книги Ю. А. Косыгина [49], сопроводим необходимыми комментариями из других работ.

Под статической понимается система, которая «... может не меняться во времени, т. е. в процессе наблюдения за ней мы не замечаем, или наш прибор не фиксирует, изменений как свойств элементов системы, так и отношений между ними» [52, с. 10]. «В качестве статических систем рассматриваются сложные объекты, состоящие из геологических тел. Объекты эти выделяются в соответствии с принципом специализации, т. е. по определенным наборам признаков» [48, с. 23].

Соответственно «типичными примерами задач первой группы являются описание минералогического и петрографического состава, а также тектонических форм, разведка залежей полезных ископаемых, выяснение размера залежей, их формы, глубины залеганий, мощности, пространственного распределения концентраций полезных ископаемых в залежи и т. д. К задачам этой группы относятся также геологическое картирование и исследование глубинного строения Земли сейсмологическими и другими геофизическими

Связи	Принципы исследования	Время	Результаты
Атомно-молекулярные и гравитационные	Специализации	Фиксированное	Геологические и геофизические карты и разрезы. Графики с фиксированным временем. Петрографическое описание
Причинно-следственные	Физики, химии и механики	Физическое	Графики с временем в качестве одной из переменных
Реконструированные причинно-следственные	Актуализма	Логическое	Палеогеологические карты и разрезы. Карты фаций, схемы генезиса и эволюции

методами» [Там же, с. 21]. Эти и подобные им задачи сводятся к «выделению геологических границ и геологических тел», «описанию геологических границ», «описанию геологических тел» и «описанию геологических структур» [51], а потому область геологии, призванная решать эти задачи, иногда именуется описательной [23].

В качестве динамической рассматривается система, состояние которой «... может непрерывно изменяться, причем настолько быстро, что мы уже не можем различить в системе или элементов, или отношений, или ни того ни другого в дискретном виде» [52, с. 10]. К таким системам относятся «современные процессы внутри Земли и на ее поверхности» [Там же, с. 13], т. е. такие, «которые можно непосредственно наблюдать и измерять или же моделировать по экспериментальным и теоретическим данным» [49, с. 160]. Важно также учитывать следующие обстоятельства [Там же, с. 16]: «Когда речь идет о геологических экспериментах, имеется в виду возможность использования научных предположений (гипотез). Природные геологические процессы, а также процессы, протекающие в экспериментальных условиях, являются физическими, химическими или механическими процессами и исследуются методами соответствующих наук». Сказанного достаточно для того, чтобы судить о динамических задачах, сводящихся в принципе к описанию теми или иными методами геологических, в частности тектонических, процессов [51].

«Наконец, особый класс геологических систем составляют исторические, генетические и эволюционные системы, которые будем объединять под названием ретроспективных, так как исследование этих систем связано с реконструированием прошлого. Это системы, элементы которых связаны отношениями последовательности (исторические), причинно-следственными отношениями (генетические) или отношениями родства (эволюционные)* [52, с. 10]. «Ретроспективные системы занимают особое положение... они полностью выводятся из результатов исследований статических и динамиче-

* Позднее эти подтипы ретроспективных систем были названы соответственно хроностратиграфическими, генетическими и историко-геологическими [49].

ских систем и потому могут характеризоваться только на уровне конструкторов *. Короче говоря, это системы, представленные только моделями и не имеющие оригиналов. Точнее, оригиналы их находятся полностью в прошлом и не могут быть исследованы на уровне наблюдений» [49, с. 19].

К ретроспективным задачам «относятся разнообразные историко-генетические исследования», заключающиеся в отличие от статических и динамических исследований «не в измерениях или наблюдениях, а лишь в реконструкциях». Решение этих задач «весьма специфично и осуществляется методами, которые, скорее всего, можно назвать логическими», ибо «ни геологическую историю, ни процессы прошлого мы не можем непосредственно наблюдать» [Там же, с. 14, 16, 17]. Хотя многочисленные высказывания Ю. А. Косыгина не оставляют никаких сомнений в том большом значении, которое он придает ретроспективным конструктам в геологии, тем не менее лейтмотивом всех без исключения цитированных работ проходит мысль, что ретроспективные конструкции носят вспомогательный характер (в отличие от динамических и статических) и «... не могут являться самоцелью» [Там же, с. 24], что «истинность предсказывающих ретроспективных концепций является относительной» [Там же, с. 196].

Большинство положений разобранной схемы полностью или с некоторыми поправками разделяют Ю. А. Воронин и Э. А. Еганов [23]; признается необходимость расчленения геологии (из тех же соображений и по тем же основаниям) на статическую, динамическую и историческую (ретроспективную); утверждается особая роль статических задач; методы динамической геологии сводятся к методам физики, химии и механики («в физически измеримом времени»; историко-генетические построения квалифицируются как полезные, но интуитивно генерируемые выводы, относящиеся к «предмодельному уровню исследований» и основанные на учете не физического, а геологического времени.

Учитывая направленность нашего анализа и перспективу развития именно теоретической геологии, оценим правомерность, целесообразность и конструктивность изложенного представления о трех направлениях исследования в геологии, а главное истинность утверждений о том, что выделение этих направлений «...очень важно в методологическом отношении, в частности, для прогресса геологии и в приближении ее к «точным» наукам» [49, с. 15] или «...крайне важно... для общего развития теоретической геологии даже в тех случаях, когда применение математических методов не предполагается» [23, с. 15].

Для такого анализа нет иного пути, чем прибегнуть к «неэмпирическим проверкам» [16], т. е. к оценкам непротиворечивости анализируемой концептуальной схемы, во-первых, более общим и надежным, чем она сама, методологическим концепциям, во-вторых, взаимосвязанным установкам соизмеримых по рангу конкретных наук, а также к установлению внутренней непротиворечивости самой анализируемой схемы, ибо «непротиворечивость является не только логическим, но и методологическим свойством» [16, с. 302].

Первое и главное, что порождает неверие в методические возможности рассматриваемой концептуальной схемы и априори

* «Непосредственные измерения и наблюдения характеристик системы (оригинала) соответствуют уровню наблюдений, а построения, относящиеся к модели, — уровню конструкторов» [49, с. 17].

лишает ее уготованной роли в приближении геологии к точным наукам, заключается в четком и недвусмысленном провозглашении в качестве ведущей и, хотя бы того авторы схемы или нет, по существу единственной задачи геологии эмпирическое индуктивно-модельное химико-механико-физическое по методу описание Земли*. Действительно, если задачи геологии исчерпываются тремя постулируемыми группами и при этом подчеркивается вспомогательный характер историко-генетических построений, то основными неизбежно становятся задачи, сводящиеся, как мы видели, именно к описаниям (границ, тел, структур, быстротекущих процессов), результаты которых выражаются в картах, графиках и текстах (см. табл. 2.2), причем главное внимание уделяется описаниям в «фиксированном времени».

Роль неглубоких индуктивных моделей (описаний) в геологии действительно гипертрофирована непомерно, тем более в сравнении именно с точными науками. Но по этой причине под приближением геологии к точным наукам может подразумеваться все что угодно, только не обоснование методической второсортности генетических конструкций, пусть неразвитой, но все же теоретической поросли геологии. Мы далеки от намерения оправдывать недостатки теоретических конструкций в геологии и тем более мириться с этими недостатками. Вопрос о путях преодоления неконструктивности геологических гипотез, повышении их корректности и методического к. п. д. (что особенно актуально для историко-генетических гипотез) — это, несомненно, самая важная методологическая проблема геологии.

Но не это заботит регистрационизм. Напротив, в соответствии со своей основной идеей модельного описательства и в подкрепление этой идеи регистрационизм не только не ставит проблемы совершенствования геологических гипотез как направляющих средств науки, но, более того, специально обосновывает противоположное: «выводимость историко-генетических представлений из данных наблюдений» [49, с. 3]. Этот более чем странный способ приближения геологии к точным наукам можно объяснить лишь принципиальным непринятием авторами регистрационизма отнюдь не новых в точных науках утверждений о том, что «гипотезы и теории скорее выделяют опыт, нежели суммируют его, ибо они наводят на мысль о новых наблюдениях и экспериментах»; «ни одна физическая теория не появилась как результат созерцательных размышлений над поведением вещей или над опытными данными» [16, с. 22—23].

Позитивная роль тройственного представления объектов и задач исследования в геологии, по мысли его авторов, заключается в том, что «каждый тип систем характеризуется особой, свойствен-

* Именно эта фактуально очевидная особенность анализируемой концептуальной схемы оправдывает название «регистрационизм», уточненное указанием на ее модельный (а не «фотографический») характер.

пой ему природой элементов, их отношений и связей (структур), особыми принципами исследования, особыми подходами в понимании времени, особыми типами моделей. Смещение элементов, связей и структур систем различных типов недопустимо» [49, с. 13].

Оговоримся сразу: нет никаких сомнений в том, что статические системы как предельный случай динамических обладают определенной методологической спецификой и что все наши знания и о Земле и о мире в целом получены в течение исторического периода. Менее очевидно другое: в чем именно целесообразно усматривать специфику и какие методические выводы для развития геологии делать из факта несоизмеримости истории человечества с геологической историей.

В качестве принципа, присущего лишь статическим системам, указывается «принцип специализации» — требование выделять сложные объекты «по определенным наборам признаков». Однако, во-первых, как мы знаем, все и любые системы подразумевают их выделение по тем или иным наборам признаков, а потому этот принцип не может рассматриваться как специфический лишь для статических систем. Во-вторых, если характерными связями элементов в этих системах считать именно атомно-молекулярные и гравитационные (см. табл. 2.2), то сам по себе «принцип специализации» ни при каких условиях не способен обеспечить их изучение. Здесь требуются как раз принципы (точнее, методы) физики и химии, хотя считается, что их позволительно использовать лишь при исследовании систем динамических.

Во всяком случае, если уже решаться на цитированное утверждение, что динамические системы, или геологические процессы, «являются физическими, химическими или механическими и исследуются методами соответствующих наук», то следует признать не менее «физичными», «химичными» и «механичными» состояния этих процессов, т. е. геологические тела. Если к тому же иметь в виду, что «причинно-следственные» и «атомно-молекулярные» связи — понятия не альтернативные и столь же совместимые, как «розовый» и «надежный», то становится очевидным, что различия статических и динамических систем, существенные в теоретическом исследовании, лежат совсем в иной плоскости. Что же касается принципов исследования этих систем — наиболее важной для нас стороны вопроса, — то при данном способе рассмотрения систем эти принципы вообще не различаются.

Отмеченные логические невязки, характеризующие внутреннюю противоречивость обсуждаемой схемы, вызваны, конечно, не небрежностью изложения, а более глубокой причиной — методологической непоследовательностью регистрационизма, использующего системный подход лишь настолько, насколько он позволяет «...выделять в сложном мире геологических явлений три типа систем» [49, с. 13].

Как уже неоднократно подчеркивалось, с позиций системного подхода система — это познавательная конструкция, выделя-

емая в мире абстракций как некий гомоморфизм мира явлений в задаваемом нами отношении [80]. Система по дефиниции системного подхода не может быть ни телом, ни процессом, а является лишь их абстрактной формализованной моделью. Так, например, преобразование

$$\begin{array}{c} A \ B \ C \ D \ \dots \\ \downarrow \\ K \ L \ M \ N \ \dots \end{array}$$

является одним из представлений динамической системы, причем «ясно, что операнды преобразования соответствуют состояниям системы» [85, с. 44]. Эта динамическая система с равным успехом моделирует и процесс метаморфизма и кодовую таблицу, согласно которой слово *BAD* принимает вид *LKN*.

По этой причине элементы системы, если не применять слово «система» как термин свободного пользования, не могут быть связаны гравитационными силами и не имеет смысла изучать систему ни физическими, ни какими-либо иными эмпирическими методами, так же как не имеет смысла измерять электропроводность чертежа или формулы. Одно из двух: либо речь идет о самих «оригиналах», и тогда «система» — один из синонимов «явления», либо, если все же имеются в виду именно «конструкты», тогда нет смысла классифицировать их по методам эмпирического изучения, учитывая физическую или химическую природу процессов и физическое время. Одним словом, если мы действительно намерены рассуждать в рамках системного подхода, а не только пользоваться системной терминологией, то следует иметь в виду, что, «соотнося машину и преобразование, мы вступаем в ту дисциплину, которая соотносит поведение реальных физических систем со свойствами символических выражений, написанных пером на бумаге» [85, с. 47].

Таким образом, источник противоречий рассматриваемой концептуальной схемы кроется в недостаточно четком и недостаточно последовательном противопоставлении системы как инструмента теоретического исследования фрагменту действительности (объекту), а иногда даже в частичной идентификации их. Нельзя не согласиться с Г. П. Щедровицким: «Это иллюзорное понимание сути дела, возникнув уже в сравнительно простых ситуациях... проникает затем в высшие этажи науки и там запутывает все окончательно» [84, с. 16].

Высшие этажи любой естественной науки, ее феноменологическую теорию (сколь бы несовершенной она ни была) определяют фундаментальные проблемы, т. е. те непреходящие задачи, которые в противоположность прикладным не обнаруживают непосредственной связи с экономикой и столь же постоянны для данной науки, как и ее объект. В определенном смысле фундаментальные проблемы естественных наук однотипны

и сводятся к познанию идеализированных сущностей природных явлений, рассматриваемых с позиций соответствующих наук.

Совершенствуясь по мере развития науки, представления о моделях этих сущностей в настоящее время конкретизируются в понятии абстрактного механизма. Под механизмом явления понимается система конечного числа определенным образом взаимосвязанных факторов, существенность которых определяется их способностью выступать в роли рычагов действительного или мысленного управления ходом соответствующего процесса или как минимум предвидения результатов его. Так, по С. Е. Бреслеру, в числе трех фундаментальных проблем биологии (по существу трех биологических механизмов) фигурирует «...проблема нейробиологии — механизм работы нервной системы и декодирование нейробиологического кода и, как конечная цель, познание механизма работы человеческого сознания» [14, с. 121].

Соответственно фундаментальные проблемы теоретической геологии сводятся к построению формализованных геологических механизмов природных явлений (включая такое явление, как функционирование Земли), в частности механизмов, опирающихся на модели физики, но не сводящихся к ним. В противоположность фундаментальным прикладные проблемы теоретической геологии определяются прямым заказом экономики и конкретизируются в методах предсказания явлений (а в будущем и управления ими), а также в методах прогнозирования объектов, прежде всего месторождений полезных ископаемых.

Универсальная объяснительная роль механизмов проявляется в том, что они в зависимости от угла зрения отвечают и на вопрос «почему?», и на вопрос «как»? По существу, механизм — это причина в современном понимании, поскольку в соответствии с требованиями системного подхода «под причиной следует понимать не вещь, а взаимодействие вещей (свойств, отношений), т. е. систему» [66, с. 83].

Важнейшей характеристикой и геологических и биологических механизмов является их инвариантность относительно времени, конечно, в той же (не меньшей и не большей) мере, что и для законов физики. Это положение не означает ни отрицания направленности геологического развития Земли, ни признания униформизма, оно лишь ориентирует на тот инвариант, к уяснению которого всегда стремилось и будет стремиться естествознание (и, в частности, геология) и без которого было бы вообще невозможно познание мира.

Конечно, современные генетические построения геологии весьма далеки от того, что подразумевает понятие механизма; они не удовлетворяют усложняющимся требованиям прикладной геологии и вызывают в целом справедливую критику. Однако при всем несовершенстве, объяснительной беспомощности, неконструктивности генетическая геология была и остается фундаментальной по своему назначению составляющей наук о Земле и поэтому

не должна зачисляться в разряд вспомогательных областей прикладной геологии, как это неявно подразумевает регистрационизм, постулируя принципиально ретроспективный характер генетических схем.

Как и любые теоретические исследования, фундаментальные (генетические) и прикладные (предсказательные) построения суть логические конструкции, которые не пересекаются с непосредственными измерениями и наблюдениями и могут быть сравниваемы с какими бы то ни было системами лишь на уровне конструкций. Однако, как мы видели, статические и динамические системы характеризуются регистрационизмом на эмпирическом уровне, уровне наблюдений, а противопоставляемые им ретроспективные системы, — естественно, на уровне конструкций. По этой причине сравнению может подлежать лишь та теоретическая составляющая любых, в том числе эмпирических, исследований, которая заключается в выводах. Надежность же последних при фиксированном уровне науки зависит лишь от степени опосредованности познавательных конструкций, а не от того, являемся мы современниками протекания процесса или только свидетелями его неисчислимых взаимосвязанных следов.

Если «очевидно, что точность выводов будет тем меньше, чем дальше в глубь истории Земли мы удаляемся» [52, с. 15], то столь же несомненно снижение точности выводов и по мере удаления в глубь современной Земли, современной Вселенной, в глубь атома или функционирующего мозга, одним словом, «в глубь» опосредованности модельных конструкций, чем бы последняя ни определялась. «Каждое событие связано, собственно говоря, со всей Вселенной, только наш пространственно и временно относительно ограниченный подход не дает нам возможности видеть отдаленные воздействия, вызываемые определенным событием, близким и наблюдаемым нами, на далеких пространственных и временных расстояниях» [38, с. 196—197]. «Все наши знания о мире — это, по сути дела, знания об отношениях, в которых находятся реальные объекты» [55, с. 20] и которые не исчезают с завершением процессов, а лишь трансформируются в бесчисленном множестве других отношений.

Можно утверждать, что в определенном смысле развитие науки — это сопряженный рост опосредованности и вместе с тем надежности выводов, а следовательно, увеличение «теоретичности» науки, взаимосвязанности ее отдельных областей, их взаимовлияния и «взаимопомощи». «Природа едина — в великом и малом, в живом и мертвом» [10, ч. 3, с. 101].

«Связь пространства и времени настолько тесна, что это делает невозможным их разделение» [38, с. 197]. Этот тезис, лежащий в основе тектологической «теории системных кризисов» [10, ч. 3], всегда рассматривался в геологии как не имеющее к ней прямого отношения философское или специально физическое утверждение. Однако категоричность отнюдь не бесспорных

методологических установок модельного регистрационизма, связанных с особым значением, придаваемым им выделению ретроспективных систем, а тем самым параметру «время», свидетельствует о том, что и теоретическая геология, во всяком случае в своей методологии, должна сегодня учитывать неправомерность построений, основанных на расчленении пространственно-временного континуума на абсолютные бесвременные пространство и беспространственное время.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТА В СТРУКТУРЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ НАУКИ

Несомненно, что со многих точек зрения рассмотрением названной проблемы было бы целесообразно предварить эту главу, а не заключать ее. Тем не менее принятый порядок обладает весьма важным преимуществом, создавая возможность испытать плодотворность изложенных выше методологических требований системного подхода. К этому вынуждают и характер самой проблемы, в равной мере актуальной, сложной и многоаспектной, и особенности целевой направленности изложения, призванного, в частности, с одной стороны, обосновать несостоятельность разного рода агенетических проектов совершенствования геологической науки, а с другой — предпослать последующим главам целостную, достаточно определенную и непротиворечивую методологическую модель геологии, в которой бы нашла место ее теоретическая компонента.

В целом ясно, и это с очевидностью подтверждает весь предшествующий опыт, что удовлетворить перечисленным требованиям невозможно, если ориентироваться на какое бы то ни было одно всеобъемлющее определение. Многочисленность и расплывчатость понятий, необходимых для формулирования такого определения, делают подобные попытки неконструктивными и вызывают лишь дополнительные недоразумения и бесплодные дискуссии.

Более конструктивным и реальным, даже в условиях отмеченной расплывчатости многих понятий, представляется построение системы взаимосвязанных (взаимоопределяющих, взаимоограничивающих и взаимопоясняющих) утверждений и определений. Причем система должна явно базироваться на нескольких аргументированно выбранных основаниях, фиксированных принятым способом изображения, в виде, например, служебных пояснительных полей схемы или таблицы. Кроме требований простоты и внутренней непротиворечивости к создаваемой системе в соответствии с принципом целостности должно быть предъявлено требование полноты. Последнее означает, что основания разбиения, призванные определять аспекты рассмотрения геологии как целого и служить скелетом создаваемой системы, должны априори га-

гарантировать охват всех областей, дисциплин, разделов, ответвлений науки, по каким бы особенностям ее задач, объектов и методов они ни выделялись. Критериями правомерности результирующей схемы должны явиться ее непротиворечивость более общим методологическим установкам и вместе с тем приложимость к другим областям естествознания, в которых теоретическая составляющая оформлена определеннее, чем в геологии.

С учетом сделанных оговорок определим основания разбивания — скелет схемы. Прежде всего обратим внимание на то обстоятельство, что требуемая полнота охвата всех областей геологии при определении ее границ не может быть достигнута путем, так сказать, плоскостного отмежевания геологии от других наук «по объекту» без учета ее границ и внутренней дифференцированности «в разрезе», т. е. по степени абстрактности уровней. Рассматриваемая под таким углом зрения геология, как известно, включает едва ли не все этажи научно-практической деятельности и, смыкаясь в основании с горно-геологической практикой, прослеживается до философских этажей науки. Поэтому, чтобы гарантировать полный охват геологии, следует рассмотреть как бы «геологический срез» всей научно-практической деятельности.

Степень абстрактности отдельных уровней этой деятельности можно поставить в зависимость от того, насколько абстрагированы от реальной действительности элементы систем, создаваемых на соответствующих уровнях. Так, можно утверждать, что в отличие от ненауки (назовем ее областью практики), преобразующей и производящей материальные вещи, любая наука, и в том числе даже наиболее практические разделы геологии, создают на выходе информационные системы, элементами которых, как известно, являются понятия — более или менее абстрактные модели материальных вещей.

В свою очередь и область науки должна быть дифференцирована как минимум на два уровня, представленных в геологии: конкретно-научный и метанаучный. Первый из них, соотносимый с собственно геологией и другими естественными науками, определяется тем, что создаваемые им информационные системы образуют понятия о материальных вещах. Соответственно метанаучному уровню отвечают системы, характерными элементами которых служат более абстрактные понятия об идеальных вещах — понятия о понятиях.

Непременными основаниями классификации наук являются, как известно, объект и метод. В соответствии с предьявляемыми к создаваемой схеме требованиями, основанием «метод» должна служить такая общая категория, которая, во-первых, инвариантна относительно всех мыслимых конкретных задач, объектов, методов, уровней абстракции и, во-вторых, представляема заведомо полной группой двух или более значений.

Одной из категорий, удовлетворяющих этим условиям, является пара индукция — дедукция. С ее помощью появляется

✓ возможность дихотомировать выделенные уровни научно-практической деятельности на инвариантные «этажи»: менее абстрактный в пределах каждого из уровней науки нижний — индуктивный и более абстрактный верхний — дедуктивный. В качестве нестрогих аналогов индукции и дедукции на уровне практики мы рассматриваем соответственно метод проб и ошибок и метод опережающей технологии, располагая их по этажам в обратном порядке: нижний, собственно практический, наиболее далекий от науки этаж, отражающий промышленное производство, поставлен в соответствие аналогу дедукции, а верхний, квазипромышленный, — аналогу индукции*.

21
// Таким образом, вертикальная в указанном смысле дифференцированность научно-производственной деятельности по методу является инвариантом и не отражает специфики геологии. Эту специфику задает другое основание, а именно «объект». Поскольку наша цель состоит не в традиционном расчленении геологии на предметно-методические дисциплины, а в выявлении такой ее структуры, в которой явным образом выделялась бы теоретическая составляющая, постольку определение объекта должно обеспечивать отмежевание геологии (в самом широком понимании, включающем, к примеру, геологию Луны) от других наук. Такому условию удовлетворяет объект «природные явления литосферы и глубинных зон планет», позволяющий отграничить геологию не только от астрономии, физики, химии и биологии, но также и от метеорологии, океанологии и других наук о Земле, выходящих за рамки геологии.

Для уяснения в структуре геологии места теоретической составляющей немаловажно определить ее соотношение с прикладной геологией, которая нередко противопоставляется теоретической геологии в качестве альтернативы. Каким бы конкретно образом ни определялось понятие прикладной науки, очевидно, что это определение должно отражать некую связь данного понятия с понятием практической потребности. Выше уже подчеркивалось, что даже самые отвлеченные науки не могут быть абсолютно независимыми от практики. Однако степень зависимости для разных наук и, что особенно важно, для разных задач одной и той же науки неодинакова. Исходя из этого обстоятельства как из факта, оправданно различать прямую, или непосредственную, и косвенную, или опосредованную зависимость задач науки от практики.

Как показывает название, прямая, или непосредственная, зависимость характеризует задачи, определяемые, буквально формулируемые потребностями тех или иных отраслей самой практики; косвенная, или опосредованная, связь понимается буквально, т. е. как не п р я м а я, отмеченная большим или мень-

* Эта инверсия выражает объективную симметрию отношения науки и практики как отражения идеального и материального.

шим опосредованием через нужды других наук. Принимая во внимание вертикальную дифференцированность сферы научно-практической деятельности, нетрудно заключить, что крайние уровни — практический и метанаучный — характеризуются соответственно прямой и косвенной зависимостями их задач от практики, тогда как все конкретные науки, и в их числе геология, отличаются принципиальной двойственностью задач. И в геологии и в любой другой области естествознания среди задач и даже целых разделов конкретной науки всегда можно обнаружить непосредственно обуславливаемые практическими потребностями. Как известно, инженерная геология — далеко не единственная отрасль геологии, прямо связанная с потребностями практики.

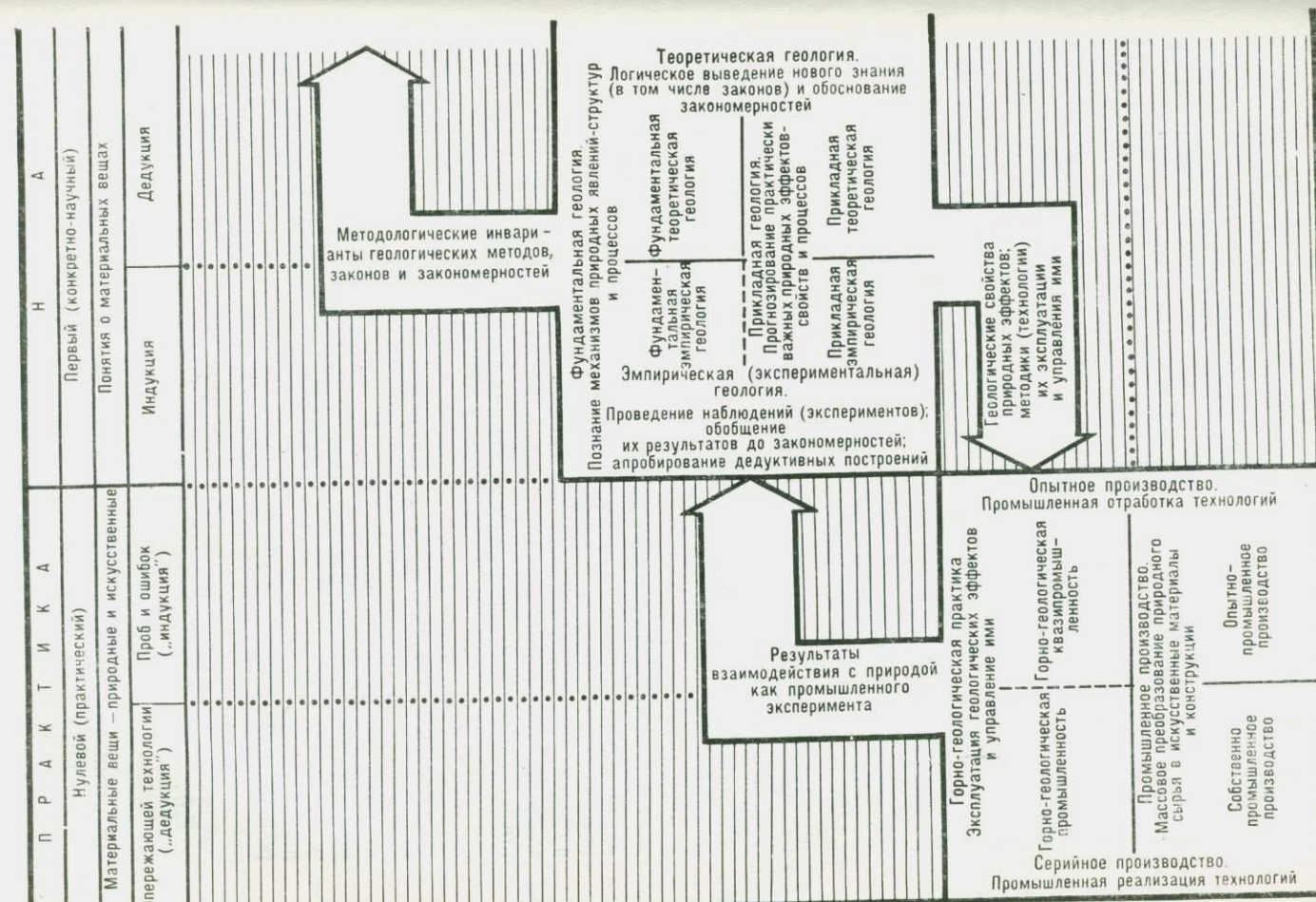
Четыре рассмотренных основания (косвенная и прямая зависимости, методы индукции и дедукции) дают возможность получить интерпретируемый вариант функциональной структуры геологии (табл. 2.3), позволяющий определить содержание, контуры теоретической геологии и ее соотношение с другими функциональными областями геологии, а тем самым и более основательно аргументировать критику основных положений и рекомендаций модельного регистрационизма.

Как видно из таблицы, собственно геологическая наука, представленная на схеме центральным блоком, в зависимости от аспекта рассмотрения нацело выполняется одной из двух пересекающихся функциональных областей-пар [фундаментальная — прикладная или теоретическая — эмпирическая (экспериментальная)] либо (в результате их пересечения) четырьмя соответствующими функциональными подобластями. Имея в виду указанные выше критерии правомерности анализируемой схемы, необходимо подчеркнуть, что полученная функциональная структура, определяемая выбранными основаниями, не является открытием и давно известна как свойственная всем конкретно-научным отраслям естествознания. В некоторых из них (в частности, биологии, физике) именно эти функциональные области давно приобрели организационный статус в виде соответствующих научно-исследовательских секторов, институтов и целых отраслей науки.

Функциональная роль фундаментальной и прикладной областей в геологии, как и в любых других науках, определяется конечными целями, также инвариантными для всех наук и различающимися лишь в приложении к специфическим объектам. Конечной целью фундаментальной геологии является познание механизмов целостных природных явлений, составляющих ее объект, — процессов (в динамике) и структур (в статике). Наше понимание механизма было изложено выше, здесь же следует только подчеркнуть, что механизм как причинно-объяснительная конструкция составляет поистине фундамент научного познания, чем и оправдывается исторически сложившееся название соответствующих проблем — фундаментальные. Механизмы слоенакпления, образования гранитового батолита, формирования земных оболочек

СТРУКТУРА НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В „ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СРЕЗЕ“

Область деятельности	Зависимость задач от общественной практики			
	Косвенная (опосредованная)		Прямая (непосредственная)	
	Немопределяются задачи			
	Философией	Науками о Земле	Горно-геологической практикой	Другими отраслями народного хозяйства
Уровень абстрагированности от материальной действительности	Объект			
	Научное познание в целом	Геологическое познание	Природные явления литосферы и глубинных зон планет	Искусственно создаваемые вещи
Характер элементов создаваемых систем	Определеляющий метод			
	Индукция	Дедукция		
У	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция
К	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция
А	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция
У	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция
К	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция
А	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция
У	Второй (метанаучный)	Понятия об идеальных вещах – понятиях	Индукция	Дедукция



и т. д. и т. п. вне зависимости от масштаба явления суть те идеализированные конструкции, которые, даже не обладая в их современном виде силой законов, знаменуют основные вехи в развитии соответствующих ветвей геологии.

Прикладная область геологии определяется, во-первых, тем, что ее объекты составляют не обязательно целостные явления, а любые изучаемые геологией отдельные их свойства; однако это те и только те свойства, которые как-либо учитываются и используются в практической деятельности. Понятно, что с течением времени в соответствии с изменением практической потребности меняется (главным образом расширяется) и содержание объекта прикладной геологии, подобно тому, как растет со временем список минеральных ассоциаций, рассматриваемых в качестве полезных ископаемых. Во-вторых, так же как и фундаментальная геология, прикладная область характеризуется определенной конечной целью, инвариантной в своей основе относительно конкретных объектов и лишь по-разному преломляемой, обозначаемой в разных науках. Инвариант конечной цели прикладных областей науки составляет предвидение, предсказание, прогнозирование интересующих практику эффектов, характеристик, свойств тех или иных явлений. Для прикладной геологии это предвидение, предсказание, прогнозирование соответственно свойств пород и структур; селей, вулканических извержений; местоположения и запасов промышленных концентраций полезных ископаемых и т. д. и т. п.

Последнее утверждение лишь на первый взгляд противоречит широко распространенной нестрогой формулировке цели прикладной геологии как о б н а р у ж е н и я месторождений, реализующего некий прогноз. Ведь говоря о выявлении какого-либо месторождения при поисково-съёмочных исследованиях, мы никогда (за редкими исключениями) не имеем в виду ненужности последующего более детального предсказания взаиморасположения, морфологии рудных тел, состава и запасов полезного ископаемого в пределах весьма неопределенного, как правило, объекта, именуемого месторождением. И хотя более детальное изучение обнаруженного месторождения принято называть не предвидением или прогнозированием, а разведкой, тем не менее предсказательный характер результатов разведочных работ является непреложным фактом, запечатленным в категориях разведанности А, В и С. Эти категории отражают не что иное, как степень надежности предвидения еще не обнаруженных полезных ископаемых, действительное же обнаружение происходит лишь при отработке месторождений.

Исключение составляют случаи, когда состав, условия залегания и обнаженности тел полезных ископаемых таковы, что месторождение практически «обнаружено» и его отработка не требует какого бы то ни было детального, разведочного прогнозирования. Примером могут служить обнаженные, горизонтально

залегающие на поверхности, однородные по составу, выдержанные по мощности и однозначно ограниченные по латерали пласты полезных ископаемых, а также месторождения, которые геолог-съемщик «отрабатывает», унося их в своем рюкзаке, например месторождения-гнезда некоторых видов оптического сырья, драгоценных камней и т. п. Эти исключения, однако, отвечают тем вырожденным случаям, когда этапы разведки, а то и добычи предельно редуцированы, что не лишает истинности сделанное утверждение: конечной целью прикладной геологии является предвидение, предсказание, прогнозирование практически важных природных эффектов.

Методической составляющей предвидения служат более или менее гипотетические рекомендации по технологии требуемого практикой использования отдельных природных эффектов и, в редких пока случаях, по технологии активного управления ими. Вне всякого сомнения, роль методической составляющей в продукции прикладной геологии, а через ее посредство и геологии в целом с течением времени будет неуклонно возрастать. В связи с этим единичные и нетипичные ныне случаи направленного воздействия человека на геологическую среду в заданных регионах с целью ее охраны, преобразования, наконец, с целью планомерного, предвидимого создания промышленных концентраций минерального сырья станут в будущем не менее, а, возможно, более типичными, чем современные поиски мест неконтролируемого человеком «рождения» полезных ископаемых.

Очевидно, что идеализированной связью фундаментальной и прикладной областей геологии является такое их взаимодействие, при котором прикладные разработки основываются главным образом на знании механизмов геологических явлений, а ориентация фундаментальных разработок на те или иные явления в значительной мере определяется характером прикладных задач. В настоящее время, однако, в полной, а иногда и в излишней мере реализуется лишь обратная связь, вынуждающая прагматизировать фундаментальные исследования и тем самым лишать их известной независимости от практики, а также видоизменять их конечную цель; в итоге эти исследования лишаются определяющих их черт фундаментальности. Это обстоятельство наряду с объективными трудностями познания геологических механизмов и, кроме того, наряду с дезориентирующими методологическими рекомендациями агнетического толка обуславливает крайне медленное развитие и организационное вычленение фундаментальной геологии как относительно автономной отрасли геологической науки.

Неразвитость фундаментальной составляющей вынуждает геологию для выполнения своих прикладных функций, и прежде всего для осуществления действенного минерагенического прогнозирования, переносить центр тяжести на негеологические методы, например создавать автоматизированный вариант метода прямых

аналогий [15]. Тем досаднее, что пока единичные действительно эффективные методы детального минерагенического прогнозирования, опирающиеся на представления о геологических механизмах, не пользуются должным вниманием геологов, примером чего может служить метод А. Н. Кена [42].

Подобно рассмотренным фундаментальной и прикладной областям теоретическая и эмпирическая области геологии также выделяются по их специфической функциональной роли, определяемой соотносимостью с дедуктивным и индуктивным этапами. Как видно из табл. 2.3, сами эти этажи на каждом из уровней науки отвечают определяющему методу исследования. Та общеизвестная истина, что индукция — дедукция связаны так же неразрывно, как полюсы магнита, не лишает смысла различать виды и области исследования по преобладающему, определяющему, методу. И действительно, дедуктивным (индуктивным), как известно, можно с полным правом назвать и отдельно взятое рассуждение, и целую теорию, и раздел науки.

Чтобы обосновать правомерность соотнесения теоретической и эмпирической составляющих геологии с преобладающими дедуктивным и индуктивным методами исследования, недостаточно привычного и в целом правильного их понимания как «от общего к частному» и «от частного к общему» или, тем более, как «сверху вниз» и «снизу вверх». И не только потому, что в современной формальной логике наряду с наиболее широко известным видом дедуктивных умозаключений («от более общего к единичному или к менее общему») различается еще два вида: «от одной общности к той же общности» и «от единичного к частному» [46, с. 133]; главная причина состоит в том, что эти краткие и приблизительные определения-символы не раскрывают важного для целей изложения методологического содержания рассматриваемых категорий.

В соответствии с ее пониманием в логике дедукция определяется как «...такое умозаключение, в результате которого получается новое знание о предмете или группе предметов на основании уже имеющегося некоторого знания об исследуемых предметах и применения к ним некоторого правила логики» [Там же]. В этом определении следует обратить особое внимание на результат дедукции — новое знание. Это специфика именно дедукции, поскольку посредством индукции мысль лишь «...наводится на какое-либо общее правило, общее положение, присущее всем единичным предметам какого-либо класса» [Там же, с. 200]. Важно иметь в виду, что из двух видов индуктивных умозаключений в геологии наиболее распространена «неполная индукция — вид индуктивного умозаключения, в результате которого получается какой-либо общий вывод о всем классе предметов на основании знания лишь некоторых предметов данного класса» [Там же, с. 381]. Выше, при рассмотрении альтернативы метода полной группы, уже обсуждалась некорректность выводов,

получаемых в результате неполной индукции. Здесь нам необходимо точнее определить понятие «научное знание».

Традиционно эталоном научного знания считается опытный факт, т. е. результат некоего эксперимента, либо активного, проводимого в задаваемых, как минимум контролируемых, условиях, либо пассивного, наиболее распространенного в геологии, сводящегося к наблюдению явлений в неконтролируемых условиях. И это, конечно, справедливо, но лишь при одном обязательном и далеко не всегда учитываемом и соблюдаемом условии: регистрируемое событие (знание), претендующее на роль научного факта (знания), должно и по содержанию ключевых понятий и по их форме (символике) корреспондировать, в частности не противоречить, сбалансированной системе более общих, более инвариантных, а тем самым и более надежных научных утверждений. И не случайно далеко не всякое событие, зарегистрированное (и даже измеренное) не только в быту или на производстве, но и в науке, приобретает право называться научным знанием.

Классическим примером зарегистрированного знания, не являющегося тем не менее знанием научным, служит «факт» вращения Солнца вокруг неподвижной Земли. В философии, как известно, подобные «факты» именуются кажимостями. Геологам хорошо известна научная цена и такого задокументированного «факта», как элементы залегания «слоистости», оказывающейся в действительности сланцеватостью, секущей истинную слоистость. То обстоятельство, что ненаучность подобных «фактов» мы относим на счет ошибочной интерпретации событий или (и) безграмотности исследователя, как раз и отвечает утверждению, что действительно научным знанием становится лишь в результате его соотнесения со всей системой имеющихся научных знаний, в частности фактов.

Геологу, не осуществившему этого соотнесения и принявшему сланцеватость за слоистость, предъявляется обвинение в профессиональной безграмотности. Однако почему-то воздерживаются от подобной претензии, когда другой геолог, действуя «методом избранных примеров» (т. е. на основе неполной индукции, при игнорировании множества научных фактов), выдает за научное знание априори неправомерное обобщение, так называемую закономерность. Не следует, конечно, отождествлять недостоверность неправомерных индуктивных обобщений с гипотетичностью научных предположений, соотнесенных с некой системой фактов и положений, но остающихся гипотезами из-за неполноты самой системы.

Однако как раз те недостатки индуктивных фактов, выводов, закономерностей, которые не позволяют относить их к научному в собственном смысле знанию, характеризуют именно эмпирическое знание — «знание, полученное на основе опыта, результаты которого трансформируются в виде разной степени первоначальных обобщений с помощью прежде всего таких

умозаключений, как индукция и аналогия» [46, с. 685]. Точно так же известно, что эмпирическое знание при всей его важности как ступени познания, как транслятора опыта «все же недостаточно для познания глубоких внутренних закономерностей возникновения и развития исследуемого объекта, оно одно не может обеспечить достоверность вывода» [Там же].

Таким образом, мы вправе констатировать, что эмпирическая компонента науки, во-первых, отвечает именно индуктивному методу, а, во-вторых, сама по себе не обеспечивает научности знания ни в смысле его достоверности, ни в смысле решения фундаментальных задач.

Что же представляет собой та собственно научная компонента науки, которая обеспечивает «проникновение в суть вещей»; задолго до опыта, априори, предвидит эффекты, не регистрируемые до времени тончайшими экспериментами; упрямо утверждает нечто, противоречащее опыту многих поколений добросовестных наблюдателей, и после целых десятилетий непризнания одерживает верх?

Охарактеризованные выше методологическое содержание методов дедукции — индукции, особенность их взаимосвязи, а также доказанная правомочность соотнесения эмпирической составляющей науки именно с индукцией позволяют утверждать, что искомой собственно научной компонентой является именно теоретическая, отвечающая дедуктивному в целом методу. Ибо только после испытания «неэмпирическими проверками» [16] эмпирическая закономерность либо отвергается как ложная, либо с помощью ряда дедуктивных построений включается в систему научных утверждений в ранге научного знания той или иной степени общности, инвариантности, безусловности (вплоть до закона) и тем самым становится знанием научным. Эта мысль не является нашим открытием, она неоднократно высказывалась многими учеными. Например, В. И. Лебедев приводит утверждение А. М. Бутлерова о том, что «только при посредстве теории знание, слагаясь в связанное целое, становится научным знанием» [56, с. 203].

Характеризуя соотношение теоретической и эмпирической геологии, необходимо иметь в виду, что эти области намеренно названы функциональными составляющими (компонентами) науки как единого целого, т. е. неизменными, равно необходимыми ее ингредиентами, играющими тем не менее разные роли в ее существовании. Полагая эмпирическое знание ступенью познания, неправомерно считать эту ступень именно первой стадией любого конкретного исследования. Более того, теоретическая область науки в соответствии с ее методической функцией в первую очередь призвана создавать чисто теоретическим путем, т. е. дедуктивно, гипотезы и теории и даже формулировать чисто теоретические, не прошедшие эмпирической проверки законы, подлежащие испытанию экспериментом или как минимум теоретически обоснованным наблюдением.

Разумеется, все рассмотренное применительно к дедукции — индукции и соответствующим им теоретической и эмпирической компонентам конкретных наук в равной мере относится к геологии. Таким образом, назначение теоретической геологии состоит прежде всего в дедуктивном выведении новых геологических познавательных конструкций (в различной степени гипотетичных теорий), формулировании гипотетичных законов, а также разработке программ последующей экспериментальной проверки этих построений. В своей фундаментальной ветви (в табл. 2.3 — под-область фундаментальной теоретической геологии) эти теории и законы, как было показано выше, в идеале должны отвечать конечной цели, а значит, понятию геологического механизма или его частей*. Применительно к подобласти прикладной теоретической геологии понятие закона природы лишается смысла. Содержание прикладных геологических теорий в соответствии с конечной прикладной целью геологии отвечает системам научного предвидения, в первую очередь минерагенического прогнозирования, а также научным «технологиям» эксплуатации геологических явлений и управления ими.

Следует подчеркнуть, что теоретико-геологическое построение отнюдь не обязательно должно зарождаться на заоблачных философских высотах, постепенно спускаясь к земной геологической конкретности. Теоретико-геологический вывод с равным успехом может базироваться на других конкретно-научных же положениях: физических, химических, наконец, геологических, лишь бы они были достаточно надежны и недвусмысленны, т. е. формализованы.

Следующая функция теоретической геологии сводится к рассмотренному кратко обоснованию результатов эмпирических обобщений, закономерностей. Соответственно назначение эмпирической (экспериментальной) геологии состоит в проведении наблюдений и постановке экспериментов, индуктивном обобщении первичных данных до уровня менее или более абстрактных закономерностей. Ясно, что эта область геологии объединяет все без исключения виды и стадии полевых работ и значительную часть камеральных исследований: поисково-съёмочные и разведочные наблюдения, тематические работы, минералого-петрографическое и лабораторно-аналитическое изучение вещества и т. д. К этой же области относятся геологические обобщения любых масштабов (в том числе глобальных), традиционно именуемые теоретическими исследованиями.

Наблюдения и эксперименты в геологии, как и в других науках, либо начинают элементарный цикл исследований, завершаемый теоретическим обоснованием, либо заканчивают его,

* Уточнение вызвано тем, что в общеупотребительном, но узком смысле (как необходимая, всеобщая и существенная связь обычно лишь двух-трех элементов) закон может отвечать подсистеме механизма.

подвергая эмпирической проверке чисто теоретические построения. Вторая последовательность (учитывая, что дедуктивные построения определяют и программу проверочного эксперимента) в целом более предпочтительна: она более «научна» по существу (предполагает четкую систему условий эксперимента), более надежна, а в применении к геологии и несравненно более экономична, если иметь в виду, во что обходится, например, теоретически не обоснованное, но детальное комплексное опознание отдельных регионов.

Из краткой характеристики функциональных компонент (областей) геологии становятся достаточно ясными содержание и роль соответствующих четырех непересекающихся подобластей для целей данного изложения. Насколько четко различаются по конечным целям фундаментальной и прикладной геологии соответствующие теоретические подобласти, настолько неопределенна граница подобластей эмпирических. Кроме отнесения геологосъемочных, поисковых и разведочных работ к прикладной, а большинства (?) тематических исследований к фундаментальной подобластям больше ничто, пожалуй, не оправдывает их разделения, обозначенного в табл. 2.3 штриховой линией. В равной мере используются в этих подобластях и те данные, которые извлекаются геологической наукой из горно-геологической практики*. Это и понятно: первичные геологические данные и способы их обобщения в целом, по-видимому, инвариантны относительно геолого-экономического содержания целей. Следует, конечно, учитывать эмбриональное состояние современной фундаментальной геологии как относительно автономной области, однако в целом условность различения фундаментального и прикладного в области эмпирической, по-видимому, очевидна.

В заключение беглого обзора взаимоотношений функциональных компонент геологии следует отметить, что при всей нашей убежденности в правомерности и целесообразности существования теоретической геологии как относительно автономной области мы видим, что эта автономия в целом ограниченнее и не того «сорта», чем автономия (правда, чисто абстрактная) фундаментальной и прикладной составляющих.

Все приведенные рассуждения о теоретической геологии соотносимы лишь с конкретно-научным уровнем деятельности и, таким образом, характеризуют собственно геологию. Возникает вопрос: включать ли в геологию, а если да, то как и с какой из ее компонент соотносить геолого-прикладную область методологии — науки следующего, метанаучного, уровня (см. левый верхний угол табл. 2.3)? Несмотря на кажущуюся схоластичность, этот вопрос отнюдь не лишен смысла, ибо априорное игнорирование

* Примечательно, что в области практики столь же условно не разделение областей в пределах одного этажа, а разделение самих этажей в пределах горно-геологической отрасли.

такой реальности, как целая область метанауки, возможно, оправдан в дипломатии, но, безусловно, чужд науке.

То очевидное обстоятельство, что обсуждаемая метаобласть является прежде всего прикладной компонентой методологии — науки иного уровня, конечно, осложняет дело, но не снимает заданного вопроса *. Остается фактом, что именно геологи в сфере геологии, исходя из потребностей именно геологии, а не методологии обсуждали, обсуждают и, конечно же, будут обсуждать способы совершенствования ее построений. По этой причине нам представляется не только оправданным, но решительно необходимым, закрепляя за этой областью метанауки предложенное И. П. Шарповым [83] название *метатегеология*, причленив ее к геологии в качестве метанаучного «надэтажа» теоретической геологии и соответственно отличать теоретическую геологию от «большой теоретической геологии». Тот парадокс, что одним из горизонтов «большой теоретической геологии» неизбежно станет эмпирическая метатегеология, не является помехой, ибо по отношению к теории конкретно-научного уровня эмпирия метауровня выступает тоже как теория. Чтобы не ходить далеко за примерами, можно отметить, что в области метатегеологии, в частности, относится и вся первая часть этой книги, которая является, естественно, «негеологической», если оценивать ее с позиций собственно геологического, конкретно-научного, уровня.

В нашу задачу не входит исследование всей схемы (см. табл. 2.3), приведенной лишь для того, чтобы обеспечить полноту функциональной структуры геологии и дать ее методологический анализ. Однако уже те заключения, что и наука и метанаука обладают гомоморфной функциональной структурой, что вместо «геологического среза» можно было бы с равным успехом проанализировать «физический» или «биологический срез», что геолого-методологические следствия этой схемы вместе с тем опираются на опыт других наук, — все это в совокупности позволяет считать сделанные оценки, выводы и рекомендации заслуживающими внимания.

Какова же современная структура геологии, если ее оценивать, сопоставляя с идеализированной теоретической? Во-первых, как неоднократно подчеркивалось, теоретическая геология в геологии крайне угнетена, существует лишь в зародыше, а метатегеология находится вообще за бортом геологии. Многие даже работающие

* Отметим попутно, что представляемая табл. 2.3 схема позволяет строже сформулировать критерий отнесения областей знания к прикладным. Область знания i -го уровня является прикладной, если ее задачи определяет и формулирует некоторая деятельность предыдущего, $(i-1)$ -го, уровня: для конкретных наук — практика, для метанауки — конкретные науки. По этой причине две пограничные науки одного уровня не являются взаимоприкладными, со временем они образуют третью, пограничную, науку (геохимию, геофизику) или даже две пограничные науки (физическую химию, химическую физику).

в этой сфере геологи едва ли не стыдятся своей причастности к «философии» и едва ли не отрещиваются от нее под лозунгом «ближе к Земле!». В рассматриваемом аспекте, таким образом, геологию на 90% выполняет эмпирическая компонента, включающая и 90% того, что называется в геологии теорией.

Во-вторых, — и этому трудно найти оправдание, — фундаментальная компонента геологии не только низведена до эмпирической подобласти, но, если не прислушаться к критике «новаторских» рекомендаций модельного регистрационизма, со временем она вообще будет изжита. Дело усугубляется тем, что некоторые администраторы считают «чистой» геологию экономически бесполезной.

К чему же призывает геологию «модельный регистрационизм»? Сопоставление табл. 2.2 и 2.3 позволяет утверждать, что именно главные — конечные, определяющие — цели геологии с позиций этой концепции оказываются второстепенными, в то время как вообще не цели, а эмпирические инвариантные процедуры — описание (пусть даже модельное) и измерение — становятся фактически самоцелью. Более того, если всерьез следовать «рекомендациям» регистрационизма, с неизбежностью вытекающим из табл. 2.2, то придется вообще исключить прогноз из числа целей геологии, неприемлемость чего очевидна. Сложнее обстоит дело с вопросом о взаимоотношении фундаментальных целей и функций геологии с ретроспективными построениями, не находящими места в нашей схеме конечных целей науки.

Регистрационизм, следуя вековой традиции геологии, подчеркивает ретроспективный характер объяснительных моделей, объединяя их в «схемы генезиса и эволюции» и рассматривая последние совместно с такими результатами, как «палеогеологические карты и разрезы» (см. табл. 2.2). Однако, как отмечалось выше, абстрактные объяснительные геодинамические модели в принципе столь же инвариантны относительно категорий «прошлое», «настоящее», «будущее», как и объяснительные модели физики и химии. «Ретроспективность» таких геодинамических схем — иллюзия, возникающая из осознания пространственно-временной масштабности явлений, объясняемых этими схемами.

Какова же методологическая роль действительно ретроспективных геологических построений, например палеорекоonstrukций? Ответом на этот вопрос служит известное в теории черного ящика правило: «если детерминированная система наблюдаема лишь частично и потому становится (для данного наблюдателя) непредсказуемой, то наблюдатель может оказаться способным восстановить предсказуемость, приняв во внимание прошлую историю системы...» [85, с. 166]. В каких формах, с помощью каких теоретических средств и насколько эффективно осуществляется в геологии это «принятие во внимание» — вопросы особые. Конечно, расхожие псевдообъяснения «через историю геологического развития» являются скорее пародией на это правило. Корректные же палеогео-

логические построения в условиях специализированности науки выполняются обычно в отрыве и независимо от объяснительно-прогностических задач. И все же прецеденты теоретически обоснованных и эмпирически контролируемых палеогеологических реконструкций и именно как эффективных методов и расшифровки, и генетического объяснения современной структуры, и предвидения в ней одновременно местоположения, форм, размеров и минерального состава рудных тел уже существуют в геологии [41, 42].

Итак, обращение к палеосостояниям геосистем — ландшафтам, фациям, структурам и т. д. — для геологии как целого служит не самоцелью, а одним из стандартных методологических средств в достижении ею главных целей и отправления соответствующих функций — научного объяснения реальности и предвидения экономически важных природных эффектов в настоящем и будущем.

* * *

При всей своей специфике и некоторой обособленности от «фундаментального» естествознания современная геология, однако, не отделена от него непроницаемой перегородкой, а потому ее парадигма в значительной мере отражает все еще физическую в своей основе парадигму современного естествознания. Научная парадигма — некий методологический образец, идеал соответствующей эпохи, который как бы растворен в умонастроениях, образе мышления ученых и незримо направляет логику их исследовательской деятельности. Все новые идеи воспринимаются наукой лишь постольку, поскольку они согласуются с господствующей парадигмой. «Еретики», выходящие за ее рамки в своих представлениях — вне зависимости от эмпирической обоснованности этих представлений — остаются непонятыми до того времени, пока в умонастроения исследователей не проникнет вирус новой парадигмы.

Пожалуй, наиболее полно, хотя и несколько эклектично, положения физической парадигмы сформулированы в десяти догмах «наивного физика» [16]. Самыми характерными установками этой парадигмы, пронизывающими и геологию и естествознание в целом, по нашему мнению, являются следующие: ведущая роль в исследовании принадлежит наблюдению, измерению и эксперименту и соответственно эмпирическим критериям истинности гипотез и теорий; индуктивный синтез — единственно научный путь построения знания, противопоставляемый объяснительным дедуктивным спекуляциям; основное назначение теоретических схем — систематизация имеющихся эмпирических данных и предсказание новых, а не объяснение реальности.

Названная физической, эта парадигма отражает не столько действительное методологическое кредо современной физики, сколько сложившееся представление о нем представителей дру-

гих наук, в том числе геологов, а также, как ни парадоксально, многих физиков *. Привычная геологам объективизация первичного материала, культ результатов наблюдений и традиционная мечта о приближении их к точным измерениям, возложение надежд обновления геологии на ЭВМ новых поколений или на все-ильные методы физики и химии, убежденность в однозначной объективной определенности геологических объектов, скепсис в отношении дедуктивных построений, «новаторская» замена интуитивной генетической геологии строгой описательной «наукой» и т. д. и т. п., — короче, все проявления геологического эмпиризма и индуктивизма прямо или косвенно связаны с особенностями все еще физической в своей основе парадигмы современной геологии.

Подчеркнув все еще, мы решаемся на утверждение, что господствовавшая и совершенствовавшаяся на протяжении почти трех веков физическая парадигма (которой наука обязана многими успехами) достигла своего потолка и буквально на наших глазах, так сказать, метасоматически замещается новой, еще не окрепшей, но более совершенной парадигмой — системной, или системно-тектологической. Системный подход, о котором выше утверждалось, что он — не наука и не теория, и есть росток этой новой общенаучной парадигмы.

По нашему мнению, методологические резервы формирующейся в наши дни теоретической геологии заключены в том благоприятном системно-тектологическом веянии, которое, по многим признакам, уже чувствуется в науках о Земле. Думается, что следующее обращение Д. Харвея к географам следовало бы адресовать всем естествоиспытателям, в частности всем геологам: «Какими бы ни были наши философские воззрения, с методологической точки зрения концепция системы совершенно необходима для построения удовлетворительного объяснения. Отказываясь от концепции системы, мы отказываемся и от одного из самых мощных средств, когда-либо предложенных для получения удовлетворительных ответов на наши вопросы о сложной окружающей действительности» [78, с. 462—463].

* «Современный физик, — указывает М. Бунге, — сколь бы в технических вопросах искусственным и критически настроенным он ни был, обычно догматически придерживается так называемого «кредо» наивного физика» [16, с. 18].

СТРАТИГРАФИЯ И ЛИТОЛОГИЯ

ПОНЯТИЙНАЯ БАЗА И МЕТОДЫ СТРАТИГРАФИИ

Вопросам стратиграфии, общим и прикладным, посвящено огромное количество работ, так как любое геологическое исследование слоистых толщ обязательно затрагивает стратиграфию. Мы не ставим себе цель выявить «самую правильную» процедуру стратиграфических исследований, наша задача — показать, какие из разрабатываемых направлений наиболее обоснованы логико-методологически и наиболее эффективны на практике. Существуют резко противоположные мнения о положении стратиграфии в системе геологических знаний. Одни признают стратиграфию важным в практическом отношении и развитым в теоретическом плане подразделением геологии, другие утверждают, что эта дисциплина не научная, а чисто техническая и в настоящее время даже излишняя. Эти крайние точки зрения, если несколько смягчить полемическую остроту, имеют основания.

В настоящее время вопросы стратиграфии рассматриваются в трех аспектах.

1. Подведение итогов практической работы — ретроспективный просмотр стратиграфических исследований и установление принципов, эффективных для дальнейших работ. Это направление выражается в составлении сводов правил — кодексов, выпущенных во многих странах [7]. Различия между ними, наиболее резкие между американским кодексом [38] и проектом международного [41], с одной стороны, и советским кодексом [33] — с другой, свидетельствуют о нетождественности методологических принципов, положенных в их основу. Это приводит к неодинаковой оценке выполненных работ. Подобный круг вопросов рассматривается и в некоторых специальных работах, например в монографии Г. П. Леонова [19].

2. Широкий научный подход, когда авторы, привлекая данные из различных областей знания, пытаются обосновать исходные положения стратиграфии [9, 10, 17, 18, 21, 22]. Однако сам путь решения — абсолютизация одного из принципов, взятого из другой области науки, делает сомнительной полную реализацию такого подхода (при важности отдельных его положений).

3. Формализация понятий стратиграфии, ее математизация, создание непротиворечивой системы понятий и собственного языка. Этот путь, в СССР впервые предложенный Ю. А. Ворониным для геологии вообще и стратиграфии в частности, весьма перспективен. Работы представителей этого направления [2, 3, 12, 13, 24, 26, 34] позволили внести четкость в стратиграфические понятия. Но, несмотря на принципиальную обоснованность такого подхода, развитие формально-логических принципов гро-

зит возможностью разрыва между представителями указанного направления и стратиграфами-практиками.

Мы попытаемся использовать данные всех трех направлений, взяв за основу комплекс понятий, определенный в работах Ю. А. Воронина и Ю. А. Косыгина.

ОБЪЕКТ, ПРЕДМЕТ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СТРАТИГРАФИИ

Точное определение стратиграфии дать трудно. Круг ее проблем устанавливается через известные логические категории.

Объект стратиграфии — слоистые толщи. Методика исследований не позволяет распространять стратиграфические наблюдения за пределы данного объекта.

Предмет стратиграфии — взаимоотношение слоистых толщ в пространстве.

Цель и задача — установление пространственных взаимоотношений слоистых толщ, реализуемое через расчленение и сопоставление разрезов. Это в основном задачи эмпирического плана [3]: наблюдение, интерполяция и экстраполяция, описание, расчленение, определение сходства, классификация, группирование, упорядочение.

Следует исключить из задач стратиграфии выяснение истории развития земной коры, воссоздание древних ландшафтов, изучение истории органического мира, так как они относятся к другим геологическим дисциплинам. Сформулированный в отечественном кодексе [33] тезис «Создание единой для всего земного шара естественной шкалы геологической хронологии» является частным случаем общей задачи.

В определении предмета и задач стратиграфии отсутствует понятие времени, обычно фигурирующее во многих формулировках (например, «установление пространственно-временных отношений» [21]), так как в стратиграфии оно является производным от взаиморасположения слоев и в строгом виде определено быть не может.

Разделение задач стратиграфии на местные и региональные, био- и литостратиграфические имеет прикладное, а не методологическое значение [24]. Видимо, можно разделить стратиграфию на специальную (прикладную) и общую (теоретическую), хотя круг вопросов общей стратиграфии невелик, методы, которыми она пользуется, взяты в основном из других дисциплин (математика, логика, биология) и взаимная связь теоретической и прикладной стратиграфии весьма велика.

К задачам общей стратиграфии, решение которых возможно на дедуктивной основе, допустимо отнести следующие: обоснование стратиграфических шкал и взаимоотношений между ними; обоснование применимости и ограничений разных методов

стратиграфических сопоставлений, их разрешающей способности; классификация стратиграфических тел и разработка принципов, способствующих ее стабильности.

ОСНОВНЫЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

Приводимые определения входят в систему понятий, выделенную Ю. А. Ворониным и Ю. А. Косыгиным [12, 13] под названием статической; эта система позволяет выдержать строгость, однозначность и непротиворечивость понятий (хотя и за счет их некоторого упрощения).

В самом названии рассматриваемой дисциплины фигурирует термин слой (*stratum*). Мы поддерживаем самое широкое понимание этого термина [12]: от слоев, выделенных по сейсмическим данным в пределах земного шара (земная кора, мантия), до самых мелких литологических подразделений. Слой (в трехмерном пространстве) — это пластина, внутренне единая по выбранному качеству, которым могут быть самые разнообразные свойства: от сейсмических скоростей до цвета пород; «каждая толща пород может быть разбита на слои более чем одним способом» [21].

Стратиграфические понятия, приводимые нами, основаны на более общих, предложенных Ю. А. Ворониным и Ю. А. Косыгиным [2, 3, 13, 24, 26].

Геологическое пространство — часть пространства, занятая Землей или какой-нибудь ее частью. Точка геологического пространства, где измерены значения рассматриваемой совокупности, — формальная точка. Множество формальных точек — геологическое пространство по заданной совокупности свойств. Так как совокупность определяется задачами исследования, обычно рассматривается специализированное формальное геологическое пространство: литологическое, биостратиграфическое и др. В связи с тем что не все точки пространства могут быть изучены, любое пространство относится к неполноопределенным.

Геологическая граница — любая поверхность, проведенная в геологическом пространстве в результате некоторой однозначной процедуры. Границы также являются специализированными: литологическими, сейсмическими, магнито-стратиграфическими.

Геологическое тело — часть статического геологического пространства, ограниченная геологической границей.

С учетом этих формулировок можно принять, что стратиграфическое подразделение — разновидность геологического тела, выделяемого по качествам, которые входят в предмет стратиграфии. Как и любое геологическое тело, стратиграфическое подразделение специализировано по качествам, поло-

женным в основу выделения: литологическое (литостратиграфическое), биологическое (биостратиграфическое) и т. д.

Стратиграфическое сопоставление — протягивание геологического тела (стратиграфического подразделения), выделенного по заданным качествам, за пределы разреза, где оно было установлено, т. е. это процесс, который называют идентификацией [26].

ПРИНЦИПЫ СТРАТИГРАФИИ

Принцип Стенона — «при образовании самого нижнего слоя ни одного из верхних слоев еще не существовало» [2]. Основанный на физической закономерности (действии гравитационных сил), этот принцип при общеизвестных его ограничениях является основным принципом стратиграфии, позволяющим определить вертикальную составляющую стратиграфического тела (подразделения).

Принцип Смита — «одинаковые слои содержат одинаковые ископаемые» [34]. В такой формулировке действие данного принципа ограничено. Лучше выразить его в той форме, которую В. А. Красилов [16] называет принципом Гексли, — «фаунистическая (флористическая) последовательность является повсюду одинаковой». Четкость фаунистической (флористической) сукцессии и относительная простота определения ископаемых позволили этому принципу найти широкое применение. Направленность и необратимость эволюции, что обычно приводят в обоснование этого принципа, не могут считаться строго доказанными, поэтому принцип должен полагаться постулативным.

Скорее методическим указанием, чем принципом, является принцип Грессли — «принцип фаций», утверждающий латеральную ограниченность геологических тел.

Принципы Стенона и Смита служат основными и определяющими для стратиграфии, остальные являются или производными от этих двух, или эмпирическими закономерностями с многочисленными исключениями [32, 34, 37]. Практические правила, используемые при расчленении и сопоставлении разрезов [34, 45], здесь не рассматриваются.

ПОНЯТИЕ ОБ ИСКУССТВЕННОСТИ, ЕСТЕСТВЕННОСТИ И НАИМЕНЬШЕМ СТРАТИГРАФИЧЕСКОМ ПОДРАЗДЕЛЕНИИ

Вопрос об искусственности и естественности стратиграфических подразделений — частный случай общей проблемы, обсуждаемой во всех науках, связанных с природными объектами. Общепринятое до недавнего времени положение, что задачей исследователя является установление природных закономерностей,

объектов и их границ, в принципе оправданно, так как все стратиграфы работают с природными объектами. Но последовательный вывод из этого положения, что должно существовать лишь одно «правильное» стратиграфическое подразделение, одна «правильная» граница, одна «естественная» классификация, наталкивается на непреодолимую трудность, так как критериев правильности не существует.

Не обсуждая важной философской проблемы «активной роли субъекта» [8], не решая вопроса о полной адекватности создаваемой модели (предмета) природному явлению (объекту), следует лишь отметить, что понять природное явление без создания модели (в любой степени приближения к объекту), видимо, нельзя. Поэтому любое выделенное геологическое тело является субъективным, «искусственным», отражающим задачу исследования. Таким образом, строго разграничить понятия искусственность и естественность нельзя, любые геологические тела естественны, так как отражают природные качества, и искусственны, так как выделение их основано на комплексе требований, предъявляемых исследователем. Соответственно объем установленных подразделений меняется в зависимости от качеств, положенных в основу выделения, целей и масштаба исследования.

Литостратиграфия. Широко распространено мнение [33] об однозначности выделяемых подразделений, в частности свит, соответственно делается вывод, что разное понимание данной свиты объясняется ошибками при стратиграфических работах. Действительно, при четкой реализации условий, положенных в основу выделения того или иного литостратиграфического тела, и последовательном применении этого критерия каждым исследователем данное подразделение должно пониматься однозначно, но изменение целей и масштабов исследования потребует выделения других тел.

Так, первыми исследователями отложений кайнозоя Северного Кавказа были выделены четко отличающиеся друг от друга литостратиграфические подразделения: темные глины эльбурмана, переслаивание алевролитов и песчаников свиты Горячего Ключа, кремнистые породы абазинской свиты, светло-серые мергели фораминиферовых слоев и черные глины майкопа. Последующие более детальные исследования заставили расчленить майкопскую свиту на семь частей, затем одна из этих частей, хадумская свита, была разделена на три части, а впоследствии верхний хадум — еще на две [30]. И хотя границы между этими частями менее четкие, они также рассматриваются как «естественные» подразделения.

Если свита, выделенная по определенным качествам, может быть расчленена более подробно, а это имеет место во всех случаях, возникает вопрос о наличии самого мелкого подразделения, которое будет внутренне неделимым и представит стратиграфический (в данном случае литостратиграфический) «квант». По литологическим признакам разрез может быть расчленен вплоть до слоев. Слой или сочетание слоев (цикл) и считается некоторыми авторами [9, 10, 36] элементарным подразделением. Но понятие слой,

как выше указано, является самым общим понятием, и, казалось бы, четко ограниченные слои делятся на еще более мелкие. Попытки внести генетическое обоснование — доказательство соответствия слоев календарному году (как это показано Де Геером для четвертичных варв) — не свидетельствует о том, что и другие слои являются годовыми и соответственно равными друг другу. Последовательно расчлняя разрез по литологическим показателям, следует признать, что предел определяется лишь размером зерна, т. е. стратиграфический «квант» по литологическим показателям (элементарное литостратиграфическое подразделение) отсутствует.

Принимая цикл за низшую единицу, многие исследователи пытались создать непротиворечивую, с их точки зрения, иерархическую шкалу, основанную на элементарной единице [9, 10, 36]. Однако неадекватность слоев (циклов), неоднозначные критерии их выделения, отсутствие элементарного слоя (цикла), субъективность группировок слоев (циклов) в более крупные единицы заставляют считать такую методику выделения стратиграфических подразделений неперспективной, хотя и имеющей определенный практический выход при сопоставлении в пределах одного типа разреза (структурно-фациальной зоны).

В работах И. В. Крутя [17, 18] обосновывается с общепило-софских позиций существование высших стратиграфических категорий, которые подчиняются собственным законам и распространены по всему земному шару. Так как никаких критериев проверки и выделения этих категорий не дано, то и доказать их наличие или отсутствие невозможно.

Таким образом, попытки создать непротиворечивую иерархическую систему литостратиграфических подразделений, основанную на элементарном литостратиграфическом «кванте» (слое, цикле), нельзя считать успешными.

Биостратиграфия. Принцип Смита демонстрирует важное значение палеонтологических объектов для стратиграфии, что было подчеркнуто Л. Долло [39], который выделил часть палеонтологии, применяемую для геологических целей, под названием биостратиграфии. Палеонтология — биологическая дисциплина, и на все ее подразделения должны распространяться биологические принципы, прежде всего систематика. Формально можно было бы не принимать этого во внимание и рассматривать ископаемые как составную часть пород с особой системой наименования. Однако это потребовало бы изменить всю биостратиграфическую процедуру, что труднодостижимо; кроме того, привлечение неонтологических данных открывает новые возможности для изучения палеонтологических объектов.

Применяя к ископаемым неонтологическую систематику, не следует забывать, что неонтологические критерии таксономических категорий — репродуктивная изоляция для вида [35] или содержание ДНК для более высоких категорий [20] — палеонтологам

недоступны и все выводы о систематическом положении и таксономическом ранге данной группы базируются в палеонтологии лишь на морфологических критериях. В силу этого палеонтолог может обсуждать проблему точной или неточной идентификации по морфологическим признакам, а не проблему правильности объема и таксономического ранга изучаемой группы. Поэтому приложение биологической систематики к ископаемым, изучаемым к тому же в биостратиграфическом аспекте, всегда носит несколько условный характер; актуалистический аспект здесь чисто внешний.

Биостратиграфия изучает последовательность фаунистических (флористических) остатков по разрезу. В первые годы применения палеонтологического метода ископаемые служили для характеристики отложений, выделенных по литологическим данным; в настоящее время такая методика применяется при изучении кайнозойских моллюсков, палеозойских брахиопод и др. Но уже с работ А. Опеля [42] основой биостратиграфических подразделений (зон) стали считать последовательность самих ископаемых вне зависимости от состава вмещающих пород. Это направление более логично и более эффективно на практике. Подобное разграничение принимается и американскими стратиграфами [41], фаунистическую (флористическую) охарактеризованность разреза они называют *assemblage zone*, а последовательность ископаемых по разрезу, устанавливаемую для биостратиграфических целей, — *range zone*.

Интервал вертикального распространения в разрезе наименьшей морфологической группы (вида) не является пределом точности биостратиграфического метода, как полагают некоторые исследователи [28]. Различия в вертикальном распространении отдельных видов по разрезу позволяют, комбинируя их совместную встречаемость (*concurrent-range zone*), установить сколь угодно мелкие подразделения. Так же как и в литостратиграфии, биостратиграфическое расчленение можно провести сколь угодно мелко, ограничиваясь лишь размерами самого объекта, т. е. и биостратиграфический «квант» не существует.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ВРЕМЯ И ХРОНОСТРАТИГРАФИЯ

Задача стратиграфических исследований, сформулированная выше, касалась лишь пространственного распространения слоистых толщ. Традиционным и в общем оправданным является признание вертикальной (ортогональной к слоистости) составляющей за временную составляющую, а вертикальной последовательности слоев — за временную последовательность. При всех стратиграфических определениях, приводимых нами, вертикальная составляющая во временную не трансформировалась, так как понятие времени не может быть строго сформулировано. К тому

же введение временной составляющей не изменяет и не расширяет стратиграфической задачи и не влияет на методику исследований. Эта составляющая учитывается лишь в одной категории стратиграфических подразделений, а именно в хроностратиграфических.

В последнее время многие исследователи пытались более строго определить понятие геологического времени, опосредовав его как биологическое [14, 17, 18, 21, 28] или ритмостратиграфическое [10]. Применялось понятие скорости сигнала, причем сигналом считалась миграция организмов [28] или климатическое изменение [10]; в качестве метрики времени использовалась продолжительность существования вида или литологического ритма (цикла). Эти концепции доказаны нестрого, а с практической стороны малоэффективны. Понятие времени в стратиграфии достаточно условно, и потому физическое время, реализуемое через радиохронологию, вполне удовлетворяет ее нужды.

Хроностратиграфическая шкала предложена американскими стратиграфами [43] как синоним единой (стандартной, международной) шкалы европейских стратиграфов. Понятие времени в хроностратиграфической шкале употребляется дважды: при интерпретации последовательности стратиграфических подразделений по разрезу и при обосновании границ, принимаемых за синхронные. Единая шкала, служащая эталоном, системой отсчета, к которой были бы привязаны стратиграфические подразделения других типов, является необходимой, а ее понимание как хроностратиграфической — наиболее удачным.

Хроностратиграфические границы, по определению условные, реальны при выделении, так как они фиксируют границы в реальном разрезе и при трассировании, причем в некоторых районах их находят реальными методами (в основном биостратиграфическими). Таким образом, хроностратиграфические границы существуют как идеал, реализуемый в каждом конкретном районе конкретными методами со свойственной им точностью. Отклонить хроностратиграфическую шкалу можно лишь с формальных позиций (что отмечено выше), именно поэтому несогласие с данной категорией стратиграфических подразделений тех стратиграфов, которые принимают концепцию геологического времени [6], не совсем понятно.

Принятие концепции синхронных плоскостей позволяет провести строгую классификацию подразделений единой шкалы: непрерывную (охват всех объектов), однозначную (отсутствие даже частичного совмещения одного объекта с другим) и иерархическую (высшие категории представляют собой группировку низших). Основной хроностратиграфической категорией признается ярус; в таком случае система — это группа ярусов, эратема — группа систем. Соответственно объем эратемы может определяться лишь с точностью до системы, а объем системы с точностью до яруса.

СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ

Стратиграфические границы, выделяемые по литологическим, палеонтологическим и другим данным, отражают смену определенных качеств. Для границ хроностратиграфических требования обычно более сильные. Отечественные стратиграфы признают эти границы единственными, отражающими естественный этап историко-геологического развития Земли [25]. Удовлетворить все эти требования невозможно. Если же понимать этап как часть разреза, отделенную резким изменением какого-то признака, то рекомендация брать наиболее четкую границу становится достаточно тривиальной. Сведение расчленения разреза к чисто классификационной процедуре может быть оправдано далеко не всегда. Любые стратиграфические границы выделяются с определенной целью, их главным качеством является четкость. Необходимость той или иной границы может обосновываться только соответствием границ в разных районах при данном способе выделения и прослеживания.

Фиксация типа необходима для любого стратиграфического подразделения, так как лишь соблюдение принципов выделения данной единицы и ее границ позволит протягивать установленное геологическое тело за пределы района его выделения.

Для литостратиграфических подразделений, разница качеств которых невелика и определяется цветом, текстурой, составом и другими не строго индивидуальными свойствами, необходим полный разрез, что в отечественной литературе называют стратотипом [33]. Так как при изменении качеств, положенных в основу выделения, литостратиграфическая единица теряет индивидуальность и переходит в другое подразделение, то стратотип может быть только один (как и биологический голотип).

Для биостратиграфических подразделений (зон), границы которых устанавливаются по разнице в морфологии определяющих палеонтологических объектов, необходим, как и указывал О. Шиндевольф [44], палеонтологический тип (или несколько типов в случае нескольких определяющих ископаемых) с указанием положения зоны в разрезе и районе ее выделения. Будет ли это голотип или палеонтологический объект, фиксируемый в данном разрезе, — вопрос процедурный, хотя в идеале это должен быть голотип.

Для хроностратиграфических подразделений, основывающихся на уже выделенных лито- и биостратиграфических единицах, главной целью является фиксация границ, поэтому здесь типом служит boundary stratotype [40, 41].

ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА В СТРАТИГРАФИИ

Как неоднократно указывалось [3], выяснение генезиса является одним из наиболее сложных вопросов в геологии, однако нет ни одного метода, который давал бы однозначный вывод об усло-

виях образования или происхождения. В стратиграфии, служащей основой для многих геологических исследований, генетические заключения должны быть сведены к минимуму. Биологическая систематика и хроностратиграфические подразделения имеют лишь незначительный генетический смысл (в основном из традиционных соображений), который не изменяет методики и задач стратиграфических исследований.

Рассмотрим некоторые генетические реконструкции, считающиеся необходимыми.

Филогенетическая систематика. О невозможности создать единственную правильную систематику, на что претендуют сторонники данного направления, написано выше. В конечном итоге любые выводы всех систематиков-палеонтологов базируются на морфологии. Положение в разрезе выделенных групп не может кардинально изменить сложившейся классификации, поэтому филогенетическая систематика вряд ли может быть реализована. Создание филогении отдельных групп (генезис как цель [11]) — особое направление палеонтологических исследований, имеющее весьма малое отношение к биостратиграфии.

Метод актуализма. Знание современных организмов, как методики их исследования, так и биологических закономерностей, предоставляет новые возможности для изучения палеонтологических объектов. Формализация биостратиграфической методики не означает отказа от достижений биологии, хотя перенос неонтологических данных на ископаемые объекты всегда связан с возможной неоднозначностью выводов и должен выполняться весьма осторожно. Чаще всего актуалистические выводы играют ограничительную роль: невозможно существование нескольких близких видов в одном биотопе (принцип Гаузе) или определенной морфологической группы в данном биотопе (например, хоботных в океане) и др. Некоторые актуалистические реконструкции могут быть полезны при стратиграфическом сопоставлении (выявление резких климатических колебаний или изменения солености бассейна), но только как дополнение к обычной методике.

Возможности применения метода актуализма в литостратиграфии еще более ограничены. Знание условий современного осадконакопления и отображения их в структуре и текстуре пород позволяет избежать возможных промахов при литологическом сопоставлении, но непосредственный перенос данных современной седиментации на ископаемый объект может привести к серьезным ошибкам из-за конвергенции текстурно-структурных показателей [4]. В общем случае генетические реконструкции, часто необходимые в запрещающем аспекте, весьма неоднозначны в прямом (определяющем) аспекте. При стратиграфических работах их следует использовать с максимальной строгостью и далеко не всегда.

ОПЕРАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фанерозой. Представляется уместным рассмотреть, как общие положения стратиграфии должны реализовываться на практике.

Первым этапом стратиграфических работ является выделение литостратиграфических тел с последующим протягиванием их по площади от разреза к разрезу, т. е. процесс прямого сопоставления [2]. На втором этапе выполняется выделение биостратиграфических тел и распространение их на изучаемую площадь, что обычно осуществляется также методом прямого сопоставления, при этом знание эталонной последовательности позволяет избежать возможных ошибок. Могут быть выделены и другие типы специализированных геологических тел: по минералогическим данным, электрическим, радиоактивным, магнитным и другим свойствам. В последние годы геомагнитные подразделения приобрели большое значение при сопоставлении океанических пород. Третий этап — сравнение полученных данных со стандартной, хроностратиграфической, шкалой — эталонное сопоставление [2].

Эти три этапа стратиграфических исследований обычно проводятся именно в такой последовательности, хотя и разобщены организационно. Литостратиграфические подразделения устанавливаются при геологической съемке, биостратиграфические — после палеонтологической обработки, а привязка этих подразделений к хроностратиграфической шкале выполняется при обобщении материалов на большой территории, составлении мелкомасштабных карт, специальных тематических работах.

Выделение стратиграфических единиц по разным качествам (специализированное геологическое тело) приводит в общем случае к несовпадению их объемов и границ. Несовпадение лито- и хроностратиграфических границ — факт, неоднократно описанный в литературе, как зарубежной [38, 40, 41, 43], так и отечественной [5, 37]. Несовпадение био- и хроностратиграфических границ, неоднократно отмеченное американскими геологами [40, 41], в нашей литературе освещено слабо, но частые споры о границах хроностратиграфических подразделений в некоторых районах являются косвенным доказательством подобных соотношений. Что касается смещения лито- и биостратиграфических границ, то оно исходит из самого принципа применения палеонтологического метода в стратиграфии.

Часто предъявляемые к съемочным работам требования выделять и картировать подразделения единой (хроностратиграфической) шкалы и только эти подразделения признавать за стратиграфические [6, 23, 33] следует считать нереальными (не говоря уже о нашем принципиальном несогласии с терминологией). На геологической карте должны фиксироваться геологические тела, выделенные по наиболее резким, четким и непрерывным признакам, т. е. литостратиграфические. Попытки картировать

хроностратиграфические подразделения приводят к тому, что литологическим границам бездоказательно придается синхронное значение, а так как именно хронологические заключения меняются чаще всего [29], то полученная карта будет представлять собой схему возрастной интерпретации на данном уровне знаний и должна изменяться при каждом новом факте.

В отдельных случаях, видимо, могут картироваться и биостратиграфические подразделения, это целесообразно при наличии литологически слаборасчленяемой толщи с большим количеством фаунистических (флористических) остатков. Невозможность сравнить био- и литостратиграфические подразделения непосредственно с единой, хроностратиграфической, шкалой (из-за бедности ископаемыми, присутствия лишь парастратиграфических групп, эндемичности фауны) является основанием для создания хроностратиграфической шкалы ограниченного (провинциального) пространства. В отечественной литературе подразделения такой шкалы принято именовать горизонтами [33], что представляется более оправданным, чем использовать термины единой шкалы, хотя сам термин «горизонт» не очень удачен из-за его многозначности (полисемии).

Для привязки региональных подразделений к хроностратиграфической шкале большое значение имеют радиологические и магнитные данные.

Докембрий. Рассмотренная выше методика, которая относилась к фанерозойской части геологического разреза, применима и для неметаморфизованных (платформенных) докембрийских отложений. Стратиграфия метаморфических докембрийских толщ более сложна, хотя первоначальное расчленение разреза по петрографическим качествам с выделением петрографически специализированных тел осуществляется в общем так же, как и фанерозойских пород, примером чего может служить стратиграфия нижнедокембрийских отложений Алданского щита [27]. Но явления метаморфизма, метасоматоза, гранитизации затрудняют последовательное применение стандартной стратиграфической методики. Сравнение с единой, хроностратиграфической, шкалой проводится непосредственно по петрографическим качествам, степени метаморфизма, геохимическим и радиологическим данным. Неопределенность всех этих показателей и отсутствие такого эффективного метода фанерозойской стратиграфии, как палеонтологический, являются причиной несовершенства стратиграфии метаморфических толщ докембрия.

Квартер. Особое место занимает стратиграфия четвертичных отложений, где принято выделять интерпретационные (генетические) подразделения: климатические, генетических типов, условий образования. Неупорядоченное состояние стратиграфии четвертичных отложений подтверждает широко распространенное мнение [24, 34] о трудностях реализации генетического подхода. Видимо, можно полагать, что и к четвертичным отложениям применима

стандартная стратиграфическая методика, подтверждением чему являются работы по Печорской синеклизе [1].

Важно отметить, что рассмотренный порядок стратиграфических исследований обычно осуществляется на практике (по крайней мере, для фанерозоя), хотя и не всегда строго.

4

СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ, ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Под литологией в широком смысле обычно понимается наука об осадочных породах, которая призвана изучать весь комплекс вопросов, связанных как с исследованием вещества осадочных пород на геохимическом и минералогическом уровнях, так и с анализом процессов седиментогенеза, реализующихся в различных климатических и структурно-морфологических условиях. Предметом исследования литологов, как известно, являются горные породы осадочного происхождения. При этом решаются задачи достаточно широкого спектра: классификационные; ретроспективного плана, нацеленные на восстановление условий осадконакопления по характеристикам вещественного состава пород; связанные с реконструкцией процессов преобразования пород (стадиальный анализ); по исследованию процессов слое- и текстуорообразования и многие другие.

Одной из основных общетеоретических проблем литологии является разработка методов, позволяющих реконструировать условия осадконакопления геологического прошлого. Методологическую базу таких методов составляет принцип актуализма, а базисом экстраполяции, регулирующим перенос знаний о современных процессах осадкообразования на породы прошлых геологических эпох, являются достижения седиментологии*. Поэтому седиментологию можно рассматривать как своеобразную основу литологической науки, по крайней мере тех ее разделов, которые прямо или косвенно связаны с реконструкцией процессов седиментогенеза. Кроме того, седиментологические предпосылки могут быть положены в основу решения и традиционных общегеологических задач, таких как расчленение разрезов осадочных толщ, реконструкция амплитуд прогибания земной коры (на базе метода

* Заметим, что седиментология часто рассматривается как синоним литологии. Однако мы отделяем ее от литологии, понимая под седиментологией науку, занимающуюся как изучением современных процессов осадкообразования, так и реконструкцией механизма седиментогенеза геологического прошлого.

мощностей) и т. д. При этом седиментологические основы дают возможность количественно оценить то влияние, которое оказывают на реализацию процесса основные факторы седиментогенеза, и, что самое главное, при этом допускается однозначная интерпретация получаемых результатов.

Становится очевидным, что в связи с успешным изучением современного морского осадкообразования как в условиях шельфа, так и за его пределами, широким развитием лабораторных методов анализа процессов седиментогенеза, интенсивным проникновением в геологические исследования методов точных наук (гидромеханики, физики и математики) повышается точность, а главное, надежность реконструкций процессов седиментогенеза геологического прошлого. Седиментология встает на самостоятельный путь развития, являясь своеобразным перекидным мостиком между науками, изучающими современные процессы, и науками геологического цикла в их традиционном понимании. Знания о механизме процессов, происходящих в основном на стадии седиментогенеза, важны не только для создания общей теории литогенеза. Они имеют и огромное практическое значение, поскольку с их помощью удается вскрыть и сущность процессов, ведущих к формированию пористости, трещиноватости и других свойств, которые в свою очередь являются важнейшими характеристиками при поисках грунтовых вод, нефти, газа, угля, каменной соли и других полезных ископаемых.

Решение задач, базирующихся на седиментологических предположениях, должно сводиться к последовательной реализации следующей схемы.

1. Формулировка задачи, т. е. указание заданных величин или эмпирических соотношений и тех параметров, которые требуется оценить.

2. Выбор модели, объясняющей механизм формирования интересующей исследователя характеристики.

3. Определение начальных и граничных условий задачи, вытекающих из выбранной модели.

4. Решение поставленной задачи в требуемом виде.

5. Проверка согласия решения с фактическим материалом.

Очевидно, что основные принципиальные трудности, которые могут возникнуть при реализации данной схемы, скрыты в первом пункте, поскольку задача должна быть поставлена таким образом, чтобы результатом ее решения была величина (или функция, описывающая поведение этой величины), которая имела бы однозначно интерпретируемый образ в пределах исследуемого объекта. Иными словами, найденная характеристика процесса должна однозначно отображаться в соответствующем морфологическом признаке объекта исследования. В противном случае считают, что «построенная модель не реализуется на природный объект» и, как следствие этого, она теряет познавательную ценность.

Все обсуждаемые нами задачи в той или иной мере базируются на седиментологических предпосылках, хотя не все являются задачами чистой седиментологии.

ФАЦИАЛЬНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПОРОД

При фациальном анализе осадочных образований, нацеленном на выяснение обстановок и условий осадконакопления, важнейшая роль принадлежит гранулометрическому составу терригенных пород, поскольку особенности распределения обломочных частиц по размерам (фракциям) являются, по мнению большинства литологов, индикаторами особенностей динамической структуры процесса седиментации или среды осадконакопления в палеогеографическом смысле. Поэтому представляется интересным решение «обратной» задачи — по набору эмпирических характеристик восстановить условия либо обстановки осадконакопления.

Покажем неоднозначность решения задачи в том случае, когда она реализуется только исходя из гранулометрического состава пород на эмпирическом уровне, т. е. перебором статистических характеристик фракционного состава без аналитической увязки этих характеристик с динамикой седиментационных процессов.

Основой современных методов фациального анализа по данным гранулометрии служит предположение о том, что разные комбинации статистических характеристик фракционного состава терригенных пород отражают в широком смысле условия осадконакопления. Некоторые геологи делают еще более жесткие предположения: разные эмпирические функции распределения частиц по размерам соответствуют разным фациальным условиям формирования осадка [25]. Если такого рода предпосылки, проверявшиеся в большинстве случаев только на современных осадках, справедливы, то решение указанной выше обратной задачи не должно вызывать ни принципиальных, ни технических затруднений. Однако практика фациальных реконструкций убедительно доказывает, что данная проблема решается не так просто, как может показаться на первый взгляд; более того, до сего дня нет твердой уверенности в том, что она вообще имеет решение.

Рассмотрим прежде всего следующий вопрос: от чего зависит или, точнее, от чего должен зависеть вид эмпирической функции распределения частиц по размерам. Геологи, пытаясь дать ответ на этот вопрос [21, 41, 48, 51, 54, 62], исходили главным образом из практически фиксируемых распределений гранулометрии осадка, отложенного в разных с гидродинамических позиций обстановках осадконакопления. Показательно в этом отношении высказы-

вание В. Н. Шванова [41, с. 75]: «К логарифмически нормальному распределению приближаются отложения, подвергшиеся переработке в воздушной или водной среде, — аллювиальные, эоловые и морские». Подобная интерпретация универсальности логнормального закона была бы допустима, если при исследованиях зависимости эмпирических функций распределения гранулометрического состава осадка от условий седиментации соблюдалось бы требование представительности выборок. Под «представительностью» понимается, естественно, не число образцов в выборке, а соответствие опробованных условий осадконакопления экстраполяционным заключениям. X

Некоторые геологи склонны считать, что характер распределения частиц по размерам определяется не процессами транспортировки и седиментации, а лишь дроблением исходного кластического материала, причем кратковременное (одноактное) дробление якобы приводит к распределению Вейбулла * [62], а неоднократно повторяющиеся акты дробления и истирания частиц — к логнормальному распределению. Л. Китлман [54] даже рекомендует использовать степень отличия от распределения Вейбулла как меру сортированности осадка вблизи источника сноса. Дроблению отводится решающая роль [40, 61] и при объяснениях устойчивых особенностей распределений, например, дефицита на рубеже песчаной и алевритовой фракции (0,05 мм).

Действительно, дробление, если его понимать в достаточно широком смысле как процесс разрушения материнских пород источника сноса с последующей чисто механической обработкой кластического материала (истирание и окатывание частиц в процессе переноса, обкальвание угловатых зерен и т. п.), играет существенную роль при формировании характерных особенностей эмпирических кривых распределения частиц по размерам, но не менее важное значение имеют и чисто седиментологические факторы.

Приведем два характерных примера.

Предположим, что седиментация реализуется в спокойной среде, строго соответствуя законам Стокса, Аллена и Риттингера [36], т. е. в зависимости от диапазона размеров осаждающихся частиц. В данном случае, если фиксировать время и рассматривать осадок как конечный продукт седиментации, то распределение частиц по размерам очевидным образом не будет зависеть от законов седиментации, оно будет определяться лишь процессами, имевшими место на предшествующих осаждению стадиях формирования гранулометрического облика осадка. В данной ситуации открывается возможность содержательной интерпретации эмпирической функции распределения. И если она оказывается логнор- X

* В дальнейшем тексте под распределением Вейбулла понимается функция, которую литологи привыкли именовать распределением Розин — Рамлера.

мальной или вейбулловой, можно утверждать, что фракционная структура осадка оформлялась в результате процессов дробления в смысле А. Н. Колмогорова [17] (логнормальное распределение) или в результате одноактного дробления в смысле Дж. Беннета [47] (распределение Вейбулла).

Во втором примере предполагается, что на осаждающиеся порции частиц действуют факторы подвижной среды седиментации (течения, волнение и т. д.). При одних и тех же размерах частиц кривые распределения могут быть разными. В этом случае важными факторами оказываются морфометрическая характеристика частиц (угловатость, уплощенность, окатанность и т. д.) и гидродинамические показатели среды седиментации (скорость и направление течений, коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена и т. д.).

При расшифровке типа кривой распределения частиц по размерам предпочтение той или иной модели может быть отдано только с учетом палеогеографических реконструкций бассейна осадконакопления, которые осуществляются по другим характеристикам пород, например текстурным. Поскольку седиментация в неподвижной среде (отстойнике) представляет собой явление значительно более редкое, чем осадконакопление в среде с активным гидродинамическим режимом, то и седиментологическая трактовка кривых распределения в целом должна быть более предпочтительной.

Таким образом, выясняется своеобразное противоречие, имеющее место при седиментологической интерпретации granulometрии осадочных образований, аппроксимируемой конкретной функцией распределения частиц по размерам. Это противоречие заключается в следующем. Предполагается (и не без оснований), что функция распределения фракционного состава осадка отражает прежде всего динамику седиментационных процессов, преобразующую исходное распределение частиц, поступающих в бассейн, в то состояние, которое фиксируется в ископаемом осадке. Поэтому казалось бы естественным искать аппроксимационную функцию распределения, исходя из анализа конкретных факторов седиментации, с последующим сравнением теоретически полученной и эмпирически наблюдаемой функций. Тогда седиментологические реконструкции, базирующиеся на granulometрии осадка, приобрели бы реальную основу, контролируемую исходными теоретическими предпосылками модели. Однако на практике почему-то всегда реализуют лишь эмпирическую согласуемость выборочных распределений размеров частиц с той или иной теоретической кривой, ограничиваясь чаще всего логнормальным законом. При таком подходе седиментологическая трактовка распределений частиц по размерам, а тем более сравнение их эволюции [54], строго говоря, незаконны.

Остановимся далее на оценке фациальной значимости granulometрии осадочных образований.

Будем различать два уровня генетических реконструкций. Первый — это воссоздание обстановок осадконакопления по информации, доставляемой фракционным составом пород, т. е. выявление неких характеристик (чаще всего статистических), которые призваны «разделять», к примеру, морские прибрежные и речные, речные и эоловые, эоловые и морские типы отложений. Второй уровень — это реконструкция условий седиментации, которая должна реализоваться также на базе статистических характеристик гранулометрического состава пород. Иными словами, второй уровень предполагает нахождение критериев различия в гидро(аэро)динамике процессов седиментации, т. е. отделение, к примеру, потоковых отложений, сформированных течениями с низкой эффективной плотностью, от осадков мутьевых потоков.

При такой формулировке генетических задач, соответствующих различным этапам фациальных реконструкций [31], требуется дать четкие и недвусмысленные ответы по крайней мере на три вопроса.

1. С каким из двух этапов фациального анализа (с точностью до обстановок или с точностью до условий в гидродинамическом смысле) более точно сопоставляются эмпирически наблюдаемые различия гранулометрического состава пород?

2. Можно ли найти диагностирующие различия на эмпирическом уровне или требуется разработка теоретических моделей, описывающих оформление гранулометрического состава пород как функцию от каких-то признаков обстановок либо от характеристик гидродинамики среды накопления осадков?

3. Будут ли найденные различия в любом из двух отмеченных смыслов в равной мере справедливыми как для современных осадков, так и для терригенных пород геологического прошлого?

Показательно, что почти никто из геологов ни разу не усомнился в правомочности самой идеи детальных фациальных реконструкций на основе статистик эмпирических распределений гранулометрического состава пород, считая, по-видимому, что эта идея не вызывает сомнений. Поэтому усилия геологов ориентировались в основном на поиски неких универсальных статистических характеристик фракционного состава, призванных «разделять» осадки разных типов. Итогом такого рода работ явились многочисленные рецепты по построению генетических диаграмм, которые, как правило, оправдывали себя только на материале предложенного их автора и подвергались жесточайшей критике со стороны других геологов, выдвигавших взамен свои более «совершенные», «точные», «обоснованные» диаграммы, которые, разумеется, учитывали уже «правильную» комбинацию статистических параметров.

Десятки работ посвящаются длительным спорам о формах представления результатов гранулометрических анализов (φ-шкала Крамбейна, γ-шкала Батурина, метрическая шкала, которые должны характеризовать распределение зерен «по весу»

или «по счету»), а также о формах обработки результатов анализа и способах расчета статистических характеристик. В то же время практически отсутствуют исследования, в которых эмпирические данные по распределению размеров частиц были бы аналитически увязаны с конкретной вероятностной схемой седиментогенеза, приводящей к определенному теоретическому закону распределения, не противоречащему фактическому материалу. Можно сослаться лишь на декларативные высказывания [52], но не на конкретные разработки.

Рассмотрим более внимательно первый вариант генетических диаграмм, в которых предлагаются комбинации статистик, разделяющих осадки разных фаций в палеогеографическом смысле, т. е. обстановки осадконакопления. Г. Фридман [51] считал возможным отличать речные пески от прибрежных (морских или озерных) по асимметрии $\hat{S}k$ и стандартному отклонению $\hat{\sigma}$ эмпирических распределений гранулометрического состава, в то же время полагая, что столь же хорошо данные отложения диагностируются по асимметрии и коэффициенту сортировки S_p . В более поздней публикации [52] он значительно расширил потенциальные возможности генетических диаграмм такого плана, предложив уже пять комбинаций статистик. По У. Колдайку [56], речные отложения от прибрежных песков можно отделить на генетических диаграммах, построенных по асимметрии и сортировке (или стандарту, или эксцессу $\hat{E}k$). Если добавить, что те же типы отложений Л. Б. Рухин [32] предлагал разделять по медианному размеру Md зерен и сортировке, выраженным уже в метрической шкале, то решение задачи окончательно запутывается.

Не лучше обстоит дело с разделением речных и эоловых песков, хотя для них различия в статистиках эмпирических распределений размеров частиц должны быть выражены наиболее четко. Г. Фридман [50] предлагал разделять их по среднему размеру \bar{x} зерен и стандарту или по среднему размеру и асимметрии. В то же время К. Мэйсон и Р. Фолк [58] считают, что для различения этих песков достаточно сравнить коэффициент сортировки. Наиболее путаные рекомендации, что впрочем вполне естественно, даются по разделению прибрежных песков и эоловых отложений [50, 53, 58].

Были попытки применить для решения этих задач и многомерный статистический анализ (метод дискриминантных функций и факторный анализ), причем с учетом сразу многих характеристик эмпирических кривых распределения (\bar{x} , $\hat{\sigma}$, $\hat{S}k$, $\hat{E}k$ и т. д.). Но и они в целом оказались безуспешными [3, 45, 53, 64, 67].

Таким образом, дать определенный ответ на вопрос, как же разделять по статистикам эмпирических распределений фракционного состава разные генетические типы отложений (с точностью до обстановок осадконакопления), невозможно. Многие геологи резонно заключили [32, 41, 64, 65], что сами по себе значения

статистических характеристик распределения частиц по размерам не являются основанием для уверенного разделения фашиально разных типов осадков, так как, по всей вероятности, решающее влияние на характер распределения частиц оказывают местные географические и гидродинамические условия среды седиментации, но не сама среда. Поэтому можно заключить, что фашиальный анализ с точностью до обстановок осадконакопления, базирующийся на различиях статистик кривых распределения фракционного состава, не дает и в принципе, очевидно, не может дать надежных результатов генетического разделения этих обстановок.

Г. Уолкер [68] на материале более 1600 гранулометрических анализов пирокластических пород показал, что распределения размеров частиц с точностью до типа кривой совпадают независимо от того, оседают частицы из воздуха или из водной среды. Этот результат эмпирически подтверждает, что фракционная структура осадка в основном оформляется под влиянием процессов седиментации в широком смысле, включая перемыв, переотложение и истирание частиц в процессе их транспортировки водными или воздушными потоками. Разным механизмам процесса должны соответствовать и разные кривые распределения размеров частиц независимо от того, в какой среде (воздушной или водной) или обстановке (речной, прибрежно-морской и т. д.) реализуется конкретный механизм седиментации.

Это положение легло в основу генетических диаграмм, в которых реконструируются уже не обстановки, а условия осадконакопления, т. е. делается упор на характер процесса седиментации, а не на обстановки, в которых данный процесс мог иметь место. Наглядной иллюстрацией может служить диаграмма Р. Пассеги [59], которая в литературе обычно именуется генетической диаграммой CMd . Величина C означает квантиль 1%, который должен характеризовать как бы максимальную грузоподъемность потока; Md — медианный размер зерна, т. е. квантиль 50%. Позднее было предложено [60] вместо одной диаграммы CMd строить четыре: CMd , FMd , LMd и AMd , где F , L и A — весовое содержание в анализе зерен размером меньше соответственно 125, 31 и 4 мкм. С помощью диаграмм Р. Пассеги многие геологи [16, 49, 63, 66 и др.] пытались разделить единый (с палеогеографических позиций) осадок на группы, соответствующие разным механизмам переноса, и отложения кластического материала, и в целом ряде случаев получили неплохие результаты.

Существенное влияние на характер распределения частиц по фракциям оказывают два фактора: интенсивность обработки кластического материала в процессе его транспортировки до конечных водоемов стока и длительность пребывания осадка в зоне активного воздействия гидродинамических факторов среды седиментации. В зависимости от комбинации этих условий гранулометрия как бы фиксирует в себе либо гидродинамику подвижной среды, переносящей осадок в зону

аккумуляции, либо гидродинамику среды седиментации, либо, наконец, характер разрушения (дробления) материнских пород источника сноса. Поэтому достоверность фациального анализа по данным гранулометрии является прежде всего функцией от достоверности наших знаний о значимости воздействия каждого фактора или их комбинаций на конечное распределение частиц по фракциям.

Остановимся на вопросе о представительности выборок, по которым в конечном счете строятся конкретные диагностирующие процедуры. Накопленный к сегодняшнему дню опыт диагностики обстановок осадконакопления по статистикам эмпирических распределений фракционного состава осадка показывает, что данная задача более или менее успешно решается только на так называемом региональном уровне. Имеется в виду достаточно надежное опробование конкретных обстановок (прибрежные зоны конкретного моря, аллювий конкретных рек), на базе которого вырабатываются рекомендации, относительно успешно решающие задачу. И не случайно найденные комбинации статистик оказываются не в состоянии разделить те же виды обстановок, но опробованных на других конкретных представителях.

Действительно, если бы мы хотели найти статистики, которые разделяли бы прибрежно-морские и речные пески, и для этого сформировали обучающие выборки таким образом, что прибрежно-морскую зону характеризовали пробы с побережий Финского и Бискайского заливов и Тихого океана (в районе Камчатки), а речную обстановку — пробы из рек Амазонка (в нижнем течении), Енисей (верховья) и Смоленка (Ленинград), то совершенно ясно, что кажущаяся общность обстановок осадконакопления полностью погасилась бы различиями в гидродинамике их конкретных представителей и четких рекомендаций по диагностике данных типов отложений получить бы не удалось.

Однако и в том случае, если задача диагностики осадконакопления ставится корректно, т. е. разделяются только конкретные представители диагностируемых обстановок без экстраполяции полученных рекомендаций, решение может осложняться целым рядом факторов. Прежде всего это касается в р е м е н и, в течение которого осадок находился в сфере активного воздействия среды седиментации до его окончательного захоронения. Ясно, что один и тот же гранулометрический облик осадка может сформироваться как в относительно спокойной среде, но за достаточно продолжительный срок, так и в среде с активным гидродинамическим режимом за сравнительно короткий промежуток времени. Восстановить же временной фактор, или, как его иначе называют, ф а к т о р у н а с л е д о в а н н о с т и, практически невозможно. Этот фактор оказывается главным препятствием и при перенесении рекомендаций, полученных в процессе изучения современных осадков, на породы геологического прошлого, а только в этом аспекте и имеют реальный смысл все усилия по генетическому разделению песков на гранулометрическом уровне.

Рассмотрим следующий пример. Предположим, что речной песок, вынесенный в прибрежную зону моря в период весеннего половодья, достаточно быстро оказался захороненным под вышележащими морскими отложениями. Если не проводить фациальных реконструкций по комплексу признаков, а ограничиться лишь данными гранулометрических анализов, то может оказаться, что точки, соответствующие речным пескам, на генетических диаграммах действительно попадут в поле речных отложений, тогда как в разрезе они фиксируются как типично морские образования без видимых переходов к континентальным осадкам.

При реконструкции не обстановок, а условий осадконакопления, которые могут быть инвариантными множеству обстановок в палеогеографическом смысле [29, 55], задача диагностики решается более успешно. Однако и в данном случае имеется целый ряд факторов, которые снижают надежность получаемых результатов. Прежде всего это касается выделения так называемых эталонных условий и разработки критериев, с помощью которых можно соотносить конкретную выборку с теми или иными условиями осадконакопления.

Таким образом, фациальная значимость гранулометрии осадочных образований целиком определяется этапностью фациальных исследований (палеогеографический или седиментологический этапы), с одной стороны, и корректностью постановки задач фациальной диагностики осадков в рамках каждого этапа — с другой. На сегодняшний день можно с уверенностью говорить о том, что общие (глобальные) рецепты реконструкции обстановок осадконакопления не дали, да в принципе и не могли дать надежных результатов.

Более или менее достоверные рецепты касаются реконструкции обстановок на региональном уровне, когда опробуются и затем сравниваются на эмпирическом материале сходные в структурно-морфологическом и, как следствие этого, в гидродинамическом отношении условия накопления осадков. Однако сравнение современных обстановок имеет смысл только опорной базы при реставрации геологического прошлого. С учетом же фактора унаследованности, оценить меру влияния которого на гранулометрию осадков в каждом конкретном случае не представляется возможным, актуалистический подход, являющийся методологической основой таких исследований, оказывается неприемлемым и фациальный анализ на базе гранулометрии превращается в систему неконтролируемых методик, результаты которых в равной мере могут быть подтверждены или опровергнуты новым фактическим материалом, обработанным по той же системе признаков.

Перспективным представляется седиментологический этап фациальных исследований, когда конкретный эмпирический тип распределения частиц по размерам является следствием конкретной же седиментологической модели, поскольку в данном случае в модель могут быть включены значения определенных характеристик среды (скорость течения, коэффициент турбулентности и т. д.), существенно влияющих на механизм седиментации

в исследуемом бассейне. Кроме того, открывается возможность численного решения задач палеогеографических реконструкций с получением выводов о глубинах палеобассейнов, скоростях палеопотоков и других характеристиках, т. е. закладываются теоретические основы динамической палеогеографии, в понимании А. В. Хабакова [37].

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЕНАКОПЛЕНИЯ КАК ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ЛИТОЛОГИИ, ЛИТОСТРАТИГРАФИИ И ТЕКТОНИКИ

Прикладные задачи, для решения которых требуется либо реконструкция динамических условий осадконакопления, либо восстановление первоначальной мощности накопленных осадков, либо, наконец, оценка длительности формирования фиксированной части разреза, представляющей интерес для стратиграфии, опираются на вполне конкретные представления об условиях формирования слоистой толщи, так как от них зависит интерпретация полученных результатов. Несмотря на то что проблему образования слоистости геологи признают одной из кардинальных в теоретической геологии, в ее решении найдены пока лишь самые общие ответы. Это заключается не столько в неразработанности схем слоенакопления применительно к отдельным типам слоистых образований, сколько в том, что постановка и решение проблемы в самом общем и притом неформализованном виде не дают возможности, опираясь на принятую схему процесса, получать новые характеристики, которые оказались бы интересными не только в теоретическом, но и в практическом отношении.

В настоящее время существуют два подхода к объяснению условий формирования слоистости осадочных отложений: тектонический, с помощью которого удается реконструировать закономерности в образовании главным образом осцилляционно-миграционной слоистости, и седиментологический, дающий разумную интерпретацию условий, приводящих к формированию слоистости мутационного типа (в терминологии Н. Б. Вассоевича [7]).

Осцилляционно-миграционная слоистость вне зависимости от фациальных условий образуется в результате миграций береговой линии бассейна седиментации, управляемых тектоническими осцилляциями. При этом предполагается, что при отрицательных движениях земной коры происходит накопление слоя фиксированного литологического состава, а при положительных — размыв. Правда, размыву в буквальном смысле может быть подвержен далеко не каждый слой, но для нас важным является сам факт сокращения первоначально накопленной мощности и не столь существенно, происходит уменьшение мощности в результате размыва или в результате уплотнения под действием веса накапливающейся массы осадка.

Подчеркнем, что в каждый элементарный период слоеобразования [27] формируется промежуточная мощность i -го слоя. Слой с номером i может быть частично или полностью размыт и по прошествии нескольких элементарных периодов слоеобразования, но если этого не произошло, то предполагается, что в дальнейшем i -й слой не размывается и окончательно закрепляется в разрезе, т. е. процесс реализует окончательную, или зафиксированную, мощность слоя. Такая трактовка процесса явилась геологической основой вероятностной модели слоенакопления, которую разработал академик А. Н. Колмогоров [18]. В дальнейшем эта модель была доведена до уровня конкретных расчетных формул и использована в самых разнообразных геологических ситуациях [6, 11, 27]. Ее подробное изложение и вывод всех необходимых расчетных зависимостей можно найти в работах С. И. Романовского и Ю. В. Адаменко [1, 2, 28]. Поэтому здесь мы ограничимся кратким изложением основных результатов, не публиковавшихся ранее, а также дадим (без вывода) основные формулы, которые можно использовать для оценки меры стабильности слоенакопления (вероятности окончательного сохранения в разрезе слоя конечной мощности), а также формулы некоторых характеристик, связанных с временными оценками процесса.

Определим слоенакопление как вероятностный процесс. Введем в рассмотрение координатное пространство (Δ, U) , где $\Delta = E^T$, множество индексов T будем трактовать как математический аналог времени [24]. В этом пространстве заданы функции $\delta_t(h)$ — промежуточные мощности слоев. Координату δ_t в фиксированный момент времени t назовем элементарным событием. Тогда функция $\delta \equiv \delta_t(h)$ в пространстве элементарных событий будет трактоваться как случайная величина, имеющая функцию распределения $G = P(\delta \leq h)$. Таким образом, имеем семейство случайных величин $\{\delta_t(h), t \in T\}$. Единичные значения $\delta_t(h)$ в пространстве (Δ, U) образуют бесконечную последовательность, в которой случайные величины $\delta_t(h)$ предполагаются независимыми, одинаково распределенными и имеющими положительное математическое ожидание [18]. В классификации Дж. Дуба [13] слоенакопление относится к классу случайных процессов с взаимно независимыми значениями и дискретным временем. Из этого следует, что слоенакопление полностью задается одномерными функциями распределения случайных величин $\delta_t(h)$, составляющих этот процесс.

Кинематика процесса описывается следующим образом. В течение произвольного отрезка времени $[t_{n-1}, s_n]$ формируется «слой» мощностью ξ_n . Затем за время $[s_n, t_n]$ он размывается на глубину η_n . Таким образом, за полный элементарный цикл слоеобразования $[t_{n-1}, t_n]$ реализуется «слой» мощностью $\delta_n = \xi_n - \eta_n$.

А. Н. Колмогоров [18] далее рассматривал суммы вида

$$\zeta_n^{(r)} = \delta_n + \delta_{n+1} + \dots + \delta_{n+r},$$

которые в силу того, что математическое ожидание $M\delta_n > 0$, при неограниченном возрастании индекса r стремятся к $+\infty$, но при любом конкретном значении номера r их точные нижние грани конечны, т. е.

$$\varphi_n = \inf_{(r)} \{ \xi_n^{(0)}, \xi_n^{(1)}, \dots, \xi_n^{(r)}, \dots \}.$$

Получили последовательность случайных величин φ_n . По А. Н. Колмогорову, задача сводится к вычислению вероятности события $p = p(\varphi_n > 0)$ и условного распределения вероятностей при гипотезе $\varphi_n > 0$. Величина p означает вероятность сохранения слоя в разрезе при реализации данной схемы процесса и интерпретируется нами как мера стабильности процесса слоенонакопления.

Введение этой меры позволяет «восстанавливать» размытые суммарные мощности в анализируемых разрезах и строить гипотетические разрезы, т. е. такие, которые наблюдались бы при отсутствии факторов, сокращающих промежуточные мощности слоев. Кроме того, если анализу подвергается осцилляционно-миграционная слоистость, появляется реальная возможность представить разрезку полного спектра колебательных движений земной коры. Достаточное количество разрезов одного бассейна седиментации и палеофациальное районирование позволяют получить количественную оценку степени устойчивости динамической системы осадконакопления по площади для разных фациальных зон [11], а при наличии в разрезах синхронных пачек, различающихся стратиграфически [30], — проследить эволюцию седиментологической обстановки во времени.

Как уже отмечалось, весь комплекс вопросов, связанных с практической реализацией схемы слоенонакопления А. Н. Колмогорова, подробно изложен в работе Ю. В. Адаменко и С. И. Романовского [2]. Здесь лишь отметим, что существо задачи по нахождению меры стабильности слоенонакопления заключается в том, что необходимо сопоставить функции $f(x)$ и $f^*(x)$ так, чтобы они в некотором смысле (например, в смысле наименьших квадратов) наилучшим образом приближались друг к другу [$f(x)$ — нормированная на единицу функция, теоретически описывающая процесс слоенонакопления, которая находится в результате решения уравнения А. Н. Колмогорова [18] при определенной (заданной заранее) плотности вероятности $g(x)$; функция $f^*(x)$ характеризуется гистограммой окончательных (зафиксированных) мощностей в разрезе].

Другими словами, задача сводится к процедуре отыскания таких значений параметров функции $f(x)$, чтобы построенная на их основе функция была сопоставима с гистограммой наблюдаемых в разрезе мощностей слоев.

Практически вероятность сохранения слоя находят следующим образом.

1. Строят функцию $f^*(x)$, т. е. гистограмму зафиксированных мощностей слоев.

2. Находят параметры a и σ функции $f(x)$ при ее сопоставлении с функцией $f^*(x)$.

Если величина $g(x)$ задана в виде смещенной экспоненциальной плотности [28], то

$$f(x) = g(x) / [1 - t \exp(-t)], \quad (4.1)$$

где $t = a\sigma$.

Если $g(x)$ — нормальная плотность, то

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left\{ \exp\left[-\frac{(\bar{x}-\bar{a})^2}{2}\right] + \exp\left[-\frac{(\bar{x}-2\bar{a})^2}{2}\right] \times \right. \\ \left. \times F_1(\bar{x}) + \exp\left[-\frac{(\bar{x}-3\bar{a})^2}{2}\right] \cdot F_2(\bar{x}) \right\}, \quad (4.2)$$

где

$$F_1(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right); \quad F_2(\bar{x}) = \frac{1}{2\sqrt{3}} \Phi\left(\frac{x\sqrt{6}}{3}\right) + \\ + \frac{1}{2\pi\sqrt{3}} \int_0^{\pi/6} \exp\left(-\frac{x^2}{12\sin^2\varphi}\right) d\varphi;$$

$\bar{a} = a/\sigma$; $\bar{x} = x/\sigma$; x — абсцисса, при которой вычисляется конкретное значение $f(x)$; $\Phi(z)$ — интеграл вероятностей.

Вся процедура по нахождению параметров a и σ с заранее заданной точностью алгоритмизирована. Программа «Слой-1» осуществляет перебор значений a и σ в определенных диапазонах с фиксированным шагом до получения минимальной погрешности сопоставления функций. С шагом 0,1 программа реализуется на БЭСМ-4 за 58 сек.

3. Вычисляют вероятность сохранения в разрезе слоя конечной мощности по одной из трех формул.

Если $g(x)$ — смещенная экспоненциальная плотность, то

$$\hat{p} = 1 - t \exp(-t). \quad (4.3)$$

Если $g(x)$ — нормальная плотность, то

$$\hat{p} = \begin{cases} 0,52 + 0,296(a/\sigma) & \text{при } 0 \leq a/\sigma \leq 1,2; \\ 0,021 + \text{th}(a/\sigma) & \text{при } a/\sigma > 1,2 \end{cases} \quad (4.4)$$

или

$$\bar{p} = 1 - \Phi(a/\sigma) \text{ при } a/\sigma \geq 1,5. \quad (4.5)$$

Для завершения теоретических разработок, связанных с исследованием вероятностной структуры слоенакопления, необходимо рассмотреть ряд вопросов, касающихся временных характеристик процесса. Иначе говоря, если при получении вероятностных критериев динамики слоенакопления изучалась проекция

траектории процесса на ось мощностей, то при решении задач, касающихся оценки длительности процесса, будет рассмотрена проекция траектории процесса на ось времени. Здесь мы также опираемся на кинематическую схему слоенакопления в изображении А. Н. Колмогорова [18]. Будем решать следующую задачу.

Процесс слоенакопления протекает с единичной скоростью и представляется в виде неограниченного во времени чередования этапов накопления и последующего сокращения промежуточных мощностей слоев. Определим величину δ_n как шаг процесса. Требуется оценить число шагов, за которое траектория процесса слоенакопления выйдет на фиксированный заранее уровень N . Дополнительно предполагаем, что ординаты накоплений ξ_n и размывов η_n распределены по экспоненциальному закону с параметрами μ и λ соответственно, причем $\mu > \lambda$. Из постановки задачи ясно, что

$$\sum_{k=1}^m \xi_k - \sum_{k=1}^m \eta_k = N \quad (4.6)$$

и задача сводится к отысканию числа m , при котором выполняется это равенство.

В первом приближении оценку для m найдем из условия $M\delta_m = N$. Так как $\delta_k = \xi_k - \eta_k$ для $k = \overline{1, m}$, то с учетом, что мощности ξ_k и η_k распределены по показательному закону, имеем

$$m = \frac{N}{1/\lambda - 1/\mu}. \quad (4.7)$$

Так как $\mu > \lambda$, то $1/\lambda - 1/\mu > 0$ и $m \geq N$. Поскольку случайные величины ξ_k и η_k взаимно независимы, то распределения $\xi = \sum_{(k)} \xi_k$ и $\eta = \sum_{(k)} \eta_k$ найдутся как m -кратная свертка распределений $f(\xi_k)$ и $f(\eta_k)$, $k = \overline{1, m}$. Согласно теореме Феллера [35] эти распределения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} p(\xi) &= [\lambda^m \xi^{m-1} / (m-1)!] e^{-\lambda \xi}, \quad \xi \geq 0; \\ p(\eta) &= [\mu^m \eta^{m-1} / (m-1)!] e^{-\mu \eta}, \quad \eta \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Введем в рассмотрение новые случайные величины

$$t_m = \sum_{(k)} \xi_k + \sum_{(k)} \eta_k \quad \text{и} \quad \delta_m = \sum_{(k)} \xi_k - \sum_{(k)} \eta_k$$

и найдем плотность их совместного распределения $p_m(t_m, \delta_m)$. Предварительно, используя независимость ξ и η , напишем сразу

$$p(\xi, \eta) = \begin{cases} \frac{\lambda^m \mu^m \xi^{m-1} \eta^{m-1}}{[(m-1)!]^2} \exp(-\lambda \xi - \mu \eta) & \text{при } \xi \text{ и } \eta \geq 0; \\ 0 & \text{в остальных квадрантах.} \end{cases} \quad (4.9)$$

В конечном итоге нам требуется найти распределение времени, в течение которого траектория процесса выходит на уровень N , с тем чтобы, используя это распределение, оценить «среднее время» формирования выборочной совокупности из N слоев. Итак, ищем распределение $\sum_{(k)} t_k$ при условии, что $\sum_{(k)} \delta_k = N$. В выражении (4.9) перейдем к новым переменным

$$t_m = \xi + \eta; \quad \delta_m = \xi - \eta.$$

Тогда

$$\xi = (1/2)(\delta_m + t_m); \quad \eta = (1/2)(t_m - \delta_m).$$

Якобиан преобразования $|J| = 1/2$. В координатах $\{t_m, \delta_m\}$ плотность совместного распределения $P(\xi, \eta)$ примет вид

$$P_m(t_m, \delta_m) = \frac{1}{2^{m-1}} \cdot \frac{\lambda^m \mu^m (t_m^2 - \delta_m^2)^{m-1}}{\{(m-1)!\}^2} \times \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\lambda + \mu)t_m + (\lambda - \mu)\delta_m]\right\}. \quad (4.10)$$

Искомая плотность распределения времени, затраченного процессом слоенакопления, чтобы выйти на уровень N , определится следующим образом:

$$g_m(N) = \int_0^{\infty} P_m(t_m, N) dt_m. \quad (4.11)$$

На основе принципа максимального правдоподобия заключаем, что искомое количество шагов m может быть определено из условия

$$\max_{(m)} g_m(N). \quad (4.12)$$

Таким образом, поставленная задача в принципе решена. Формулы (4.7) и (4.12) дают «среднее время» выхода траектории процесса на фиксированный уровень, поскольку в предположении о единичной скорости слоенакопления в схеме А. Н. Колмогорова такие понятия, как «число шагов процесса» и «время выхода процесса на определенный уровень за какое-то число шагов», совпадают. Однако эти формулы нельзя использовать на практике, поскольку принципиально неопределимыми остаются величины μ и λ . Требуется установить связь m с вероятностью \hat{p} сохранения слоя, тогда задача может быть решена до конца.

Как уже отмечалось, из соотношения (4.7) следует, что величина m , т. е. промежуточные мощности слоев, может оказаться равной числу N в том и только том случае, когда вероятность сохранения слоя в разрезе в точности равняется единице. Отсюда ясно, что $m = f(\hat{p})$. Ранее было показано [27], что вероятность

сохранения слоя может быть представлена на основе классического подхода к исчислению вероятностей:

$$\hat{p} = N/(N + k), \quad (4.13)$$

где N — количество слоев, сохранившихся в разрезе за фиксированное число элементарных периодов слоеобразования; k — количество слоев, размытых в процессе осадконакопления за то же число периодов.

Ясно, что $m = N + k$ или с учетом выражения (4.13)

$$m = N/\hat{p}. \quad (4.14)$$

Это основная расчетная формула для оценки условной продолжительности (пока еще не в смысле времени) образования фиксированной совокупности N слоев. Для придания выражению (4.14) действительного смысла «времени» необходимо учесть среднюю скорость осадконакопления \bar{v} .

Тогда

$$t = H / (\hat{p}\bar{v}), \quad (4.15)$$

где $H = \sum_{i=1}^N h_i$ — суммарная мощность отложений.

С учетом того, что для разных типов пород скорости осадконакопления различны, запишем окончательно

$$t = (1/\hat{p}) \left[(1/v_1) \sum_{i=1}^k h_i + (1/v_2) \sum_{j=1}^l h_j + \dots + (1/v_m) \sum_{s=1}^n h_s \right]. \quad (4.16)$$

Ясно, что $k + l + \dots + n = N$; $v_1 + v_2 + \dots + v_m = \bar{v}N^*$, где N^* — число литологических разностей пород, фиксируемых в исследуемом разрезе.

Достижения океанологии позволяют надеяться, что значения скорости \bar{v} могут быть установлены с достаточной для решения практических задач точностью, следовательно, и более точно, чем традиционными методами, можно оценить время формирования интересующей геолога части разреза (цикла, свиты и т. д.).

Задачи, которые можно решать на базе вероятностной теории слоенакопления, соотносятся с принятой трактовкой процесса и вытекающими из нее характеристиками по-разному.

Одни задачи являются непосредственной практической реализацией вероятностной схемы процесса и решаются на основе приведенных здесь формул. К этой группе относятся задачи, связанные с реконструкцией динамики слоенакопления, с исследованием изменения меры стабильности слоенакопления во времени и в пространстве, с анализом спектра колебательных движений земной коры.

Другая часть задач в своей методической первооснове также базируется на результатах вероятностной теории слоенакопления.

Однако для непосредственного применения в практических целях эти результаты должны быть увязаны с характеристиками слоистой толщи таким образом, чтобы вычисленная на их основе величина (например, мера длительности формирования фиксированной части разреза) могла быть проинтерпретирована в терминах решаемой геологической задачи.

Третья группа прикладных задач использует вероятностную схему слоенакопления лишь при интерпретации полученных результатов. Сами же результаты доставляются методами, которые формально не выводятся из общей вероятностной теории процесса, по крайней мере, при этом не используются ее методы. Однако исходные теоретические предпосылки обоих подходов совпадают, а различия состоят лишь в аналитическом аппарате решения конкретных задач. К этой группе в первую очередь можно отнести задачи ритмолитологического анализа, т. е. выявление скрытых закономерностей (в частности, периодического характера) в строении разрезов.

ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В СТРОЕНИИ РАЗРЕЗОВ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ

Геологам хорошо известен факт регулярной повторяемости некоторого комплекса пород в разрезах осадочных толщ, что определяет особый тип их строения, получивший в геологической литературе наименование «циклического», «ритмичного» и т. п. В одних случаях, как, например, в разрезах флишевой, молассовой и угленосной формаций, характер «внутреннего» строения разрезов виден, что называется, «на глаз», в других закономерности чередования пород более сложные и без применения специальных методов выявить какие-либо устойчивые парагенезисы пород не удастся. Следует отметить, что проблема выявления скрытых закономерностей в строении геологических разрезов имеет не только теоретическое, но и практическое значение, поскольку путем изучения упорядоченности стратифицированных осадочных образований расшифровывается ход процессов осадконакопления и обусловленное им размещение полезных ископаемых.

Геологи со времен Н. А. Головкинского и И. Вальтера, т. е. с последней трети XIX в., прочно усвоили мысль, что вертикальные колебательные движения земной коры предопределяют направленные смещение фациальных зон накопления осадков, порождающее в свою очередь слоистое строение осадочных толщ.

Если различные генетические типы слоистости вне зависимости от обстановок и условий их образования реализуются только под действием тектонических и седиментологических (в широком смысле) факторов, то класс процессов, приводящих к ритмичности и цикличности в строении разрезов осадочных толщ, значительно шире, и интерпретация условий возникновения закономерной

повторяемости определенной группы пород в разрезе во многом зависит от формационной принадлежности исследуемой толщи и от характера (масштаба) выделенной цикличности. В настоящее время более или менее однозначное толкование получила цикличность тех осадочных толщ, в которых она, с одной стороны, проявлена с максимальной отчетливостью, а с другой — определяет в значительной мере генезис самих осадочных образований, по поводу которого у геологов нет серьезных разногласий. С этих позиций целесообразно выделить цикличность озерных ленточных глин, а также флишевой и угленосной формаций. Подчеркнем, однако, что этими типами отложений не исчерпываются не только виды цикличности, которую можно зафиксировать в геологических разрезах, но и ее интерпретация. Действительно, климатический фактор, который является определяющим при формировании ленточной сезонной слоистости, прослеживается и в циклах более высокого порядка, фиксируемых в тех же озерных ленточных глинах [19, 22, 43, 46].

Остановимся на интерпретации выявляемой периодичности разных порядков. Отчетливо фиксируются две тенденции: 1) к глобальной интерпретации, при которой периодичность (точнее, квазипериодичность) разных порядков связывается с внешними (астрономическими) факторами; 2) к локальной интерпретации, при которой установленная на материале конкретных разрезов цикличность не экстраполируется за пределы данного бассейна осадконакопления и лишь в редких случаях рассматривается как «местное отражение» цикличности общепланетарного масштаба.

Мы не имеем возможности подробно иллюстрировать обе эти тенденции. Отметим лишь, что астрономический подход к интерпретации цикличности геологических явлений, фиксируемой в разрезах осадочных толщ, можно считать оправданным только при трактовке короткопериодических процессов длительностью 1; 11 и 22 года. Что же касается астрономической периодичности более высокого порядка, то ее связь с цикличностью геологических событий не доказана, более того, нельзя считать установленным и сам факт цикличности высоких порядков (десятки и сотни миллионов лет).

Природа циклического строения разрезов теснейшим образом связана с условиями формирования отдельных генетических типов осадочных толщ. Поэтому общая (глобальная) теория цикличности, так же как и общая теория слоенакопления, может быть создана только на базе признаков, общих для всех фациально-морфологических типов отложений, характеризующихся циклическим строением. Разумеется, теория не объяснит всех возможных механизмов, генерирующих цикличность, но она позволит вычислять и предсказывать характеристики цикличности, общие для всех литогенетических типов отложений. При современном состоянии геологической науки наибольший интерес представляют методы анализа и интерпретации «внутренних» закономер-

ностей в строении разрезов, т. е. таких, которые не выявляются при визуальном анализе материала, но тем не менее имеют место практически во всех типах отложений.

В сжатом виде цель ритмолитологического анализа может быть сформулирована как задача выделения периодических гармоник разного порядка из общей числовой последовательности, характеризующей колебания опробуемого признака по разрезу. Разложение на гармоники кривой, аппроксимирующей эту последовательность, является весьма трудоемкой процедурой, что определяется не столько техническими факторами, сколько содержательной стороной задачи, т. е. наличием и обоснованностью априорных сведений о периодической структуре исследуемой числовой последовательности, которые чаще всего не выводятся из модельных соображений, а просто постулируются.

Следует отметить, что кривые, характеризующие колебание признака по разрезу, каким бы способом они ни строились, не могут рассматриваться как результат ритмолитологического анализа. В лучшем случае по этим кривым можно судить о закономерностях изменения опробуемой характеристики, а сами кривые использовать для корреляции разрезов в пределах единого бассейна седиментации.

В общем случае исследование кривой, описывающей колебание по разрезу исследуемой характеристики, реализуется методами гармонического анализа. При этом возможны два варианта.

1. Период функции, к которой приближается исходная кривая, известен; тогда гармоники эмпирической последовательности выявляются путем разложения этой функции на заданном интервале в ряд Фурье.

2. Период колебаний и частотные характеристики исследуемой кривой неизвестны; тогда эти параметры восстанавливаются методами выявления скрытых периодичностей.

Первый вариант гармонического анализа с технических позиций менее трудоемок. Однако интерпретация получаемых результатов вызывает наибольшие затруднения, поскольку практически любая числовая последовательность может быть приближена на конечном интервале сходящимся рядом Фурье, выявленные же при этом гармоники могут не иметь никакого отношения к характеру исследуемого материала. Действительно, периодичность можно обнаружить в выборке из таблицы случайных чисел, в случайной последовательности номеров рулетки, в выборке номеров из телефонной книги и т. п. [69]. При втором варианте гармонического анализа период колебаний опробуемой характеристики по разрезу восстанавливается в ходе самого исследования. В наиболее полном виде логика подобного подхода изложена в работе Л. Д. Кноринга и В. Н. Деча [15].

Как известно [33], в процедурном отношении задача выявления скрытых закономерностей сводится к отысканию такого преобразования $F \{f(x)\}$, которое реализует близость эмпирической

кривой, построенной по точкам разреза, и аппроксимирующей ее функции. Наиболее распространенной мерой близости является средний квадратический функционал вида

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m [y_k(x) - \hat{y}_k(x)]^2, \quad (4.17)$$

который в случае оптимального преобразования $F\{f(x)\}$ достигает минимального значения.

Кроме различных модификаций гармонического анализа для выявления скрытых закономерностей в строении разрезов осадочных толщ используют и методы, заимствованные из теории случайных процессов. Наибольшее распространение получили методы исследования марковских [9, 57] и авторегрессионных свойств процесса осадконакопления [8]. К комплексу методов ритмолитологического анализа можно отнести и метод простого обзора числовых совокупностей [20], который представляет собой статистическую модификацию метода Бюи-Балло. Модификация заключается в том, что в метод обзора введена так называемая пороговая частота, оценивающая значимость экстремумов периодограммы.

Остановимся более обстоятельно на разрабатываемом нами ином подходе к решению задач ритмолитологического анализа.

В любой осадочной толще (в пределах одной из стратиграфических единиц, например свиты) всегда повторяется ограниченный набор пород, обычно не превышающий трех-пяти наименований. Эти породы чаще всего образуют закономерные сочетания (породные ассоциации [39]), которые могут быть выделены визуально при полевой послонной документации или специальными методами при детальном фациально-циклическом анализе разрезов. Полные циклы, включающие все характерные для данной свиты или серии породы, фиксируются далеко не всегда. Обычно они в значительной мере редуцированы, что выражается либо в полном отсутствии регрессивной части цикла (флишевая формация), либо в выпадении из разреза отдельных слоев в пределах как трансгрессивной, так и регрессивной части элементарного цикла (угленосная формация).

Если бы исследуемый разрез состоял только из полных, или идеальных, для данного генетического типа отложений циклов осадконакопления, то ритмолитологический анализ такого разреза не вызывал бы ни принципиальных, ни технических затруднений. Однако в реальной ситуации даже для разрезов, имеющих отчетливое циклическое строение, разная степень редуцированности каждого цикла значительно осложняет ритмолитологический анализ, ибо периодическая компонента процесса оказывается затупеванной случайными колебаниями кривой, аппроксимирующей разрез; выделение же этой компоненты оказывается весьма трудоемкой задачей.

Геологической основой предлагаемого нами метода является представление о том, что идеальный цикл осадконакопления определяет собой максимальный (для данной толщи) период колебательных движений земной коры. Поскольку реальная цикличность отличается от идеальной для данного конкретного разреза, постольку и периодичность колебательных движений оказывается затусшеванной вторичными явлениями и отклонениями самого процесса слоенакопления от идеального режима. Поэтому задачей данного метода ритмолитологического анализа является оценка отличий структурно-литологических характеристик разреза от тех, которые приписаны идеальному, или эталонному, циклу. Итогом оценки становится послойная характеристика разреза численными значениями принятой меры сравнения; кривая, аппроксимирующая эти значения в пределах исследованной части разреза, отражает практическую реализацию процесса слоенакопления, генерировавшего формирование данной толщи с периодичностью, которая задается в масштабе идеального цикла. Следующим, вполне естественным этапом является восстановление периодичности на разрезе методами гармонического анализа.

Запишем формально исходные предпосылки задачи. Пусть каждому слою приписаны две характеристики: арифметизированный код породного состава и мощности. Набор пород, слагающих конкретный разрез, считается постоянным в пределах свиты или серии. Тогда в результате изменения мощностей отдельных слоев разрез можно записать в виде бесконечной последовательности $a_1, a_2, \dots, a_N, \dots$. Назовем идеальным циклом подпоследовательность $a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+m}$ длины $(m+1)$, стоящую на i -м месте. Закрепив далее за этим циклом характеристики породного состава и мощности, снятые с конкретного анализируемого разреза, получим фиксированный идеальный цикл, или эталон, $c_0 c_1 \dots c_m$ длины $(m+1)$. Будем утверждать, что произошло событие A_i , если в бесконечной последовательности $a_1, a_2, \dots, a_N, \dots$ на i -м месте появился этот фиксированный идеальный цикл. Последовательность событий $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ будет удовлетворять следующим условиям [34].

1. При любых i_1, i_2, \dots, i_n вероятность $P \{A_{i_1+s} A_{i_2+s} \dots A_{i_n+s}\}$ не зависит от s . Иными словами, априорная вероятность появления эталона на любом шаге не зависит от того, с какого места исходной последовательности мы начинаем анализ.

2. При любых i_1, i_2, \dots, i_n и j_1, j_2, \dots, j_k события $B = A_{i_1} A_{i_2} \dots A_{i_n}$ и $C = A_{j_1} A_{j_2} \dots A_{j_k}$ независимы, если $i_s - j_l > m$ для всех $s = 1, 2, \dots, n$ и $l = 1, 2, \dots, k$. Это условие означает, что возможность появления эталона в определенном месте последовательности существенно зависит лишь от его длины.

Таким образом, имеем цепь зависимых событий, в которой события, разделенные m или более шагами, независимы. Задача, которую мы ставим, формулируется следующим образом.

Задана арифметизированная последовательность слоев $\{a_{kh}^{(t)}\}$, охарактеризованных, как уже отмечалось, индексами: k — индекс породного состава (код породы); h — индекс мощности слоя; $t = 1, 2, \dots$ — скользящий индекс, фиксирующий номер начального члена последовательности. Пусть эталон представляется в виде $\{\bar{a}_{kh}\}$. Требуется при каждом t оценить меру μ_t соответствия эталону конечного набора слоев из арифметизированного разреза. Мера соответствия, очевидно, должна учитывать порядок сравнения, т. е. сопоставлять каждый слой эталона с соответствующим ему по номеру слоем арифметизированного разреза, и, кроме того, быть нормированной, т. е. $0 \leq \mu_t \leq 1$. Этим двум требованиям удовлетворяет следующая мера соответствия:

$$\mu_t = \frac{2}{m} \left(\sum_{i=1}^{m/2} \frac{x_i}{x_i^2 + 1} + \sum_{i=1}^{m/2} \frac{y_i}{y_i^2 + 1} \right), \quad (4.18)$$

где $x_i \equiv \bar{k}_i/k_i$; $y_i \equiv \bar{h}_i/h_i$.

Когда $\bar{k}_i \rightarrow k_i$ и $\bar{h}_i \rightarrow h_i$, то $\mu_t = 1$. При $x_i \rightarrow 0$ и $y_i \rightarrow 0$ мера μ_t также приближается к нулю, определяя тем самым предельное несоответствие последовательности слоев в разрезе при данном индексе t эталонному циклу осадконакопления.

Несколько слов о кодировании пород. Кодирование, необходимое при арифметизации разрезов, предусматривает ранжирование пород по одному из выбранных заранее признаков; в результате породы выстраиваются в упорядоченную по этому признаку последовательность, т. е. получается своеобразный параметрический ряд. При выборе ранжирующего признака следует исходить из двух положений. Признак, во-первых, должен быть пригодным для любых в генетическом отношении осадочных образований, во-вторых, иметь однозначное численное выражение, допускающее столь же однозначную физическую интерпретацию.

Из всех литологических признаков этим требованиям в первую очередь отвечает гранулометрический состав осадков. Гранулометрическая характеристика в явном (для терригенных и терригенно-карбонатных пород) или неявном (для пород карбонатного, кремнистого, галогенного рядов) виде присутствует в самих наименованиях осадочных пород. Поэтому кодирование названий пород заключается в приписывании каждому слою того или иного численного значения кода, исходя из выбранной для кодирования гранулометрической характеристики. В качестве такой характеристики предлагается использовать гидравлическую крупность W частиц.

Породы	Код (10W, мм/с)
Конгломераты, известняки галечные	6400
Гравелиты, известняки гравийные	3020
Песчаники грубо- и крупнозернистые	1180

Песчаники среднезернистые	365
Песчаники мелко- и тонкозернистые, известняки песчаные	110
Алевриты песчаные	25,5
Мергели песчаные	15,6
Алевриты	10,6
Алевриты глинистые	6,3
Алевриты известковые (доломитовые), известняки алевритовые	3,7
Глины (аргиллиты) песчаные	1,1
Глины (аргиллиты) алевритовые	0,85
Глины (аргиллиты), сланцы	0,42
Глины (аргиллиты) карбонатные	0,28
Мергели, мергели глинистые	0,08
Известняки глинистые	0,008
Известняки и доломиты, галогенные породы, силициты, угли, латериты, бокситы, фосфориты	0,002

СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕТОДА МОЩНОСТЕЙ

Теоретические основы метода мощностей, являющегося одним из распространенных способов палеотектонических и палеофациальных реконструкций, предполагают учет специфических особенностей осадочного процесса как функции тектонического развития бассейна седиментации и смежных с ним областей суши. Эти особенности реализуются как в характере распределения мощностей пород, так и в их фациальной изменчивости в вертикальном и латеральном направлениях. Говоря о тектоническом развитии бассейна осадконакопления, мы отнюдь не считаем, что только тектонический фактор оказывает решающее влияние на характер (механизм) формирования мощностей. Для целого ряда осадочных образований (турбидиты, ленточные глины) темп и направленность процесса осадконакопления определяются, как известно, факторами седиментологическими, т. е. в конечном счете гидродинамическим режимом конкретной зоны аккумуляции. Поэтому представляется разумным некоторое переосмысление теоретических основ метода мощностей, поскольку при этом открывается возможность более широкой интерпретации результатов исследований [14, 44], которая, как нам кажется, не должна ограничиваться только тектоникой.

Метод мощностей традиционно связывается с именем В. В. Белоусова [4, 5], который не только использовал этот метод для реконструкции тектонической истории Большого Кавказа, но и дал ему строгое для своего времени седиментологическое обоснование. Согласно концепции В. В. Белоусова, мощность отложений в фиксированной точке бассейна седиментации тождественна глубине погружения дна бассейна в этой точке. Такое утверждение обосновывалось тем, что амплитуда прогибания дна бассейна осадконакопления всегда (за достаточно продолжительный отрезок

времени) оказывается компенсированной осадконакоплением. Отсюда следовал вывод, что все осадочные образования геологического прошлого — это отложения зоны шельфа. Кроме того, схему В. В. Белоусова дополняли представления о «базисе действия волн» и «пространстве возможного накопления», которые придавали всей концепции стройность и логическую завершенность.

Компенсационная теория осадконакопления В. В. Белоусова применительно к методу мощностей предписывала единственно возможную интерпретацию результатов исследований — точное соответствие распределения мощностей структурному плану, мощности к тому же должны быть эквивалентными амплитуде прогибания дна бассейна. Идея всеобщей компенсации прогибания земной коры накоплением осадочного материала долгое время господствовала в научной и учебной литературе. И только всесторонний и обстоятельный анализ геологических ситуаций, содержащийся в капитальной работе А. Л. Яншина и Р. Г. Гарецкого [44] и допускающий различную интерпретацию результатов, полученных с помощью метода мощностей, положил конец идее всеобщей компенсации и открыл широкое поле деятельности для разработок на новом уровне теоретических (в частности, седиментологических) основ анализа мощностей.

В. Е. Хаин [38] в свое время указывал, что сравнение карт равных мощностей практически ничего не дает для оценки скорости погружения земной коры за выбранный временной интервал, а именно скорость погружения является той мерой, с помощью которой можно перейти к оценке степени компенсированности осадконакоплением погружений дна бассейна седиментации. Кроме того, остается не до конца ясной связь между скоростями погружения коры и осадконакопления. Соотношения между этими величинами могут быть самыми разнообразными, что и создает предпосылки перекомпенсированного осадконакоплением прогибания зоны аккумуляции.

Важнейшим чисто качественным критерием, позволяющим оценить степень компенсации погружения земной коры, является литологический состав исследуемых толщ. Хорошо известны рифовые массивы, а также паралическая и лимническая угленосные формации, которые служат своеобразными седиментологическими реперами, всегда однозначно указывающими на полную компенсацию погружения дна бассейна. Столь же хорошо известны вулканогенные образования, наличие которых в разрезе, наоборот, значительно осложняет оценку степени компенсации, ибо они формируются на самых разных гипсометрических уровнях. Не надежны в этом отношении также молассовые и соленосные толщи; осадки, заполняющие эрозионные впадины, и т. п. Поэтому в каждом конкретном случае задача решается традиционными геологическими методами, учитывающими и тектоническую

позицию бассейна, и литологический состав отложений, и характер фациальных переходов осадков вкrest простираения бассейна седиментации.

Что же касается самого метода мощностей, то в последние годы его модификации касались в основном приемов обработки фактического материала и введения различных поправок, учитывающих постседиментационную историю осадков. Так, А. И. Животовская [14] предлагает сравнивать не сами мощности синхронных осадков, а их отношение — «динамическую мощность». В. В. Шершуков [42] считает, что целесообразней строить графики «темпов тектонических движений»; И. В. Дербиков и Е. И. Бенько [12] настаивают на том, что лучшим показателем тектонической активности является стандарт мощности. С. Н. Григорьев [10] вносит свою модификацию в метод мощностей, предлагая строить карты «относительной мощности». Очевидно, что подобных нововведений можно предложить бесчисленное множество. Все они будут по своему представлять исходную информацию, что приведет к получению массы новых выводных характеристик, не вносящих ясности в интерпретацию результатов метода и, что самое главное, не затрагивающих его седиментологических основ.

В нашу задачу входит рассмотрение тех седиментологических аспектов метода, из которых вытекают вполне определенные количественные оценки. Среди факторов, которые влияют на оценку суммарной величины вертикальных перемещений дна бассейна седиментации, в первую очередь следует выделить размыв осадков вследствие активизации гидродинамики среды отложения, а также уплотнение осадка, в результате которого слои пород глинисто-алевритового ряда существенно изменяют свои начальные мощности.

Суммарная амплитуда H вертикальных тектонических колебаний за исследуемый отрезок времени складывается из двух величин: начальной, или разуплотненной, мощности H_1 осадочной толщи и суммарной мощности H_2 размывших слоев за тот же временной интервал.

Остановимся более обстоятельно на оценке величины H_1 . Начальная мощность слоя изменяется как под влиянием уплотнения осадка в результате растущей нагрузки последовательно формирующихся слоев, так и в ходе диагенетических процессов. При диагенезе существенно реконструируется вещественный каркас, происходит механическое перераспределение кластических частиц, результатом которого в ряде случаев является образование микрослоистости, существенно меняются условия протекания физико-химических процессов вследствие повышения давления накапливающихся осадков, уменьшения порового пространства, отжимания иммобилизованной воды и т. д. Чем более дисперсным был осадок, тем сильнее сказываются на нем перечисленные процессы и тем больше сокращается его начальная мощность.

В самом общем виде связь между начальной δ и конечной h мощностью слоя может быть выражена в виде

$$h = k\delta, \quad (4.19)$$

где k — коэффициент сокращения начальной мощности слоя.

Очевидно, что $k \leq 1$. Чтобы оценить значение k , необходимо знать коэффициент пористости породы в начальный момент приложения нагрузки m' и в момент стабилизации гравитационной компрессии m'' . Тогда $k = f(m', m'')$, а

$$h = \delta - \Delta\delta. \quad (4.20)$$

Из курса механики грунтов известно, что уплотнение слоя

$$\Delta\delta = \{(m' - m'')/(1 + m')\} \delta. \quad (4.21)$$

Подставив это значение в уравнение (4.20), получим связь конечной и начальной мощности слоя:

$$h = \{(1 + m'')/(1 + m')\} \delta \quad (4.22)$$

или

$$\delta = \{(1 + m')/(1 + m'')\} h = k'h. \quad (4.23)$$

Величину k' вслед за Ю. Н. Приходько [23] будем именовать коэффициентом усадки. Численные значения k' для пород разного литологического состава могут быть определены экспериментально или косвенными методами, например путем наблюдений над конкреционными образованиями.

Численное значение суммарной мощности H_2 размытых отложений за фиксированный временной интервал может быть установлено путем оценки вероятности \hat{p} сохранения в разрезе слоя конечной мощности на основе вероятностной схемы слоенакопления А. Н. Колмогорова [18].

Таким образом, суммарная амплитуда вертикальных тектонических движений дна бассейна седиментации по данным метода мощностей может быть представлена в виде

$$H = \sum_{i=1}^N \delta_i + \frac{1 - \hat{p}}{\hat{p}} \sum_{i=1}^N h_i. \quad (4.24)$$

Очевидно, что численные значения H , оцененные по этой формуле, существенно отличаются от тех результатов, которые получаются при традиционной интерпретации метода мощностей.

Рассмотренные нами вопросы, разумеется, не исчерпывают всего спектра геологических проблем, к решению которых можно подходить с седиментологических позиций. Однако и проанализированные задачи достаточно убедительно, как нам представляется, показывают преимущества модельного подхода при решении конкретных геологических проблем. Существенно, что интересующая геолога характеристика ищется не путем обработки фактического

материала стандартными статистическими приемами, а выводится аналитически из вполне конкретных содержательных предпосылок, допускающих к тому же однозначную интерпретацию полученных результатов, что само по себе имеет немаловажное значение. Именно такой подход и должен лежать в основе решения задач теоретической геологии.

5

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ ЛИТОСФЕРЫ

Широкий класс литогенетических построений сводится к моделированию геохимических ассоциаций. Среди формализованных моделей особое место занимают конструкции, элементами которых являются общие парные коэффициенты корреляции. Здесь мы рассмотрим методы создания таких конструкций и методы проверки соответствия их эмпирическому материалу.

Как известно, понятие об ассоциациях химических элементов в той или иной форме входит в определение геохимии как науки, поскольку наряду с выяснением закономерностей распределения отдельных химических элементов геохимия изучает их соотношения, взаимные сочетания, совместные находжения, парагенезисы и т. д. При этом в одних случаях основное внимание уделяется сонахождению элементов, а в других — связям между ними. Оба эти аспекта одинаково существенны при исследовании, поскольку они не взаимоисключают, а дополняют друг друга.

Со времен А. Е. Ферсмана [14] ассоциацию химических элементов обычно определяют по аналогии с минеральным парагенезисом, например: парагенезис элементов — закономерное совместное нахождение элементов в минералах, рудах и породах, связанных общими условиями формирования. Недостатком такого рода определений является их малая конструктивность, поскольку они не дают исследователю алгоритма выявления и описания парагенезисов. Кроме того, в отличие от минеральных парагенезисов геохимические ассоциации целесообразно определять, учитывая сопряженные изменения концентрации двух или более элементов. Таким образом, под геохимическими ассоциациями предлагается понимать такие группы элементов, содержания которых в каждом исследуемом геологическом объекте распределяются согласованно.

В соответствии с этим определением согласованность в вариациях концентраций химических элементов можно рассматривать как основание для объединения их в геохимическую ассоциацию.

При таком подходе появляется возможность формализовать процедуру выделения геохимических ассоциаций, используя для этой цели аппарат корреляционного анализа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЯДОВ ПОДВИЖНОСТИ И АССОЦИАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ассоциацией, или группой, часто называют такую совокупность случайных величин, в которой корреляционная зависимость между всеми возможными парами принадлежащих ей переменных равна или превышает некоторый заданный уровень [40]. Данное определение группы широко используется в геохимии и, как правило, удовлетворяет требованиям практики. Однако непосредственное применение результатов корреляционного анализа для выявления и описания геохимических ассоциаций не во всех случаях дает достаточно точное представление о них. Специфика распределения связей между элементами в геологических (а также биологических) объектах такова, что пары элементов, скоррелированные отрицательно, часто входят в состав одного и того же минерала, рудного образования и т. д. (это особенно характерно для изоморфных рядов).

Значения связей подобных элементов (например, элементов x_i и x_j в их множестве, состоящем из n членов, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n$) с остальными элементами объекта, как правило, распределяются согласованно (например, как элемент x_i , так и x_j образуют положительные связи с x_1, x_3 и другими нечетными членами множества и отрицательные — с x_2, x_4 и другими четными членами). Несмотря на отрицательную связь в пределах пары, формально указывающую на принадлежность ее элементов к разным группам, эти элементы следует, по-видимому, вместе включать в состав той ассоциации, с членами которой они образуют положительные связи, а не той, от элементов которой они отделяются отрицательными коэффициентами корреляции. Нередки и обратные случаи, когда отнесение двух элементов к одной и той же группе, аргументированное существованием между их концентрациями положительной корреляции, вступает в противоречие с наличием у каждого из них положительных связей с членами антагонистических ассоциаций (например, элемент x_i положительно связан с x_1, x_3 и другими нечетными членами множества, а элемент x_j — с x_2, x_4 и другими четными членами, при этом x_i отделен от четных, а x_j от нечетных высокими отрицательными корреляциями). Из всего этого следует, что обоснованная оценка ассоциаций элементов возможна только при условии учета как корреляций между самими элементами, так и взаимоотношений каждой пары элементов со всеми остальными.

Одним из способов решения рассмотренной проблемы является метод корреляционных профилей, предложенный Р. Трайном

[10], однако этот прием, включающий графическое построение профилей и визуальную оценку меры их сходства или различия, в достаточной степени субъективен. Вопрос об отнесении каждой возможной пары случайных величин к одной или разным группам предлагается решать следующим простым способом. Вычислив обычные корреляционные коэффициенты между концентрациями химических элементов $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n$ для каждой пары элементов, например для x_i и x_j , находят новый коэффициент корреляции (условно его можно назвать коэффициентом корреляции второго порядка и обозначить r') между рядами величин $r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{in}$ и $r_{j1}, r_{j2}, r_{j3}, \dots, r_{jn}$, где r — парные коэффициенты корреляции. Новый коэффициент должен, очевидно, отражать меру «взаимоотношений» двух названных элементов со всеми остальными и оценивать возможность отнесения их к одной или разным ассоциациям.

При исследованиях закономерностей поведения небольших групп элементов сопоставление обычных коэффициентов корреляции с коэффициентами корреляции второго порядка выполняется легко и дает надежные результаты. При изучении же достаточно больших групп процедура сопоставления коэффициентов становится весьма трудоемкой и даже невыполнимой, вследствие чего возникает необходимость в упрощении и обобщении полученных данных. Для этого предложен следующий способ. Вычисляют новые коэффициенты корреляции третьего порядка, например, для элементов x_i и x_j определяют корреляции между рядами величин $r'_{i1}, r'_{i2}, \dots, r'_{in}$ и $r'_{j1}, r'_{j2}, \dots, r'_{jn}$, затем находят коэффициенты корреляции между вновь полученными коэффициентами корреляции третьего порядка и т. д. Рассмотренный метод, названный методом многократной корреляции, позволяет выявлять в пределах каждого конкретного геологического объекта иерархию ассоциаций элементов: частные ассоциации, обусловленные интенсиными положительными связями первого — четвертого порядков; объединяющие их более общие ассоциации, учитывающие связи пятого, шестого порядка; еще более крупные ассоциации и т. д. вплоть до установления наиболее общих, ведущих ассоциаций.

Для изучения закономерностей миграции химических элементов наряду с моделью ассоциации целесообразно использовать и модель рядов подвижности. Известно, что ряды подвижности являются следствием многообразия форм миграции химических элементов. Местоположение каждого из элементов в подобных рядах определяется, в частности, соотношением его масс, которые мигрируют в форме раствора и в виде взвеси. Поскольку распределение элементов в ряд геохимической подвижности демонстрирует влияние индивидуальных физико-химических свойств элементов на их миграционную способность в условиях земной поверхности [12], соседние элементы в ряду должны обладать

наиболее сходными в данной конкретной обстановке физико-химическими свойствами.

В реальных условиях земной поверхности неизбежны некоторые колебания во времени и в пространстве соотношений взвешенных и растворенных масс каждого из элементов, что вызывает соответствующие колебания концентрации элементов в осадках. Исходя из сходства физико-химических свойств соседних элементов в рядах подвижности можно ожидать, что согласованность этих колебаний для каждой пары рядом расположенных элементов будет более высокой, чем для элементов, удаленных друг от друга. Оценка степени согласованности приводит к выводу, что для выявления ряда подвижности элементы следует располагать так, чтобы коэффициенты корреляции соседних элементов обладали максимальными положительными значениями.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ АССОЦИАЦИЙ И РЯДОВ ПОДВИЖНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭТАЛОННЫХ ОБЪЕКТАХ

Соответствие теоретических представлений тем эмпирическим закономерностям, которые доставляются методом многократной корреляции и методом определения ряда подвижности, проверялось на главных разновидностях горных пород: магматических образованиях, осадочных отложениях, отвечающих различным обстановкам седиментогенеза, биогенных породах, а также некоторых биологических образованиях.

Магматические образования. Геохимическое изучение различных по возрасту интрузий и вулканических тел основного, среднего и кислого состава показало, что для них свойственно большое разнообразие типов связей между элементами. Одновременно с этим обобщение оценок связей позволило установить во всех магматических образованиях стабильные тенденции к формированию двух конкретных геохимических ассоциаций. В состав одной из них почти во всех случаях входят объединяемые интенсивными положительными связями железо, кобальт, никель, рутений, родий, палладий, осмий и иридий. К перечисленным элементам присоединяются, как правило, магний, ванадий, хром, марганец, медь и некоторые другие. Другую, антагонистическую по отношению к первой, ассоциацию составляют также тесно связанные между собой кремний, калий, натрий, бериллий, свинец, барий и др. В эту же группу часто входят германий, мышьяк, селен, стронций, олово, сурьма и редкоземельные элементы. Алюминий, галлий, индий, гафний, часто титан и цирконий занимают промежуточное положение между этими двумя ассоциациями, образуя с входящими в них элементами весьма слабые положительные или отрицательные связи.

Как видно, главные группы элементов, выявляемые методом многократной корреляции в каждом исследуемом типе магмати-

ческих образований, во многом совпадают с ведущими геохимическими ассоциациями, установленными А. Е. Ферсманом для ряда гранитоиды — базиты: фемафилами (железо, кобальт, никель и др.), фельсифилами (кремний, калий, бериллий и др.) и гомеофилами (алюминий, галлий, гафний и др.).

Осадочные образования. В осадочных образованиях, являющихся продуктами механического разрушения пород области питания (толщи аркозов, граувакк и подчиненные им горизонты пород глинистого, карбонатного и другого состава), установлены геохимические ассоциации, слабо отличающиеся или совсем не отличающиеся от главных групп элементов, типичных для магматогенных образований. Для этих осадочных отложений свойственно объединение элементов по признакам их фемафильности, фельсифильности или гомеофильности. Таким образом, продукты механического выветривания наследуют ассоциации элементов, присущие материнским породам.

В осадочных образованиях, являющихся продуктами химического выветривания пород водосборных площадей (некоторые бокситы, каолины, толщи мономинеральных кварцевых терригенных отложений и подчиненные им горизонты пород глинистого и карбонатного состава), так же как и в магматогенных породах, на фоне значительного разнообразия типов связей между элементами устанавливаются тенденции к формированию двух главных геохимических ассоциаций. Однако по составу эти ассоциации резко отличаются от главных групп элементов магматических пород. Почти во всех случаях в одну из «осадочных» ассоциаций входят тесно связанные бериллий, алюминий, галлий, гафний, титан, цирконий, иттрий, редкоземельные элементы. К ним часто присоединяются хром, ванадий, олово, вольфрам. Антагонистическое по отношению к перечисленным элементам положение занимает ассоциация, в состав которой входят литий, фтор, натрий, хлор, калий, бром, рубидий, иод, цезий. С ними образуют положительные связи магний, кальций, стронций, сера, германий, мышьяк, селен, марганец, медь, цинк. Промежуточное между названными группами положение занимают никель, свинец, железо и некоторые другие элементы.

Наиболее вероятной причиной такой дифференциации элементов является специфика их миграции в зоне гипергенеза. Известно, что химическое выветривание ведет к разрушению минералов материнских пород и переходу содержащихся в них элементов в состав растворов и взвесей. При этом разрушаются геохимические ассоциации, принадлежащие материнским образованиям, и дальнейшая миграция элементов осуществляется в соответствии с их индивидуальными физико-химическими особенностями, проявляющимися в условиях переноса и осадконакопления. В процессе миграции и осаднения на территории конечных водоемов стока элементы, значительная масса которых способна перемещаться в виде ионных или коллоидных растворов (литий, фтор,

натрий, калий, кальций, стронций и др.), образуют между собой положительные связи и отделяются от элементов, соединения которых в этих условиях слабо растворимы (бериллий, алюминий, галлий, гафний и др.).

Таким образом, при переходе от механогенных к хемогенным осадочным образованиям наблюдается смена ассоциаций элементов, сходных с их группами в материнских породах, к ассоциациям, отражающим ряды подвижности элементов в условиях осадконакопления, т. е. дифференциация элементов по фемафильности — фельсифильности сменяется на дифференциацию по их инертности — подвижности в зоне гипергенеза.

Изучение геохимических особенностей биогенных отложений (торф, угли) и биологических объектов (растения, рыбы, теплокровные животные) показало, что все они весьма сходны по характеристикам связей между элементами. Установлено также, что эти образования содержат ассоциации элементов, аналогичные ассоциациям в рассмотренных выше породах — продуктах химического выветривания, т. е. здесь выявляется отчетливая дифференциация элементов по признакам их инертности — подвижности в зоне гипергенеза.

Сказанное позволяет сделать вывод о единстве типов связей между элементами в зоне химического выветривания литосферы и в биосфере. Из этого вывода следуют некоторые предположения, выходящие за рамки настоящей работы, но представляющие интерес в связи с перспективами, открывающимися при совмещении био- и геохимических исследований.

С момента своего зарождения биос (включая человека) находится в тесном контакте с окружающей его геохимической средой и по характеру ассоциаций элементов является своего рода «продуктом химического выветривания» литосферы. Для нормального функционирования биосу — живым организмам необходимо поглощать извне строго определенные количества воднорастворимых соединений элементов таблицы Д. И. Менделеева (приближенную оценку этих количеств можно получить путем перемножения кларков элементов в литосфере на средние значения их подвижности в зоне гипергенеза, выраженные в долях единицы). Любое нарушение необходимых пропорций между концентрациями этих элементов в литосфере может сопровождаться соответствующим нарушением химического состава организмов, что не может не приводить к какому-то биохимическим и, следовательно, физиологическим отклонениям в их функционировании.

Конечно, живые организмы эволюционно приспособлены к борьбе с подобными нарушениями, но степень этой приспособленности может быть разной по отношению к различным членам ряда подвижности элементов, возникающего в условиях химического выветривания. Известно, что подвижные члены этого ряда (хлор, калий, натрий и др.) могут входить в состав живых существ в весьма больших количествах и при этом организмы легко справ-

ляются с их избытком. Элементы средней части ряда (преимущественно так называемые малые элементы) жизненно необходимы в небольших количествах — они входят в состав ферментов и других веществ, регулирующих физиологические процессы. К изменениям в окружающей геохимической среде концентраций малых элементов биос более чувствителен: недостаточное их поступление приводит к серьезным нарушениям жизнедеятельности организмов, а при повышенных концентрациях они действуют как яды. К увеличению подвижности относительно химически инертных элементов зоны гипергенеза (что является одним из результатов воздействия человека на окружающую среду) живые организмы эволюционно не приспособлены, поскольку эти компоненты не включены в нормальные биологические цепи. Известно, что сердечно-сосудистые и раковые заболевания не без основания считаются «болезнями цивилизации». Результаты исследования геохимических ассоциаций литосферы приводят к гипотезе об одной из возможных причин этого явления, которая может заключаться в антропогенном переводе в состав растворов слабо-растворимых в естественных условиях земной поверхности элементов.

Зона перестройки связей (главный геохимический рубеж литосферы). Обобщение данных о закономерностях распределения статистических связей между химическими элементами в исследованных объектах позволяет сделать следующие выводы. В осадочных породах, являющихся продуктами механического разрушения магматических образований, сохраняются ассоциации элементов, аналогичные ассоциациям в магматогенных (в частности, вулканогенных) породах. В осадочных породах, являющихся продуктами химического выветривания, формируются ассоциации, определяемые формами миграции элементов в условиях гипергенеза. Аналогичные ассоциации характерны для биогенных пород и биоса. Иначе говоря, с позиций распределения связей между элементами в пределах литосферы можно выделить две геохимические системы, одна из которых объединяет магматические образования и продукты их механического дробления, а другая — продукты химического выветривания, биос и биогенные образования.

Зона перехода между названными системами может быть отнесена к числу ведущих геохимических рубежей литосферы. Как видно, он не совпадает с известными рубежами, выделяемыми по другим геохимическим признакам (границы магматические — осадочные породы и осадочные породы — биос). Этот рубеж целиком определяется процессами химического разрушения первичных магматических ассоциаций в условиях земной поверхности и формирования новых ассоциаций, отражающих формы миграции элементов.

Геохимическое исследование объектов, в пределах которых магматогенные образования и продукты их механического

разрушения замещаются продуктами химического выветривания, позволило конкретизировать картину изменения характера связей между некоторыми элементами (титан, цирконий, галлий, бериллий, хром, ванадий, никель, свинец, медь, марганец, барий и стронций) в зоне перехода между двумя ведущими геохимическими системами.

Во всех типах осадочных пород, формировавшихся в условиях механического выветривания территории водосбора, химические элементы обнаруживают тенденцию к сохранению основных геохимических ассоциаций магматических горных пород — групп фемафилов и фельсифилов (никель, хром, ванадий, марганец, титан, медь и бериллий, барий, свинец, цирконий).

При переходе к зонам формирования осадочных толщ, характеризующихся проявлением химического выветривания на фоне механической денудации, ассоциации элементов в осадках претерпевают закономерные изменения. Такие элементы, как стронций и барий, сохраняя положительную корреляцию между собой, значительно увеличивают свою относительную подвижность. Одновременно снижается подвижность титана, галлия, циркония и бериллия. При этом положительные связи титана с хромом, ванадием, никелем, марганцем и медью сначала ослабевают, а затем переходят в отрицательные. Аналогичные изменения происходят в связях свинца с цирконием и бериллием. Параллельно возникают и крепнут положительные корреляции между титаном, с одной стороны, и цирконием и бериллием — с другой, к которым затем присоединяется галлий.

Дальнейшее повышение интенсивности химического выветривания по сравнению с механическим находит выражение в возрастании относительной подвижности марганца. Постепенно ослабевают положительные связи этого элемента с хромом, ванадием и никелем. Одновременно возникают положительные корреляции марганца со стронцием и барием и он перемещается в правый конец ряда подвижности. Следом за марганцем этот путь совершает медь, разрывающая связи с хромом, ванадием и никелем и присоединяющаяся к стронцию и барию. Условия резкого преобладания химической денудации над механической отражаются в некотором увеличении относительной подвижности никеля, который разрывает связи с хромом и ванадием и объединяется со свинцом.

Итак, главный геохимический рубеж литосферы не является резкой границей, а представляет собой зону постепенного перехода от ассоциаций «магматогенно-механогенных» к «биогенно-хемогенным», причем этот переход фиксируется закономерными изменениями характера связей между элементами.

Указанным рубежом не ограничивается, естественно, многообразие геохимических границ литосферы. Например, при смене континентальных условий седиментации морскими ряды подвижности и ассоциации элементов в осадках претерпевают некоторые

закономерные изменения. В зонах механического выветривания эти изменения проявляются весьма слабо. Здесь как в континентальных, так и в морских осадках сохраняются ведущие ассоциации эндогенных горных пород. Однако по мере относительного возрастания интенсивности химического выветривания различия морских и континентальных отложений становятся все более и более значительными. Связаны они главным образом с особенностями поведения бария, который в морских условиях резко снижает свою относительную подвижность в результате перехода в состав сульфатов.

В осадках, формирующихся в прибрежно-морской зоне при интенсивном разбавлении морских вод пресными (дельты, солонатоводные лагуны), намечается распад характерной для пресных вод ассоциации стронций — барий. По мере удаления от береговой линии и повышения относительной солености вод отмечается движение бария справа налево в ряду подвижности. Вначале он образует положительные связи со свинцом и никелем, затем с хромом и ванадием и, наконец, в глубоких частях бассейна — с титаном, цирконием, галлием и бериллием.

Итак, каждой обстановке седиментогенеза, выявленной по комплексу геологических наблюдений, отвечает вполне определенный тип рядов подвижности и ассоциаций элементов.

Геохимические свойства элементов и периодическая система. Суммирование всех приведенных выше сведений о наиболее распространенных типах связей между элементами в пределах геохимических систем литосферы позволяет установить следующие закономерности.

В последовательности элементов, построенной в соответствии с возрастанием их порядковых номеров в таблице Д. И. Менделеева, начиная с 13-го, закономерно чередуются группы, соседние члены которых образуют положительные связи в магматических породах и продуктах их механического выветривания. Чередование подчиняется следующему простому правилу: 1 гомеофил и 8 фельсифилов, 1 гомеофил и 8 фемафилов, 1 гомеофил и 8 фельсифилов и т. д. Действительно, после типичного гомеофила алюминия (13) следуют кремний, фосфор, сера, хлор, аргон, калий, кальций и скандий, т. е. элементы или относящиеся к типичным фельсифилам, или обладающие фельсифильными свойствами; после титана (22) размещаются ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь и цинк — типичные фемафилы так называемой группы железа; за гомеофилом галлием (31) следует фельсифилы германий, мышьяк, селен, бром, криптон, рубидий, стронций, итрий и т. д.

Пары элементов с разностью порядковых номеров, равной 9 (для гомеофилов) и 18 (для остальных элементов), имеют положительные связи в образованиях зоны гипергенеза и биологических объектах. Так, подобные связи присущи членам следующих групп.

Элементы, почти не переходящие в растворы и поэтому наиболее инертные
в зоне гипергенеза
Бериллий (4), алюминий (13), титан (22), цирконий (40), галлий (31) и др.

Элементы слабоподвижные
Скандий (21), иттрий (39) редкоземельные (57) и др.

Элементы относительно подвижные
Кальций (20), стронций (38), барий (56) и др.

Элементы, активно переходящие в раствор и поэтому весьма подвижные
Калий (19), рубидий (37), цезий (55) и др.

Инертные газы, обладающие максимальными миграционными
способностями

Отмеченные закономерности позволяют сделать следующие
выводы.

1. Геохимические свойства элементов периодически повторяются, причем эта повторяемость зависит от атомного (порядкового) номера элемента.

2. Начиная с 13-го элемента периоды повторяемости постоянны и кратны числу 9, что отвечает одной из главных периодичностей таблицы Д. И. Менделеева (элементы с меньшими номерами также характеризуются периодичностью геохимических свойств, но она подчиняется более сложному закону).

3. Для магматогенных пород более характерны связи в пределах строк таблицы Д. И. Менделеева, а для образований зоны гипергенеза — в пределах столбцов.

Выявленная периодичность открывает пути к предсказанию геохимических свойств ряда слабо изученных в этом отношении элементов и к более полному использованию геохимической информации при решении многих геологических задач.

ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР

Изучение ассоциаций химических элементов в разнообразных породах показывает, что далеко не все из них могут быть отождествлены с теми ассоциациями, которые установлены в эталонных объектах. Иначе говоря, задача всякого рода палеорекострукций не сводится только к использованию диагностического алгоритма. Гораздо чаще приходится сталкиваться с ситуацией, когда эмпирические данные отражают существенное влияние ранее не учтенных факторов, а также суперпозицию следствий разнонаправленных процессов. В этом случае использование рассмотренных выше формальных процедур поставляет информацию, стимулирующую последующее моделирование условий петро-, лито- и рудогенеза. Иллюстрацией эвристических ресурсов, которыми обладает формализованная система обработки данных, служит рассматриваемый ниже опыт решения типовых геологических задач.

Определение условий формирования осадочных и вулканогенно-осадочных образований. Применительно к осадочным образованиям ведущие типы геохимических ассоциаций литосферы можно рассматривать в качестве системы эталонов, отражающих режимы механического или химического выветривания пород области питания, а также различные стадии перехода между этими режимами. В свою очередь характер выветривания водосборных площадей определяется палеогеографическими условиями осадконакопления, среди которых главную роль играют климатический и тектонический факторы.

Согласно Н. М. Страхову, мера активности тектонического режима эпохи седиментации находит отражение в степени расчлененности рельефа водосборной площади. Увеличение расчлененности ведет к относительному преобладанию механического выветривания над химическим, а пепеленизация — к преобладанию химического над механическим. Аналогично влияние и климатического фактора: зонам с аридным климатом в большей степени присуще механическое выветривание, а с гумидным — химическое. Отсюда следует, что, сопоставив с эталонными геохимическими ассоциациями конкретные осадочные и вулканогенно-осадочные толщи, обстановки аккумуляции которых требуется уточнить, можно оценить климатические и тектонические условия их формирования. Эти сведения могут быть дополнены определениями гидрохимических условий на основании анализа положения бария и некоторых других элементов в рядах подвижности (барий резко снижает свою подвижность в соленых водах [11]).

Примерами таких исследований являются реконструкции климатических, тектонических и гидрохимических условий формирования отложений докембрийских и нижнепалеозойских Южного Казахстана [1], силурийских и нижнедевонских Подолли [2], девонских, каменноугольных и пермских западной части Центрального Казахстана [4], триасовых Южного Приморья [7]. Наряду с изучением перечисленных образований, слабо измененных под влиянием наложенных процессов, проведен анализ типов ассоциаций и рядов подвижности элементов в метаморфизованных осадочных горных породах (парагнейсы Юго-Восточной Тувы [3], музкольский метаморфический комплекс Центрального Памира [5]) и в образованиях зон ультраметаморфизма и метасоматоза.

Обобщение полученных материалов позволяет прийти к следующим заключениям.

1. Оценки палеогеографических обстановок, основанные на геохимических данных, не противоречат определениям режимов седиментации, базирующимся на геологических наблюдениях, и позволяют в ряде случаев значительно уточнить их.

2. Типы статистических связей между элементами в осадочных толщах под влиянием процессов регионального метаморфизма не изменяются или изменяются в весьма слабой степени.

Разрушение этих связей происходит лишь в зонах ультраметаморфизма.

Таким образом, характеристики ассоциаций и рядов подвижности химических элементов можно отнести к числу индикаторов климатических, тектонических и гидрохимических условий формирования осадочных и вулканогенно-осадочных отложений. Использование этих индикаторов представляется наиболее перспективным при изучении неметаморфизованных толщ неясного генезиса и при выявлении первичной природы метаморфизованных образований.

Уточнение стратиграфического положения осадочных и вулканогенно-осадочных образований. Оценки обстановок формирования осадочных и вулканогенно-осадочных образований, полученные на основании геохимических данных, могут быть использованы и для выявления или уточнения стратиграфической приуроченности исследуемых формаций, свит, горизонтов и т. д. Очевидно, что применение этих оценок возможно в тех случаях, когда в сопоставляемых разрезах присутствуют толщи, существенно различающиеся по климатическим, гидрохимическим и другим условиям осадконакопления. При переходе от одной из таких толщ к другой характер связей между элементами должен закономерно изменяться, фиксируя соответствующую стратиграфическую границу.

Наряду с таким «косвенным» приемом решения вопросов стратификации (ассоциация элементов → условия формирования → → стратиграфическое положение) существуют и «прямые» геохимические критерии стратиграфической принадлежности осадочных и вулканогенных образований. Как уже отмечалось, конкретные геохимические ассоциации, обладая определенными чертами сходства с их ведущими типами, имеют в каждом геологическом объекте и свои «аномальные» черты поведения некоторых химических элементов (вхождение фемафилов в фельсифильные группы или фельсифилов — в фемафильные, подвижных элементов — в инертные группы и т. п.). В тех случаях, когда подобная специфичность геохимического облика распространяется без изменений на те или иные территории развития толщ, она может быть использована для оценок их стратиграфической принадлежности.

Об этом свидетельствуют результаты сопоставления геохимических ассоциаций в пространственно разобщенных разрезах образований докембрия и нижнего палеозоя Южного Казахстана [1]; девона, карбона и перми западной части Центрального Казахстана [4]. К аналогичным выводам приводит изучение серий разрезов, проходящих по простиранию осадочных и вулканогенных толщ через зоны различных стадий их метаморфизма (музкольский комплекс Центрального Памира [5]).

Сравнение геохимических ассоциаций в этих отложениях показывает следующее.

1. Подавляющее большинство исследованных стратиграфических подразделений характеризуется специфическими наборами связей между некоторыми элементами, достоверно отличающими эти толщи от расположенных выше или ниже по разрезу.

2. Достоверность распознавания не снижается в тех случаях, когда соседние по разрезу толщи сходны с выделяемой по литологическому составу и условиям формирования.

3. Специфические типы связей между элементами, свойственные выделяемой толще, стабильно присутствуют в ее пределах (как в разрезе, так и по простиранию) и в резко различающихся по литологическому составу породах.

4. Под влиянием наложенных процессов специфические типы связей не изменяются или изменяются в слабой степени.

Таким образом, типы рядов подвижности и ассоциаций химических элементов могут служить индикаторами стратиграфической принадлежности осадочных и вулканогенно-осадочных образований, в том числе и метаморфизованных. Последнее обстоятельство имеет, по-видимому, особенно большое значение, так как позволяет исключить те неточности, которые допускаются при картировании и стратификации разновозрастных, но в разной степени метаморфизованных толщ.

Определение металлогенической специализации осадочных и вулканогенно-осадочных образований. Оценка условий формирования отложений в целях определения их потенциальной рудоносности. Приемы реконструкции древних обстановок седиментогенеза, основанные на изучении ассоциаций и рядов подвижности элементов, могут, очевидно, найти применение и при решении задач металлогенического плана. В первую очередь это относится к прогнозу таких стратифицированных месторождений полезных ископаемых, для которых факторами, контролирующими оруденение, являются палеогеографические условия бассейнов седиментации и прилегающих частей водосборных площадей.

Для изучения практических возможностей такого подхода исследовались образования, проблемы аккумуляции которых, являясь дискуссионными, имеют, однако, непосредственное поисковое значение. В результате анализа ассоциаций и рядов подвижности элементов в кремнистых толщах палеозоя Казахстана и Средней Азии, в олигоценовых отложениях района Чиа-турского месторождения и глинах кунгурского яруса [6] установлено, что в них встречаются горизонты как с типично «магматическими», так и с типично «осадочными» наборами связей между элементами. Анализ материала позволил прийти к следующим заключениям.

1. Сходные по составу и внешнему облику потенциально рудоносные образования могут быть почти нацело сложены как продуктами глубокого химического выветривания пород области питания,

так и продуктами механического выветривания или вулканической деятельности (реже встречаются «смешанные» разности).

2. Вопросы происхождения подобных образований и связанных с ними руд следует, по-видимому, решать с учетом специфики каждого геологического объекта, причем существенную помощь при этом может оказать изучение типов связей между химическими элементами.

Таким образом, ряды подвижности и ассоциации элементов указывают как на условия формирования рудоносных отложений и руд, так и на источники слагающего их материала.

Выявление геохимических индикаторов оруденения. Механизм формирования некоторых типов стратифицированных месторождений сопровождается потерей полезным компонентом миграционных свойств, т. е. переходом главной массы этого компонента из состава растворов в состав взвесей. Очевидно, что подобный процесс должен проявлять себя в закономерных изменениях как положения рудообразующего элемента в ряду подвижности, так и типов его связей с остальными элементами. Отсюда следует, что оценка рядов подвижности элементов и ассоциаций в потенциально рудоносных толщах может привести к выявлению новых геохимических индикаторов оруденения. Практическое значение таких индикаторов будет особенно ценным, если их устанавливать не только в пределах участков с повышенными содержаниями полезного компонента, но и в «пустых» породах, окружающих оруденелые зоны.

Подтверждением этому являются результаты исследования районов развития флюоритоносных карбонатных отложений; кремнистых образований, перспективных на марганец; терригенных отложений, содержащих месторождения меди и свинца (опробовались только породы, вмещающие оруденение и не несущие повышенных содержаний полезных компонентов). В результате обработки геохимической информации, характеризующей эти отложения, установлено следующее.

1. В отличие от безрудных в рудоносных породах полезный компонент во всех без исключений случаях резко изменяет свое обычное положение в миграционном ряду и переходит из ассоциации подвижных элементов в ассоциацию инертных.

2. Мера инертности полезного компонента является геохимическим поисковым критерием, а мера его связи с подвижными и инертными элементами — количественным выражением этого критерия.

3. Процесс перехода полезного компонента в состав взвесей выявляется в потенциально рудоносных осадочных толщах на участках, удаленных от зон распространения его повышенных содержаний. Рудопроявления и месторождения сопровождаются ореолами, в пределах которых полезный элемент закономерно изменяет свои связи с остальными элементами; по своим масшта-

бам подобные ореолы значительно превосходят участки, очерченные повышенными содержаниями рудообразующего элемента.

Определение металлогенической специализации магматических образований. Известно, что процессы формирования некоторых месторождений полезных ископаемых, связанных с магматическими образованиями, сопровождаются обособлением рудообразующих компонентов от основной массы породы. Образование таких месторождений, как и в случае с осадочными породами, может сопровождаться закономерными изменениями типов связей между химическими элементами при переходах от безрудных разностей к рудоносным. Для проверки этого предположения изучались геологические объекты, заведомо содержащие и не содержащие различные типы оруденения: траппы Сибирской платформы [13], руды и вмещающие породы Норильского месторождения [8], гипербазитовые массивы Печенгского района Кольского полуострова [9] и др. Исследование ассоциаций химических элементов в этих объектах позволило прийти к следующим выводам.

1. В отличие от безрудных пород в рудоносных полезные компоненты всегда разрывают положительные связи с остальными элементами и слагают самостоятельную ассоциацию.

2. Мера обособленности полезных элементов от всех остальных является, таким образом, геохимическим поисковым критерием, а знак и интенсивность вновь возникающих при этом связей — количественной мерой этого критерия.

3. Процесс обособления полезных элементов может быть выявлен в потенциально рудоносных магматических образованиях на участках, удаленных от зон их повышенных концентраций. Рудопроявление или месторождение сопровождается ореолами, в пределах которых полезные элементы закономерно изменяют свое положение в ассоциациях; по размерам эти ореолы значительно превосходят площадь распространения повышенных концентраций.

Картирование геохимических индикаторов оруденения и выделение перспективных участков. Выводы, полученные в результате исследования геохимических индикаторов оруденения в осадочных и магматических образованиях, позволяют прийти к заключению, что картирование ассоциаций может дать при поисковых работах больше полезной информации, чем картирование концентраций. Под картированием ассоциаций можно понимать построение геохимических профилей или разрезов, на которых нанесены графики интенсивности связей между элементами, или составление геохимических карт, содержащих линии равных интенсивностей связей между химическими элементами (изокорреляты). Технически это реализуется сочетанием метода многократной корреляции с известными процедурами «скользящего окна» и тренд-анализа (соответствующие алгоритмы и программы для ЭВМ разработаны во ВСЕГЕИ). Практическими примерами

являются геохимические профили и карты, построенные по результатам металлотрической, а также лито- и биохимической съемок для территории некоторых золоторудных месторождений, рудопроявлений ртути и месторождений силикатного никеля.

Анализ материалов картирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Участки известных рудопроявлений и месторождений хорошо выделяются на профилях и картах по изолиниям связей полезных элементов или их спутников с подавляющим большинством остальных изученных химических элементов.

2. Типы связей между элементами позволяют отличать аномалии, связанные с оруденением, от так называемых породных, определяемых повышениями фоновых содержаний полезного элемента.

3. Типы связей между элементами закономерно изменяются на участках рудопроявлений или месторождений и в тех случаях, когда на дневной поверхности содержание полезных элементов не только не повышается, но даже снижается по сравнению с фоновым. Это позволяет выявлять новые рудные залежи за пределами зон, обнаруженных по аномальным концентрациям рудообразующих элементов, что подтверждено результатами горных работ, рекомендованных на основании анализа карт изокоррелят.

4. Для выявления новых рудных зон методом картирования ассоциаций наряду с результатами опробования коренных пород могут быть использованы также данные литохимической, биогеохимической и других подобных съемок.

Накопленные материалы свидетельствуют, что изучение рядов подвижности и ассоциаций химических элементов может повысить эффективность как общих прогнозных и металлогенических исследований, так и поисково-разведочных работ.

ПЕТРОЛОГИЯ И ПЕТРОХИМИЯ



МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПЕТРОЛОГИИ

Петрология — наука о кристаллических горных породах, их составе, строении, условиях образования, распределении в пространстве и во времени, а также о последующих превращениях. Как и во всякой естественной науке, в петрологии целесообразно различать исследования эмпирического и теоретического уровней. Среди петрологов нет единодушия при выборе критерия, позволяющего провести грань между теоретическими обобщениями и эмпирическими закономерностями.

Не очень строгим, хотя и удобным в некоторых отношениях является деление рассматриваемой области знания на петрографию и петрологию в узком смысле этого термина, т. е. на описательную и генетическую составляющие науки. В соответствии с этим различают методы получения и обработки исходной петрологической информации и методы, непосредственно связанные с петрогенетическими построениями. Последние традиционно относят к сфере теоретической петрологии. При таком подходе, однако, есть возможность в разряд теоретических исследований включить эмпирическое изучение искусственных и природных силикатных систем (вспомним, например, «Теоретическую петрологию» Т. Барта) и, наоборот, заведомо не петрогенетическую классификацию пород и их структур, например 230 пространственных групп симметрии Е. С. Федорова, нельзя считать соответствующими построениям теоретического уровня.

Значительно более строгим и полнее отвечающим противопоставлению теории и эмпирии является деление методов на два больших класса: на индуктивные и дедуктивные. Рассмотрим этот вариант подробнее, для чего дальнейший анализ методологической базы петрологии проведем с позиций системного подхода. При этом все многообразие петрологических задач и способов их решения будем рассматривать в аспекте моделирования геологической реальности. Этим самым процесс познания сводится к итеративному совершенствованию модельных построений, повышению их универсальности, конструктивности, формализованности и, конечно, адекватности изучаемому явлению. Иначе говоря, интересующее нас множество подходов, способов и приемов петрологических исследований ставится в соответствие множеству путей аппроксимации природной петрологической реальности.

Как при индуктивном, так и при дедуктивном подходе можно различать методы, связанные с конструированием статических или динамических моделей, в зависимости от того, учитывается или не учитывается изменение систем во времени. В таком делении

нетрудно увидеть и онтологическое основание: моделированию объектов противопоставляется моделирование процессов.

Индуктивные статические модели строятся при полевом и лабораторном изучении разнообразных петрологических объектов: изверженных и метаморфических горных пород, интрузивных массивов, магматических комплексов и т. д. Индуктивные динамические модели служат для феноменологического описания процессов и явлений, таких, например, как периодичность вулканической активности, скорость движения лавового потока.

К дедуктивному статическому моделированию относятся теоретические расчеты состава и структуры пород, физических эффектов, сопутствующих формированию магматических тел (охлаждение и консолидация интрузий), и т. п. Примерами могут служить термодинамическое обоснование минеральных фаций метаморфизма (П. Эскола и др.), определение структуры «идеальных гранитов» (А. Б. Вистелиус), вывод системы линейных парагенезисов петрогенных компонентов на основе учета их энергетических свойств (В. В. Груза) и минерального состава пород (А. Ф. Белоусов, В. А. Кутюлин и др.). Дедуктивное динамическое моделирование — основной путь изучения природы (механизма) петрогенетических процессов, выяснения причинно-следственных связей между явлениями. Таким образом выясняются, в частности, условия выплавления базальтов в глубинных зонах Земли, последовательность кристаллизации магмы в интрузивной камере, этапность формирования метасоматической зональности и т. п.

Для понимания специфики рассматриваемых методов моделирования полезно различать формализованные и неформализованные (частично формализованные) процедуры. Последние иногда называют логическим моделированием. Неформализованное индуктивное моделирование проявляется в процессе полевых геологических исследований при составлении различного рода карт, схем, разрезов и т. п. Среди формализованных индуктивных моделей имеет смысл выделять конструкции физические, физико-химические, химические, с одной стороны, и математические — с другой. Модели первой группы создаются главным образом на этапе лабораторного изучения пород: при определении их состава и физических свойств, в частности при анализе шлифов под микроскопом, при оценке кларков, фермов и т. п.

Примером физического динамического моделирования может служить лабораторное воспроизведение интрузивного диапиризма (Х. Рамберг и др.), явлений усадки при раскристаллизации магматических расплавов (Д. М. Орлов). К сфере физико-химического динамического моделирования относятся эксперименты, связанные с плавлением и кристаллизацией пород переменного состава при варьирующих pT -условиях (Н. Боуэн, Х. Татл, Х. Йодер, Дж. Шерер, А. Е. Рингвуд, Н. И. Хитаров и др.). Построение индуктивных математических моделей связано с разного рода преобразованиями исходной информации. Целью этих преобразо-

ваний является селекция первичных данных, их свертка и выявление эмпирических закономерностей разной степени общности. Для этого применяются аппарат математической статистики, методы кластер-анализа и другие процедуры.

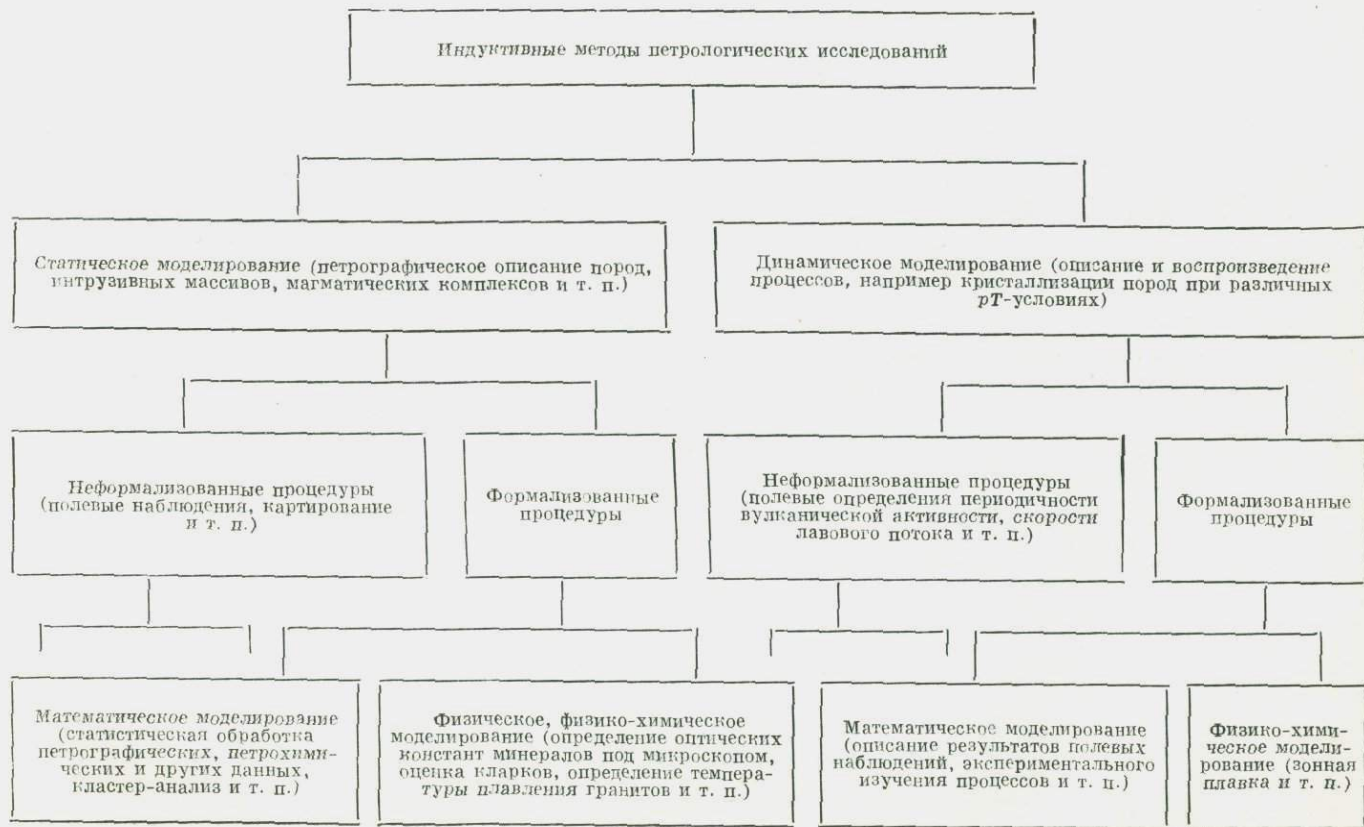
Таким образом, мы видим, что индуктивное моделирование как в статическом, так и динамическом варианте ориентировано на накопление эмпирического знания — на получение фактов и их обобщение. Можно считать, что при этом используются ранее построенные теории, например теория вероятностей, федоровский метод и т. д. Все это оправдывает отнесение подобных работ к исследованиям эмпирического уровня.

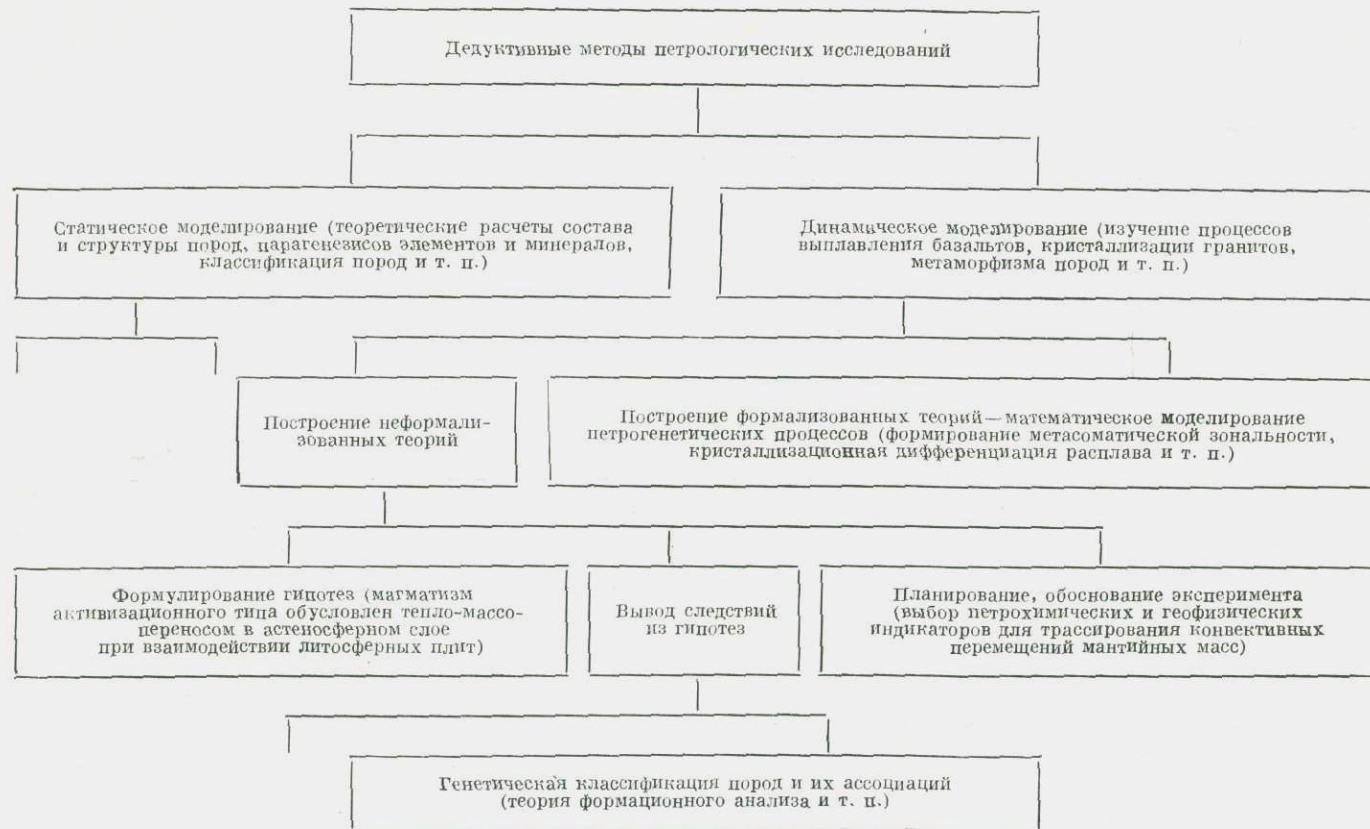
Иное назначение имеет дедуктивное моделирование. Независимо от степени формализованности дедуктивное моделирование непосредственно ориентировано на построение петрологических гипотез и теорий. В интересующем нас плане во многих случаях полезно различать этап построения (формулирования) гипотезы и этап ее верификации на эмпирическом материале. В результате последнего процесса гипотеза либо отбрасывается, либо совершенствуется и превращается в теорию. Таким образом, можно говорить о методах формулирования петрогенетических гипотез и о методах их верификации, которые в свою очередь распадаются на методы выделения следствий из гипотез и методы планирования (обоснования, организации) эксперимента для выяснения соответствия этих следствий и, следовательно, гипотез в целом геологической реальности. Все названные классы методов кажется оправданным относить к теоретической петрологии, противопоставляя их методам использования готовых теорий.

Известно, что процесс создания оригинальных гипотез обычно является индивидуальным (субъективным) творческим актом. Формулирование во многих отношениях нестрогих логических конструкций, как правило, с трудом поддается формализации. Анализ таких методов, строго говоря, лежит в сфере эвристики, если, конечно, не пытаться свести творческий процесс к последовательному выполнению правил обобщения эмпирических данных. Все это во многом относится и к методам верификации гипотез, поскольку выявление нетривиальных следствий модели, равно как и планирование их экспериментальной проверки, осуществляется в виде неформализованного логического поиска. Эвристичность практикуемых методов и подходов к верификации важнейших петрологических гипотез существенно затрудняет их систематизацию.

Формализованный путь получения теоретического знания — математическое моделирование. Этим исследованиям не без основания отводится важнейшая роль в построении теоретического базиса науки. Успешный опыт математического моделирования магматических, метасоматических и некоторых других процессов мы находим в работах Д. С. Коржинского, В. С. Соболева, А. А. Ярошевского и ряда других исследователей. В современном

ТАБЛИЦА 6.1





методическом арсенале петрологии особое место занимают дедуктивные классификации пород и их ассоциаций, лежащие в основе формационного анализа (Ю. А. Кузнецов, Э. П. Изох, А. Ф. Белоусов, В. А. Кутюлин и др.). Подавляющая часть этих классификаций, включая и те, что обладают формальным совершенством, построены в значительной мере на базе неформализованных петрогенетических представлений. Вероятно, лишь в будущем, как отмечал в одной из своих работ Н. Л. Добрецов, могут появиться классификации, непосредственно вытекающие из математизированных моделей петрогенезиса.

На этом мы ограничиваем анализ методологической схемы петрологии, опуская более дробные варианты членения моделей и соответствующих методов, например, по способу описания (стохастические, детерминированные, аналитические, графические), по числу учитываемых переменных (одномерные, многомерные), по способу задания исходных признаков (непрерывные, дискретные) и т. д. В несколько редуцированном виде рассмотренная схема представлена в табл. 6.1 и 6.2.

В заключение еще раз подчеркнем известную условность разделения методов эмпирического и теоретического уровней. В частности, определенная категория дедуктивных построений, сопутствующих рутинным геологическим исследованиям, является по существу лишь приложением уже известного теоретического знания и не может восприниматься как достижение творческой мысли. В то же время эмпирические обобщения, но проведенные в глобальном масштабе, несут на себе явные черты исследований теоретического уровня. Глобальность подхода генерирует выводы такой степени общности, что для последующих частных экспериментов они выступают в качестве теоретического знания. Кроме того, эмпирические закономерности глобального уровня играют роль объективных ограничений при решении теоретических проблем в петрологии, тектонике, геофизике, ибо выбор между конкурирующими моделями в этих областях не может опираться только на фундаментальные физические и химические соотношения. В частности, для петрологических построений в равной мере существенны сведения как о физических полях, так и о вещественном составе геосфер. Не исключено, что отсутствие в петрологической литературе строгих и конструктивных дефиниций в интересующем нас плане связано с трудностями принципиального характера, подобными тем, с какими приходится сталкиваться, например, при определении ценности научных результатов.

КОНЦЕПЦИЯ МОБИЛИЗМА И ПЕТРОЛОГИЯ

Идеи и методы новой глобальной тектоники, судя по отношению к ним подавляющей части научной общественности, выдвигают эту концепцию на роль парадигмы всей современной геологии. На смену эмпирическим закономерностям и феноменологическим описаниям пришла концепция, допускающая широкий спектр дедуктивных построений, пригодных для верификации на фактическом материале. Это не означает, конечно, что теперь стали наконец известны с достаточной определенностью первопричины и механизм геологической эволюции Земли или ее отдельных крупных частей. Тем не менее динамическая модель литосферных плит в отличие, например, от учения о геосинклиналях дает ответы на гораздо большее число «почему?» [27], отодвигая границы нашего незнания в сферу взаимодействия глубинных зон планеты. Привлекательность новой концепции объясняется также ее способностью устанавливать причинно-следственные отношения между геологическими явлениями, удаленными друг от друга на тысячи километров, равно как и увязывать в единое целое процессы дифференциации и гомогенизации вещества Земли с закономерной и направленной эволюцией верхней оболочки планеты.

Активные критики новой глобальной тектоники [5, 29 и др.] обращают внимание на то, что многие ее фундаментальные положения покоятся не на фактах, а на их интерпретации, т. е. оказываются гипотетичными. Нам представляется, что это обстоятельство не является недостатком рассматриваемой концепции. Более того, оно может считаться естественным и нормальным в схеме последовательного накопления теоретического знания. Важно, что следствия, выводимые из постулатов Р. С. Дитца [46], Г. Хесса [63] и других основоположников новой глобальной тектоники, не противоречат хорошо известным и твердо установленным фактам.

С каждым годом множится число работ, которые со всей очевидностью подтверждают соответствие концепции мобилизма тем обязательным требованиям, которые обычно предъявляются всякой новой гипотезе. В частности, по отношению к ранее господствовавшим представлениям эта концепция выступает как некое обобщение, поскольку не только дает объяснение всем важнейшим эмпирическим закономерностям, но и вскрывает причины тех явлений, которые ранее не находили убедительного объяснения. Так, новая глобальная тектоника не исключает возможности разнообразных вертикальных перемещений земной коры и унаследованного развития регионов, сокрушая в этом кардинальном

вопросе монополю фиксизма. Рассматриваемая концессия конструктивна, ибо предсказывает геологические эффекты, порождаемые конвективными перемещениями масс, в частности, изменения характера вулканической деятельности в зависимости от скорости взаимодействующих литосферных плит.

Современное понимание мобилизма определено около 10 лет назад. Сейчас мы являемся свидетелями этапа становления новых идей, когда возникают многочисленные конкурирующие разновидности основной схемы, всякого рода экстремальные варианты и наряду с этим идут поиски объективных ограничений гипотетических конструкций и уточняются «первые приближения». Естественно, что в этих условиях многие мобилистские построения встречают резкие возражения сторонников классического фиксистского подхода. Любопытно, однако, что жесткая и бескомпромиссная полемика способствует скорейшему отмиранию многих экзотических ответвлений бурно развивающейся концепции мобилизма и тем самым приводит к усилению ее позиций.

Так, например, сходство разрезов некоторых эвгеосинклинальных зон с той картиной, которая установлена при разбурировании и драгировании дна современных океанов [10], а также несомненная близость по составу геосинклинальных и океанических толеитов породили у ряда видных приверженцев новой концепции [21, 42, 44 и др.] убеждение, что все или почти все геосинклинальные толщи представляют собой пластины океанической коры в аллохтонном или автохтонном залегании. Понятно, что те исследователи, которые наряду с чертами сходства видят в этих образованиях также резкие различия [29 и др.], резонно возражают против подобных построений. Другой поток не менее убедительных возражений исходит от тех геологов, которые усматривают в континентальных разрезах многочисленные примеры унаследованного развития вулкано-тектонических структур, где спилит-диабазовые толщи согласно или почти согласно перекрываются породами андезит-базальтовой и андезитовой ассоциаций. Для этих исследователей абсолютно неприемлем вариант замены геологических карт, на которых отображена обоснованная фактами эволюция региона, мозаикой аллохтонных пластин.

Однако в данном вопросе мнение фиксистов разделяют и многие сторонники новой глобальной тектоники, ибо для них очевидно, что преобладающая часть толеитов формируется *in situ* в дугах типа Тонга и Кермадек [56, 69, 70]. В этом случае унаследованность структурного плана и состава пород находит естественное объяснение. Мы поддерживаем мнение тех петрологов [89], которые допускают в складчатых областях существование толеитов разного происхождения. Но диагностика этих образований является далеко не простым делом, поскольку корректный сравнительный анализ состава пород требует учета многих

сопутствующих обстоятельств, в частности их эволюционной и региональной изменчивости.

Значение идей мобилизма для теоретической петрологии не менее важно, чем для тектонических реконструкций. Принятие идей означает нечто большее, чем переосмысление многих кардинальных понятий петрологии, таких как геосинклинальный, орогенный или трапшовый магматизм. Геологи получили возможность рассматривать тип и закономерности пространственного размещения современных магматических проявлений в зависимости не только от предшествующей геологической истории регионов, но и от динамических параметров взаимодействующих плит, определяемых независимым образом. Это обстоятельство в принципе открывает путь широким палеодинамическим реконструкциям, что представляется в равной мере ценным и с чисто познавательной и с практической точек зрения.

Эвристичность новой концепции иллюстрируют работы Г. Хесса, Д. Грина, А. Миаширо и ряда других геологов. В этих работах рассмотрены важнейшие схемы петрогенетического моделирования, учитывающие энергетику перемещающихся масс вещества, а также причинную обусловленность пространственно-временного распределения магматической активности, равно как и особенности состава изверженных горных пород, не получавшие ранее удовлетворительного объяснения. Дается принципиально новая трактовка природы андезитовой линии и зонального по отношению к ней распределения щелочей в породах, выясняются условия формирования парных метаморфических поясов, выявляются причины повышенной щелочности средиземноморских вулканитов по сравнению с тихоокеанскими и т. д.

Прогностические ресурсы мобилистских моделей далеко не исчерпаны. На очереди обоснование тонких, скрытых особенностей состава и закономерностей размещения пород. Следует иметь в виду, однако, что верификация мобилистских моделей требует обобщения большого эмпирического материала, обращения к объектам далекого геологического прошлого, учета сопутствующих вариаций многих характеристик состава и строения глубинных зон Земли, а также значительно более сложной техники анализа данных, чем, например, широко используемые для этих целей бинарные диаграммы.

Последующее изложение посвящено рассмотрению соотношений плитной тектоники и петрогенезиса, анализу дедуктивного вывода следствий из мобилистских моделей и методам установления непротиворечивости этих моделей эмпирическому материалу. Мы считаем, что особенно важно обосновать возможность унаследованного развития регионов и направленность процесса дифференциации вещества Земли в условиях конвективного перемещения глубинных масс. Основное внимание акцентируется на оригинальных разработках, на ранее опубликованные материалы даются краткие ссылки.

КОНВЕКТИВНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАНТИЙНЫХ МАСС И ИХ ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ

В основе концепции мобилизма лежит представление о существовании глубинной подкоровой конвекции вещества Земли, которая, как известно [25, 31 и др.], является наиболее эффективным механизмом тепло-массопереноса. Конвекция может быть следствием вертикального градиента температур, а также нарушения гравитационного равновесия в недрах планеты в результате дифференциации вещества. Существование первого из названных условий является твердо установленным фактом, второе с неизбежностью возникает при разнообразных физико-химических реакциях, в частности при процессе металлизации на границе мантии и ядра [15, 19, 24, 39 и др.].

Конкретизируем сразу, о какой конвекции в мантии может идти речь, т. е. какие параметры конвективных ячеек представляют интерес для геологии. Очевидно, имеет смысл различать явления регионального масштаба, когда размер ячеек не превосходит нескольких сотен — первых тысяч километров, и глобального, когда поперечник ячеек исчисляется многими тысячами километров. Если конвекция не выходит за пределы нижней мантии, то во многих построениях мы вправе допускать, что ее не существует вовсе. Если конвекция в верхней мантии не приводит к взаимодействию с литосферой, то, естественно, возможности ее регистрации оказываются ограниченными. Наконец, если скорость конвективного перемещения достаточно мала (период обращения 4 млрд. лет и более), то его влияние на геологические процессы нельзя считать существенным.

Возможность глубинной конвекции признается подавляющим большинством геологов и геофизиков [25], хотя некоторые из них полагают ее еще не доказанной [14]. Примечательно, однако, что даже активные противники концепции мобилизма в своих построениях вынуждены опираться на проявления этого физического процесса, ибо, как справедливо заметил В. В. Гордиенко [8], трудно провести грань между тем, что мы понимаем, когда говорим о подъеме мантийного астенолита, и тем, что означает восходящая ветвь термо-гравитационной конвекции.

Среди тех, для кого существование эффективного тепло-массопереноса в глубинах Земли представляется очевидным, нет единомышленников в вопросах о путях и масштабах перемещения вещества. Тем не менее по мере уточнения наших знаний о физических условиях в глубинах Земли и сокращения числа допустимых гипотез наблюдается сближение точек зрения, особенно заметное в последнее время. Так, принимая во внимание значительную вязкость переходной зоны мантии ($\sim 10^{26}$ П), что находится в хорошем согласии с заметными отклонениями геоида от фигуры гидростатического равновесия [83], подавляющее большинство геофизиков предполагают в пределах мантии лишь радиальные перемещения

вещества типа всплывающих диапиров [19, 89] или гравитационных якорей [95]. Замыкание конвекции осуществляется в астеносфере, вязкость которой, судя по скорости подъема поверхности недавних оледенений, снижается до 10^{20} — 10^{21} П, и на границе ядро — мантия, где по сейсмологическим данным вязкость также резко уменьшается. Модификацией такого рода схемы является концепция «горячих точек», выдвинутая Дж. Т. Уилсоном [101] и интенсивно развиваемая У. Дж. Морганом [89]. В Советском Союзе сходных воззрений придерживаются О. Г. Сорхтин [24], В. П. Мясников, С. А. Ушаков, В. В. Федьинский [19] и ряд других исследователей.

Обратимся теперь к следствиям, дедуктивно выводимым из предположения о существовании термо-гравитационной конвекции в глобальном масштабе. Они весьма разнообразны и отнюдь не сводятся к спрединговому конвейеру. Эти следствия затрагивают и особенности рельефа континентов, устанавливаемые с помощью гармонического анализа; и глубинную плотностную неоднородность мантии, фиксируемую траекторными спутниковыми измерениями; и особенности термического разреза Земли. Последнее положение весьма существенно для петрогенетических построений, ибо, как отмечалось [19], принятие конвективного теплопереноса позволяет объяснить наблюдаемое несоответствие между определениями температуры на глубинах 100—500 км по магнитотеллурическим измерениям [20] и по теоретическим данным, полученным в предположении о существовании только кондуктивного теплопереноса.

Мы сосредоточим внимание на петрологических эффектах, порождаемых конвекцией в мантии, однако заметим, что преобладающая часть эффектов оказывается в той или иной мере конвергентной. Это обстоятельство, хотя и препятствует снижению гипотетичности занимающего нас предположения, но вместе с тем минимизирует убедительность конкурирующих построений. В значительной мере это относится и к каждому из вариантов основной схемы, несмотря на то, что выводимые следствия становятся более специфическими. Так, самые разные предположения о характере движущих сил конвекции приводят к весьма сходным распределениям векторов скоростей литосферных плит [97], включая и распределение, полученное У. Дж. Морганом [89], учитывавшим радиальное по отношению к фиксированным горячим точкам растекание мантийного субстрата в астеносфере.

Прямым петрологическим следствием построений Дж. Т. Уилсона и У. Дж. Моргана [89, 101, 102 и др.] могут считаться асейсмичные вулканические цепи, коллинеарные векторам скоростей соответствующих плит, с характерной диахронической активностью. Детальный анализ такого рода объектов, предпринятый в последнее время независимо разными исследователями, показал, что ориентировка вулканических цепей подчас существенно отличается от расчетной [52] и измеренная диахрония требует до-

пушения о миграции горячих точек в направлении, противоположном движению плиты [48]. Все это позволяет рассматривать горячие точки не только как возможные проекции вертикальных каналов, соединяющих астеносферу и промежуточный слой на границе ядра и мантии, но и как локальные термические ответвления внутри астеносферного течения.

Не продолжая анализа конкретных схем, обратимся к петрологическим следствиям, инвариантным относительно достаточно широкого класса механизмов конвекции. Выделим прежде всего глобальную синхронизацию магматической активности, давно уже вошедшую в фонд надежно зафиксированных эмпирических закономерностей. Объяснение этого феномена раньше искали в рамках пульсационной и ей подобных гипотез, допускавших чередование эпох глобального расширения и сжатия. Современные сейсмологические данные, как известно, фиксируют сосуществование относительно устойчивых планетарного масштаба зон расширения и сжатия. Между тем очевидно, что условие энергетического баланса может приводить к эпизодическим перестройкам системы глобальной глубинной конвекции, что в свою очередь обуславливает квазисинхронные изменения теплового режима коры и мантии и, следовательно, тектоно-магматической активности.

Интересный вариант автогенераторного механизма, обеспечивающего периодическую смену одноячейной структуры конвекции на двухъячейную с сопутствующим изменением доли тепловыделения в верхних зонах Земли, предложен О. Г. Сорохтиным [24]. Согласно этой схеме последняя крупная перестройка конвекции имела место на границе палеозоя и мезозоя. С учетом эволюционного тренда интервалы между перестройками, вероятно, не оставались постоянными на протяжении геологической истории. С этой точки зрения, по-видимому, не вполне прав Г. Хесс [63], полагавший, что «конвекция избавляется от всех своих старых обязательств каждые 200—300 млн. лет».

Всякая конвекция в конечном итоге направлена на восстановление термодинамического равновесия. Прямым следствием этого можно считать отсутствие существенных различий тепловых потоков на континентах и в океанах, хотя, как известно, среднее содержание радиоактивных элементов в соответствующих блоках литосферы далеко не одинаково.

Менее явным следствием указанной направленности конвекции является тенденция к гомогенизации составов изверженных горных пород. Неочевидность этой тенденции связана с тем, что она проявляется на фоне отчетливо выраженной дифференциации вещества Земли в целом и изверженных горных пород в частности. Соотношение между этими двумя противоположно направленными тенденциями к гомогенизации и дифференциации не оставалось постоянным в ходе формирования планеты. По современным данным [19, 24 и др.] обособление железного ядра протекало

достаточно быстро и завершилось в основном до начала собственно геологической истории Земли.

На ранних стадиях геологической эволюции в условиях интенсивного разогрева конвекция была сильна настолько, что почти полностью подавляла процесс дифференциации [73, 76]. Кроме того, как недавно отметил Д. Х. Грин [57], термодинамические параметры архейской мантии, судя по составу коматиитов, исключали возникновение гравитационных неоднородностей путем полиморфных превращений. В связи с этим не кажется принципиальным вопрос о существовании каких-либо неоднородностей в земных недрах на стадии аккреции протопланетного вещества. Эти неоднородности, если они существовали, были уничтожены на стадии догеологической гомогенизации. Все те неоднородности, которые мы имеем возможность фиксировать, возникли значительно позже по мере охлаждения планеты, ослабления глобальной конвекции и появления конвективных ячеек более высокого порядка [36, 63]. Вне зависимости от того, каким именно путем шло усложнение конвективной структуры, оно способствовало усилению возникавших вертикальных и латеральных неоднородностей в коре и мантии Земли.

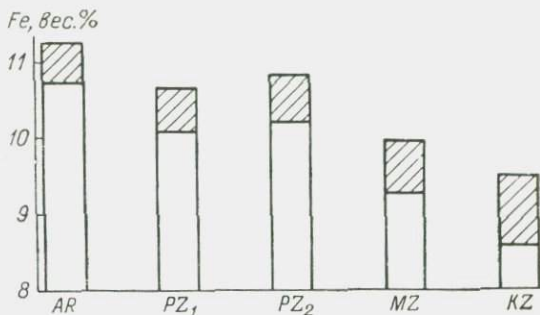
Признаки гомогенизации конвективного происхождения могут быть выявлены при сравнении составов глубинных пород из регионов с разной геологической предысторией при максимально возможном учете влияния локальных особенностей их формирования.

Таким требованиям, в частности, удовлетворяют толеитовые базальты, слагающие эвгеосинклинальные трюги и родственные им структуры геологического прошлого. Мы систематизировали более 6000 химических анализов этих пород, используя главным образом многочисленные литературные источники. В выборку попали архейские вулканы из зеленокаменных поясов докембрийских щитов, а также эвгеосинклинальные базальтоиды зон ранне-, среднепалеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста. В последнюю группу включены также современные толеиты из «тонких» одиночных островных дуг типа Тонга и Кермадек. Чтобы устранить влияние главного петрохимического тренда, концентрации окислов приведены к фиксированному 50%-ному содержанию двуоксида кремния.

При отсутствии мантийной конвекции, обеспечивающей эффективный массоперенос в латеральном направлении, закономерное изменение состава последовательно выплавляющихся базальтов наблюдалось бы только в пределах регионов с так называемым полициклическим типом развития (Урал, Кавказ). В частности, в такого типа регионах по мере истощения мантии относительно легкоплавкими компонентами наиболее молодые базальтоиды при прочих равных условиях должны прогрессивно обедняться железом. Такая тенденция действительно существует, но выражена она не очень резко.

Рис. 7.1. Содержание железа (в пересчете на FeO) в разновозрастных толеитовых базальтах.

AR — зеленокаменные пояса докембрийских щитов (960 химических анализов); эвгеосинклинали; PZ₁ — каледонские (2420), PZ₂ — варисцийские (1152), MZ — киммерийские (994), KZ — альпийские, включая современные островные дуги типа Тонга и Кермадек (740). Штриховкой показан 90%-ный достоверительный интервал.



С другой стороны, эволюционный тренд такого рода не должен наблюдаться при сопоставлении базальтов из разновозрастных структур, имеющих приблизительно одинаковую по содержанию и интенсивности геологическую предысторию. Иначе говоря, при отсутствии процесса, гомогенизирующего мантийный субстрат, мы не могли бы выявить эволюционный петрохимический тренд, сопоставляя базальты, хотя и резко различающиеся по возрасту, но отвечающие приблизительно одной и той же стадии истощения мантии. В частности, не было бы существенных различий в составе толеитов из раннедокембрийских зеленокаменных поясов и из современных островных дуг, далеко продвинутых в океан. И наоборот, конвективное перемещение мантийного субстрата должно приводить к тому, что современные базальты в островных дугах по своему составу укладываются в общий эволюционный тренд, отражающий, в частности, прогрессивное обеднение мантии железом и другими легкоплавкими компонентами (рис. 7.1).

Проведенная верификация свидетельствует в пользу анализируемой гипотезы. При этом, однако, остается неясным соотношение масс железа, выносимого из мантии в кору и в ядро. Существование первого выноса может считаться доказанным [2, 12], вынос в ядро не исключается. С аналогичных позиций могут быть проинтерпретированы также данные о прогрессивном обогащении калием более молодых изверженных пород, в том числе и мантийного происхождения [43].

Рассмотрим теперь петрологический эффект, обусловленный сменой режима термо-гравитационной конвекции. Как уже отмечалось, выделение и накопление тепла преимущественно в верхних зонах мантии (например, по схеме О. Г. Сорохтина [24]) неизбежно приводят к резкому снижению вязкости среды, что обусловлено нелинейной зависимостью коэффициента вязкости от температуры [30]. Эта зависимость такова, что повышение температуры на один-два порядка снижает коэффициент вязкости почти на 20 (!) порядков. Терморологический эффект усиливается также в результате нелинейного снижения теплопроводности пород при их разогреве, особенно в интервале 1000—1300° С

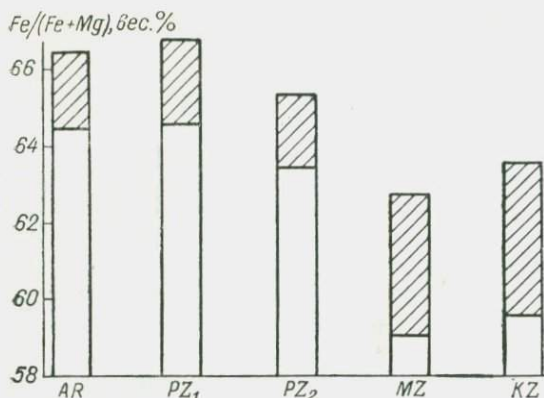


Рис. 7.2. Железистость разновозрастных толеитовых базальтов.

Усл. обозначения см. на рис. 7.1.

[18, 93]. Вследствие этого возрастающая теплоизоляция пород нижних горизонтов коры способствует сохранению и накоплению тепла в астеносфере. Наконец, надо отметить, что селективное плавление хотя бы 2—3% вещества мантии многократно снижает его вязкость. Это следует из известного соотношения Эйнштейна для вязкости системы твердое вещество — жидкость [26]. Вся совокупность однонаправленных эффектов приводит к тому, что в эпохи глобального разогрева верхней мантии можно ждать акселерации самых разнообразных проявлений мобилизма: рифтогенеза, ведущего к распаду континентов, возрастания скорости перемещения литосферных плит и т. п. Эти эпохи характеризуются также интенсивными и экстенсивными базальтоидными излияниями.

Совокупность такого рода феноменов, как известно [43 и др.], особенно отчетливо документируется в летописи мезозойского этапа геологической истории, что позволяет предполагать экстремальный разогрев мантии в эту эпоху. Во избежание логического круга подтверждение этого предположения мы будем искать, привлекая дополнительные аргументы. Особый интерес с этой точки зрения представляют палеотермометрические данные, непосредственно указывающие на температурные условия выплавления мантийных магм. В частности, для этой цели пригоден такой петрохимический индикатор термического режима в зоне магмообразования, как железистость выплавляющегося базальта. При условии, что исходная посылка справедлива, мезозойские базальтоиды в среднем должны отличаться пониженной железистостью. Если при этом учесть также общую тенденцию снижения концентрации железа в молодых образованиях, то следует прогнозировать их экстремально низкую железистость.

Справедливость этого вывода экспериментально проверена нами путем систематизации и обработки данных о химизме толеитовых базальтов эвгеосинклиналильного типа, охарактеризованных выше. Рис. 7.2 наглядно иллюстрирует и общий эволюционный

тренд состава однотипных пород и локальный минимум железистости, приходящийся на базальтоиды мезозойского возраста. Эти данные хорошо согласуются с установленными А. Ф. Белоусовым [4] изменениями химизма пород при вариациях массовости вулканических излияний.

Последнее в данной серии следствие, имеющее большое методическое значение, касается характера связей между индикаторами состава, строения и физических условий глубинных и поверхностных зон Земли. При отсутствии латерального тепло- и массопереноса наблюдались бы весьма сильные связи, отражающие комплементарность составов в пределах каждого сферического сектора планеты. Иными словами, разрез Земли напоминал бы картину, типичную для дифференцированных долеритовых силлов, т. е. отмечалось бы соответствие усредненного состава по вертикальному сечению силла составу закаленной фации.

Весомым доводом в пользу фиксированных построений могло бы быть жесткое соответствие термических и плотностных неоднородностей в мантии современному расчленению поверхности Земли на океаны и континенты. Этого, как известно, не наблюдается. Далее, вне зависимости от того, являются ли эти неоднородности изначальными (догеологическими) или порождены своеобразием геологической истории крупных геоблоков, мы вправе были бы ждать прямых и сильных связей между зафиксированными на разных глубинных уровнях итогами формирования слоистой структуры Земли. Это также не находит экспериментального подтверждения. Распределение аномальных масс на глубинах до 700 км (по результатам спутниковой гравиметрии), равно как и областей повышенного разогрева (по данным магнитотеллурических наблюдений), не обнаруживает достаточно сильных корреляционных связей с типом земной коры.

Другой гипотетичный крайний случай возникает, когда конвективное перемешивание мантийных масс происходит с такой интенсивностью, при которой глубинные неоднородности уничтожаются столь быстро, что в современную эпоху удается фиксировать только неоднородности *in statu nascendi*. Такие неоднородности действительно фиксируются [55, 73, 74, 78], но столь же существенны и другие [38 и др.]. Термические и плотностные аномалии, обусловленные неоднородностями в переходном слое мантии, вследствие ее значительной вязкости характеризуются большой инерционностью и, по последним оценкам У. М. Каула [76] и других геофизиков, способны сохраняться около миллиарда лет.

При анализе сопряженных вариаций петрологических и геофизических данных удается показать, что и температурные и плотностные неоднородности мантии представляют собой интегральные эффекты, обусловленные как современными процессами на границах литосферных плит, так и событиями отдаленного геологического прошлого, когда океанические хребты и «горячие края

континентов» занимали положение, весьма отличное от нынешнего. Расчленение интегрального эффекта с количественной оценкой вкладов разновременных и разнотипных процессов оказывается нелегкой задачей. Тем не менее путем ряда редуций исходных наблюдаемых величин с последовательным элиминированием очевидных влияний удастся получить корреляции состава изверженных пород с физическими характеристиками глубин.

Так, из глобального магнитного поля приходится вычитать не только дипольную, но и дрейфующую компоненту, обусловленную турбулентностью в слое на границе ядро — мантия [19]. Остаточное (недрейфующее) магнитное поле типа Z_{st} [104], отражающее устойчивые области различного температурного режима в переходном слое мантии, в свою очередь используется для редукции аномального гравитационного потенциала. В результате такой операции исключаются гравитационные неоднородности, обусловленные термическим разуплотнением глубинного материала. Остаточные аномалии, отражая особенности современной системы конвективных ячеек, оказываются более тесно связанными с магматической активностью мезозойского и кайнозойского времени, и в частности с составом новейших вулканических излияний. С этих позиций получает естественное объяснение сочетание положительных гравитационных аномалий с повышенным (в 2—3 раза по сравнению со средним значением) тепловым потоком. Такие сочетания типичны, в частности, для тылов островных дуг включая зоны вторичного спрединга. К ним относятся Охотское море, Венгерская низменность и многие другие районы. Указанное сочетание физических характеристик возможно только в случае поступления из глубин достаточно плотного и вместе с тем разогретого материала, что трудно себе представить, если не опираться на механизм мантийной конвекции.

ПОЛОЖЕНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЙ В КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЕ, ВЫЯВЛЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ГЛУБИННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

В соответствии с основной схемой плитной тектоники главные различия петрографических провинций определяются их положением в конвективной ячейе в период формирования. В первом приближении следует различать провинции, возникшие в зонах восходящего и нисходящего конвективного течения. Далее приходится учитывать телескопирование провинций различного типа в результате перемещения плит в системе взаимодействующих ячеек различного масштаба. Сюда относятся случаи сложного сочленения плит, вторичного спрединга в тылу островных дуг и другие подобные явления. Чем интенсивнее конвективное течение и чем длительнее оно сохраняет свою ориентировку, тем более обширные петрографические провинции при этом форми-

руются. Локальные ответвления мантийного течения обычно недолговечны. Устойчивый подъем мантийных масс всегда ведет к рифтогенезу, спредингу и в конечном итоге к океанизации территории. Изменение конвективного режима может прервать этот процесс на любой его стадии. Таким образом, в частности, возникают трапшовые провинции, часть из которых, по справедливому замечанию В. В. Белоусова, можно назвать «неудавшимися океанами». Положением региона в конвективной ячее определяется не только тип петрографической провинции, но и характер связи поверхностных геологических явлений с особенностями строения глубин. Конечно, следует учитывать, что комбинация небольшого числа конвективных ячее разного масштаба и ориентировки может приводить к трансляции поверхностных и глубинных геологических эффектов. При этом поверхностные эффекты могут концентрироваться в иных местах, чем эффекты глубинные; возможно также их усиление или, напротив, полная нейтрализация. Отсюда следует необязательность строгого чередования зон расширения и сжатия. Так, например, Африканская плита располагается между двумя субпараллельно ориентированными зонами спрединга (Срединно-Атлантический и Индийский хребты), и тем не менее в ее пределах не формируются петрографические провинции, типичные для областей сжатия. Различия в скорости спрединга прилегающих сегментов Индийского и Атлантического океанов приводят к тому, что напряжения сжатия концентрируются главным образом в Юго-Восточной Азии и примыкающей к ней части Тихого океана.

В пределах каждого из двух главных типов петрографических провинций (зон расширения и сжатия) наблюдается существенная изменчивость наборов пород, входящих в магматические ассоциации, химизма отдельных петрографических разновидностей, а также связи петрохимии со строением глубин. Принципиальное значение для понимания закономерностей строения и развития магматических провинций, формирующихся в зонах восходящего мантийного течения, имеют работы М. Н. Басса [35] и К. Ф. Шейдеггера [94]. Ими убедительно показаны существенные различия химизма базальтов, выплавляющихся в разных океанических хребтах.

Базальты из быстро расширяющихся хребтов (Восточно-Тихоокеанское поднятие) содержат меньше глинозема, больше железа и кремнезема по сравнению с базальтами из хребтов, расширяющихся медленно (Срединно-Атлантический). Хребты, разрастающиеся с умеренной скоростью (Хуан-де-Фука), сложены базальтами, занимающими промежуточное положение по этим параметрам.

Учитывая указанные соотношения, М. Н. Басс и К. Ф. Шейдеггер пришли к выводу, что в быстро расширяющихся хребтах магматические очаги расположены на меньшей глубине, чем в хребтах, расширяющихся медленно. Это может означать, что

срединно-океаническим хребтам с энергичным спредингом соответствует более интенсивный глубинный разогрев, обеспечивающий высокое положение геозотерм. Попутно заметим, что в пределах одного и того же океанического хребта состав магматических пород, вероятно, не остается постоянным. Это непосредственно следует из различия скоростей спрединга в каждом из блоков хребта, ограниченных соседними трансформными разломами. Эмпирический материал, необходимый для подтверждения этого предположения, в настоящее время отсутствует, точнее говоря, сведения о химизме пород из разных блоков океанических хребтов скудны и не проанализированы с должной тщательностью.

На континентах гомологами срединно-океанических хребтов, а иногда их непосредственными продолжениями являются рифты и связанные с ними трапшовые провинции [17]. Интенсивный рифтогенез сопровождается массовыми вулканическими излияниями преимущественно толеитового состава. Медленно развивающиеся структуры, напротив, характеризуются вулканизмом щелочного профиля; классическим примером являются тяготеющие к Восточно-Африканскому рифту провинции Торо-Анколе, Вирунга, Буфумбира и др. Наблюдения в срединно-океанических хребтах и рифтовых зонах континентов дают основание предположить, что петрохимическая специализация трапшовых провинций прошлого также в значительной мере определяется пространственно-временной изменчивостью термического режима мантии, зависящего от положения и интенсивности восходящего мантийного течения. Конкретизируя этот тезис применительно к мезозойскому этапу геологической истории Земли, резонно допустить, что химический состав трапшов при прочих равных условиях зависит от их пространственно-временной близости к зонам проявления наиболее мощных восходящих течений, обусловивших раскол Гондваны и Лавразии в пермо-триасовое время.

Чтобы подтвердить справедливость этого предположения, требуется проверить наличие существенной корреляционной связи между составом трапшов и какими-либо показателями удаленности их от зон мезозойского спрединга. В плане верификации этого предположения мы провели систематизацию и обобщение сведений о составе пород всех важнейших трапшовых провинций мира (Восточно-Европейская, Сибирская, Китайская, Североамериканская, Африканская, Австралийская, Антарктическая, Индийская платформы). Всего было учтено более 4000 полных химических анализов, характеризующих состав недифференцированных базальтов и долеритов в 204 вулканических ареалах. Весь этот материал обработан статистически и проанализирован с учетом сопряженных вариаций параметров глубинного строения регионов. При этом выявился отчетливый эволюционный тренд изменения состава трапшов, заключающийся в их систематическом обеднении железом на протяжении последних 2 млрд. лет. Получила

подтверждение также «тенденция В. Л. Масайтиса» — возрастание фемичности пород по мере увеличения их эщиплатформенного возраста.

На фоне этих тенденций отчетливо обнажилась интересующая нас зависимость состава траппов от пространственно-временной близости их к областям пермо-триасового раскола палеоконтинентов. Иллюстрацией этому могут служить результаты канонической корреляции петрохимических параметров пород с расстоянием R между центром трапповой провинции и осью пермского раскрытия океанов, интервалом t между началом излияния тех или иных траппов и фиксированным моментом геологической истории — началом распада Пангеи, а также со средней мощностью l вулканогенных толщ.

R	t	Канонический корень r_K^2	SiO_2	CaO	K_2O	$Fe/(Fe+MgO)$	l
+0,93	+0,38	0,56	-0,56	-0,55	-0,13	+0,45	-0,43

Как видим, чем ближе к зонам пермо-триасового раскола Пангеи находилась формирующаяся трапповая провинция, тем ярче выражен толеитовый уклон слагающих ее пород. Существенно, что эта закономерность распространяется не только на мезо- и кайнозойские образования, но также и на палеозойские и даже докембрийские, что дает основание видеть в ней проявление определенной консервативности глубинных условий и тенденцию унаследованного геологического развития.

Характерны в этом отношении траппы Декана. Наиболее ранние из них имеют юрский возраст. Их формирование происходило вскоре после начала раскола в непосредственной близости от области палеосочленения Индии, Южной Африки и Антарктиды. Это обстоятельство и предопределило отчетливо выраженный толеитовый облик вулканических продуктов, указывающий на малые глубины генерации магмы и большую полноту плавления перегретого мантийного субстрата. Аналогичный состав имеют синхронные ранним деканским траппам долериты Карру, Антарктиды и Тасмании, некогда связанные друг с другом также и пространственно.

Основная масса траппов Декана существенно моложе: их возраст поздний мел-палеоген. Этому моменту геологической истории отвечают значительное удаление Индии от южных континентов и менее разогретый сектор мантии. Как показано в работах Н. С. Чуза, молодые траппы Декана связаны с формированием новых структур — двух рифтовых зон в западной части Индостана (Нарбада-Сон и Камбей). Эти траппы характеризуются ясно выраженным щелочным уклоном, а их мощность меняется от 2000 м на западе полуострова (район Бомбея) до 100—200 м на востоке. С учетом изложенного повышенную щелочность молодых траппов Индийской платформы нет оснований связывать с проявлением генеральной эволюционной тенденции. Дополнительной

аргументацией служит типично толеитовый состав синхронных им траппов, изливавшихся в непосредственной близости от зон энергичного спрединга (например, в Исландии).

Обратимся теперь к зонам нисходящего мантийного течения, также обнаруживающим большое разнообразие как в петрографическом составе, так и в соотношениях химизма пород с глубинными условиями. Предварительно, однако, рассмотрим вопрос об устойчивости соотношений между глубинными и поверхностными явлениями, т. е. о сохранности тех неоднородностей в мантии, которые генетически или парагенетически связаны с формированием петрографических провинций. Этот вопрос важен, поскольку в зависимости от ответа на него по-разному интерпретируются данные глубинной геофизики в связи с задачами палеотектонической реконструкции и оценки рудоносности территории.

В соответствии с основными положениями новой глобальной тектоники можно считать, что необходимым условием сохранения петрографической провинции является ее расположение во внутренней области литосферной плиты, т. е. в пределах горизонтального фрагмента конвективной ячей. Что касается согласованности вариаций глубинных и близповерхностных неоднородностей, то можно допустить, что она определяется мощностью литосферы. На континентах, где мощность литосферы достигает 250—350 км, эта согласованность должна соблюдаться в более широком диапазоне глубин, чем на океанах, где мощность литосферы редко превышает 50 км. Для проверки справедливости этих предположений, очевидно, необходимо провести сравнительный анализ соотношений глубинных и поверхностных эффектов, наблюдаемых в момент формирования петрографических провинций, т. е. на активных краях литосферных плит, и тех соотношений, которые имеют место в пределах аналогичных петрографических провинций прошлого, сохранившихся во внутренних частях плит.

Рассмотрим эти соотношения на примере провинций, сформировавшихся в зонах нисходящего течения, т. е. в островных дугах и родственных им структурах. При этом будем анализировать связи между химическим составом вулканических пород и аномалиями геопотенциала, отражающими гравитационные неоднородности мантии и определяющими фигуру геоида. Выбор указанных индикаторов сделан по следующим соображениям. Как известно, плотность вещества ρ и определяемая ею гравитационная неоднородность оболочек Земли зависят от химического состава мантии (мерой может служить, например, средняя относительная атомная масса m), а также от pT -условий, в которых это вещество находится:

$$d\rho = \frac{\partial\rho}{\partial p} dp + \frac{\partial\rho}{\partial T} dT + \frac{\partial\rho}{\partial m} dm.$$

Можно показать, что каждый из членов в правой части равенства способен вызвать вариации плотности, достаточные для воз-

никновения аномалий геопотенциала. Например, замена FeO на MgO в пределах 1—3% эквивалентна изменению плотности в необходимом диапазоне.

Наряду с этим известно, что в химическом составе вулканических пород глубинного происхождения также находят отражение и состав исходного мантийного субстрата и его физические параметры. Последние, правда, относятся не ко всей аномалиеобразующей области мантии, а только к той ее части, которая является непосредственным источником магматического расплава. Тем не менее, учитывая тесную пространственную и генетическую связь этих областей мантии, мы вправе ждать некоторой согласованности в изменениях их характеристик, а следовательно, и коррелированности индикаторов этих характеристик, т. е. состава вулканических пород и аномалий геопотенциала.

Сведения о глобальном гравитационном поле Земли, как известно, поставляются астрогеодезическими наблюдениями [51], а также систематическими измерениями орбит искусственных спутников [53, 58, 77]. Составляемые по этим данным карты превышений h геоида над сфероидом несколько отличаются друг от друга, поскольку разные авторы учитывают сфероиды с неодинаковым сжатием. Известно, что глобальные гравитационные аномалии, выражаемые величиной h , обнаруживают статистическую связь с интенсивностью теплового потока и глубиной сейсмических очагов [55, 78 и др.]. Поэтому аномалии обычно связывают с изменениями физического состояния глубинных подкоровых масс. Прямых указаний на вероятную зависимость аномалий геопотенциала от состава мантийного субстрата и на их корреляцию с химизмом пород ранее не приводилось.

Для выявления интересующих нас соотношений в пределах современных зон нисходящего течения были систематизированы сведения о химизме вулканических продуктов в пределах Тихоокеанского кольца включая Камчатку, острова Курильские, Японские, Тайвань, Марианские, Большие и Малые Зондские, Тонга, Кермадек, Фиджи, Соломоновы, Новые Гебриды, Новая Гвинея, Новая Зеландия, Алеутские, а также Антарктику, Центральную Америку, Каскадные горы Северной Америки. Около 3500 полных химических анализов эффузивов вначале группировались с учетом главных петрографических разновидностей пород (базальты, андезиты и т. д.), а затем усреднялись в пределах каждого из 202 ареалов вулканизма. Величина h снималась с карты, приведенной в работе [53].

С помощью линейного корреляционного анализа установлена значимая связь превышения h с некоторыми химическими характеристиками состава пород. Эта связь особенно отчетлива в продуктах наиболее глубинных магм — базальтах, что хорошо согласуется с данными А. Сигимуры [96], вычислившего коэффициенты множественной корреляции между химическим составом базальтов, андезитов и дацитов, с одной стороны, и глубиной

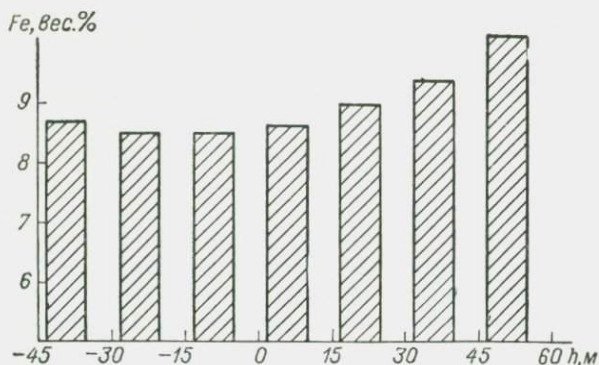


Рис. 7.3. Соотношение содержания железа в базальтах Тихоокеанского кольца и превышений h геоида над сфероидом.

Вулканические ареалы сгруппированы в зависимости от преобладающих значений превышения h на карте Е. Гапошкина и К. Ламбена [53].

фокусов землетрясений — с другой. В зонах с большими значениями h чаще встречаются породы, относительно обогащенные железом (при несколько пониженном содержании титана и натрия), т. е. породы с повышенной плотностью. Дальнейшее изучение этой связи показало ее нелинейность: содержание железа в базальтах возрастает с увеличением h по закону

$$y(h) = y_0 + a_1 h + a_2 h^2,$$

что хорошо видно на рис. 7.3.

Нелинейность связи между содержанием железа и превышениями h можно объяснить тем, что содержание железа обнаруживает также положительную корреляционную связь с максимальной глубиной сейсмических очагов. Ускоренный рост концентраций железа в мантийных выплавках с увеличением аномального геопотенциала или, что эквивалентно, замедленный рост потенциала при увеличении концентрации железа может быть следствием возрастания глубины до масс мантийного вещества, обладающего повышенной плотностью, и (или) сокращения занимаемого ими объема. Весьма характерно, что в регионах с максимальными превышениями геоида над сфероидом (Тонга, Кермадек, Новые Гебриды, Перу, Чили) ограничено пространство, в котором выделяется основная часть сейсмической энергии, причем эта область располагается в глубоких частях зон субдукции [49].

Все эти данные, учитываемые в совокупности, позволяют сделать вывод, что при умеренных скоростях поглощения океанической плиты значительная часть поступающего материала успевает растечься в астеносферном слое, не приводя к накоплению

избыточных масс. Интенсивная субдукция, напротив, ведет к значительной концентрации избыточных масс в интервале глубин 200—700 км, что фиксируется высокими положительными аномалиями геопотенциала. Погружение в мантию (в подастеносферный слой) больших масс океанической коры сопровождается мобилизацией и подъемом до уровня магмообразования глубинных слабо дифференцированных высокожелезистых продуктов, что соответствующим образом отражается на составе вулканических пород.

Таким образом, в современную эпоху в зонах нисходящего конвективного течения одновременно с корой континентального типа формируются плотностные неоднородности в мантии. Эти процессы генетически связаны между собой и в совокупности отвечают тенденции вертикального расслоения вещества Земли, индикатором чего служит состав пород, слагающих кору, и в частности содержание железа и железистость базальтоидов.

Для суждения о глубине размещения аномальных масс и глубине зоны магмообразования, а главное о соотношении этих глубин, ценную информацию поставляют сведения о режиме сейсмогенерирующих напряжений. Эти сведения в виде обобщенных диаграмм содержатся в работе [49]. С указанных диаграмм были сняты данные о напряжениях сжатия и растяжения для каждого 100 км интервала глубин. Полученные напряжения ставились в соответствие содержанию окислов петрогенных элементов в базальтах, андезитах и дацитах каждого вулканического ареала (рис. 7.4), а также значениями гравитационных аномалий в редукции Буге и аномального геопотенциала. Содержание железа во всех типах пород обнаруживает отчетливую положительную связь с интенсивностью сжимающих напряжений на глубинах 200—400 км. За пределами этого интервала корреляционные связи постепенно ослабевают и на глубинах 0—100 и 500—700 км становятся незначимыми.

Для выявленной закономерности может быть предложено одно из следующих объяснений.

1. В ходе эволюции вулкано-тектонических структур одновременно со снижением сейсмичности в зонах Беньофа происходит

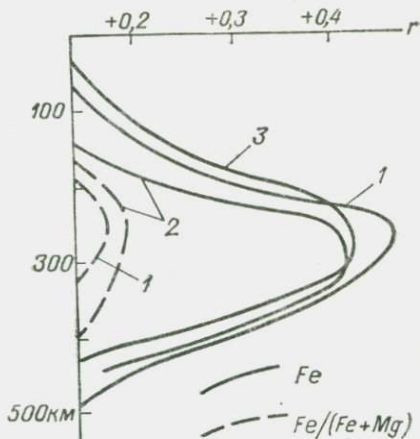


Рис. 7.4. Корреляция r содержания железа и железистости вулканических пород с интенсивностью напряжений сжатия в зоне Беньофа.

1 — базальты, 2 — андезиты, 3 — дациты.

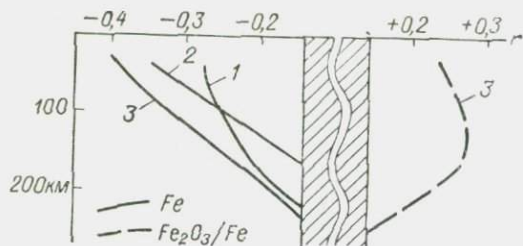


Рис. 7.5. Корреляция r петрохимических параметров вулканических пород с интенсивностью напряжений растяжения в зоне Беньофа. 1 — базальты, 2 — андезиты, 3 — дациты. Штриховкой показан 95%-ный достоверный интервал.

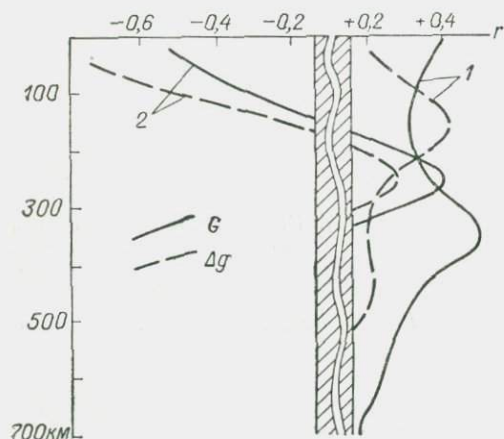


Рис. 7.6. Корреляция r характеристик гравитационного поля с интенсивностью напряжений в зоне Беньофа. Напряжения: 1 — сжатия, 2 — растяжения.

прогрессивное истощение мантии легкоплавким компонентом — железом.

2. Содержание железа в вулканитах и сейсмичность меняются сопряженно в зависимости от интенсивности поступления в зону магмообразования слабо дифференцированного материала океанической коры.

3. Интенсивность процесса субдукции определяет интенсивность сейсмичности и количество слабо дифференцированного (с повышенным содержанием железа) мантийного вещества, выдавливаемого в зону магмообразования из подастеносферного слоя.

Не исключено также совокупное влияние всех перечисленных факторов.

Соответствие экстремумов коррелограмм глубинам 200—400 км может быть обусловлено существованием именно в пределах этого интервала глубин условий для латерального перемещения масс вещества и (или) генерации магмы. Коррелограмма железистости качественно повторяет зависимости, отмеченные для содержания железа, хотя экстремум связи выражен слабее. Весьма вероятно, что вариации железистости вулканитов обусловлены теми же факторами. Кроме того, следует учитывать возможное влияние колебаний давления в пределах зоны магмообразования, что

непосредственно отражается на содержании в мантийных магмах легкоплавкой железистой компоненты.

Связь петрохимических характеристик с напряжениями растяжения на разных глубинах (до 400 км) (рис. 7.5) можно считать подобной отмеченной выше для сжимающих напряжений, если иметь в виду, что напряжения растяжения, особенно на глубинах 100—200 км, характерны преимущественно для поздней стадии развития островных дуг. Положительную корреляцию окисленности железа можно объяснить относительным увеличением концентрации щелочей и летучих при снижении давления в результате интенсивных растягивающих напряжений. K

На рис. 7.6 представлены коррелограммы, построенные для характеристик гравитационного поля: аномалий в редукции Буге Δg и аномального геопотенциала G . Как и следовало предполагать, коррелограмма аномального геопотенциала имеет экстремум, смещенный в область больших глубин. Эта коррелограмма хорошо согласуется с мнением Б. Изакса и П. Молнера [66] о том, что глубину 700 км, возможно, следует рассматривать как нижнюю границу астеносферы, поскольку эта глубина отвечает предельному погружению океанической плиты. Отметим также, что интервал существенных корреляций для геопотенциала G явно шире, чем для петрогенных элементов. Это может быть частично обусловлено зависимостью аномального геопотенциала не только от изменения химического состава мантийного субстрата, но и от фазовых превращений, например в связи с переходом базальта в эклогит. } K

Особого пояснения требует положительная корреляция аномалий G и Δg с напряжениями растяжения на глубинах 200—300 км. Как известно [49], интенсивные разжимающие напряжения обычны для верхнего 200-километрового интервала мантии. Глубже они фиксируются редко, всякий раз смежая интенсивные напряжения сжатия. Таким образом, можно допустить, что указанная положительная корреляция напряжений растяжения обусловлена некоторой инерционностью состояния уплотненного мантийного вещества под воздействием непосредственно предшествовавших сжимающих напряжений. K K

Таким образом, с помощью сейсмологических данных, являющихся прямыми индикаторами состояния глубин, можно убедиться, что в современную эпоху в зонах субдукции наблюдается отчетливая согласованность изменений плотности мантийного вещества и состава вулканических вышлавков в интервале глубин 100—400 км.

Обратимся теперь к существенно более древним образованиям, которые в течение длительного времени пребывают вне пределов воздействия вертикальных ветвей конвекции. В полной мере этому условию удовлетворяют докембрийские щиты, точнее, их неактивизированные блоки. В пределах таких блоков рассмотрим так называемые зеленокаменные пояса, сложенные преимущественно

базальтоидами, возраст которых оценивается в 2,6—2,8 млрд. лет, что соответствует архею (или палеопротозою, в терминологии Л. И. Салопа). В большинстве своем эти породы испытали умеренный метаморфизм (фаши зеленых сланцев, реже эпидот-амфиболитовая и амфиболитовая). Для сравнительного анализа состава пород было систематизировано около 1000 полных химических анализов из многочисленных литературных источников.

Статистическая обработка петрохимических данных показала, что наиболее низкие концентрации калия (0,2—0,3%), железа (~10% в пересчете на FeO) при крайне слабой его окисленности (15—20%) и вместе с тем повышенное содержание алюминия (14,5—15%) свойственны породам Индостанского, Австралийского и Трансваальского щитов. Этой же особенностью, хотя и не столь четко выраженной, характеризуются Родезийский и Канадский щиты. В отличие от пород указанной группы вулканиты в пределах европейских щитов содержат в среднем почти в 2 раза больше калия и заметно меньше алюминия. Они отличаются также повышенной железистостью при менее резком преобладании закисного железа над окисным.

Сравнительный анализ аномального геопотенциала в пределах докембрийских щитов приводит к следующим результатам. Наибольшими положительными превышениями h геоида над сфероидом отличаются европейские щиты (Украинский, Балтийский), а также Воронежский кристаллический массив. Все остальные щиты характеризуются отрицательными аномальными значениями геопотенциала. Для сопоставления с петрохимическими данными использовались доминирующие значения превышений для щитов в целом, а также их осредненные значения для тех блоков щитов, которые вмещают архейские зеленокаменные пояса. В обоих случаях получены качественно однотипные результаты, несколько более четкие при детализации материала (рис. 7.7). Выявленные соотношения превышений h и петрохимических характеристик пород подобны тем, что были установлены для островных дуг. Это обстоятельство позволяет предположить, что наблюдаемое в настоящее время соотношение состава пород и строения глубин в докембрийских щитах отражает условия, существовавшие во время выплавления архейских базальтоидов. При этом наиболее интенсивная субдукция имела место в процессе формирования вулканогенных структур европейских щитов.

Дополнительным свидетельством в пользу развиваемых представлений служат геофизические данные о строении соответствующих блоков коры. Для хорошо изученного Украинского щита в целом характерна повышенная мощность H коры, достигающая местами 55 км, а также повышенная средняя скорость \bar{v}_P продольных сейсмических волн [6]. Воронежский кристаллический массив также отличается значительной мощностью коры. Наличие глубоких прогибов поверхности Мохо при малых

Щиты	h, м				Fe, %			Fe ₂ O ₃ /Fe			Al ₂ O ₃ , %			v _p , км/с			H, км			
	-60	-30	0	+30	10	11	12	0,1	0,2	0,3	13,5	14,0	14,5	6,3	6,4	6,5	36	40	44	48
Украинский	[hatched]				[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			
Балтийский	[hatched]				[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			
Трансваальский, Родезийский	[hatched]				[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			
Западно- Австралийский	[hatched]				[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			
Канадский	[hatched]				[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			
Индостанский	[hatched]				[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			[hatched]			

Рис. 7.7. Петрохимическая и геофизическая характеристика зеленокаменных поясов докембрийских щитов.

превышениях рельефа над уровнем моря и при отсутствии больших отрицательных гравитационных аномалий позволило А. А. Борисову [6] предположить, что нижняя часть коры и верхняя часть мантии в пределах Украинского щита и Воронежского массива сложена особо плотными породами.

Балтийский щит по строению земной коры близок к Украинскому. В центре его мощность коры достигает максимального значения (до 45 км). Глубина поверхности Мохо уменьшается в направлении к Белому и Баренцеву морям и к горному обрамлению — каледонидам Норвегии. В пределах большей части Канадского щита наблюдаются сравнительно слабые вариации глубины поверхности Мохо относительно среднего уровня 36 км. Существенное увеличение мощности коры установлено в области Нью-Квебек, а также под оз. Верхнее. Геофизические характеристики земной коры Южной Африки и Западной Австралии весьма близки между собой ($H \approx 36$ км, пониженные значения \bar{v}_p). Индостанский щит изучен слабо, так что литературные данные могут оказаться не вполне точными.

Приведенные сведения показывают, что щиты, в пределах которых наблюдаются наиболее крупные положительные аномалии геопотенциала, отличаются в среднем более мощной и плотной корой. С учетом наблюдаемого уплотнения мантийного субстрата в областях современных зон субдукции, а также известных [40] соотношений между железистостью минералов и скоростью распространения сейсмических волн (одновременный рост содержания железа и скорости v_p возможен лишь при опережающем повышении содержания магния и понижении содержания кремнезема) можно полагать, что и глубинные гравитационные неоднородности, и различия в составе и строении верхних оболочек Земли, равно как и петрохимия изверженных пород докембрийских щитов, отражают интенсивность процесса формирования континентальной коры, протекавшего более 2,5 млрд. лет назад. Иными словами, существенные различия мантийного субстрата под щитами можно считать унаследованными, сохранившимися от конвективной эрозии.

Это заключение, однако, неизбежно порождает вопрос, в какой мере «мантийные корни щитов» могут сохраниться в условиях дрейфа литосферных плит. Ответ может быть дан с учетом значительной мощности соответствующих блоков литосферных плит. В пределах докембрийских щитов, как известно, мощность литосферы достигает 250—300 км. Точнее говоря, во многих случаях сейсмические измерения вообще не фиксируют астеносферного слоя под щитами. Это может показывать, что значительная доля избыточных масс, накапливавшихся в мантии в процессе субдукции, участвовала в последующем дрейфе плит. Допустимо считать, таким образом, что «мантийные корни щитов» представляют собой верхнюю часть избыточной массы, «отсеченной» в процессе дрейфа на уровне палеоастеносферы.

Во многих работах, касающихся вопросов мобилизма, литосферные плиты сравниваются с плавающими льдинами, в теле которых «вморожена» информация об истории их возникновения и перемещения. Эта аналогия представляется очень удачной, ибо стимулирует дальнейшую расшифровку записей. С учетом изложенного выше можно добавить, что «льдины» имеют разную толщину и плотность. Толстые и плотные — это щиты Европейской платформы, особой легкостью отличается Антарктический щит, о чем свидетельствуют отрицательные гравитационные аномалии [53, 58], которые, как подчеркивает У. М. Каула [11], не могут быть полностью объяснены современным строением самой верхней оболочки континента.

Различия в условиях формирования зеленокаменных поясов докембрийских щитов важны для понимания специфики состава и размещения и многих других геологических объектов в этих регионах. По существу, эти различия предопределили всю последующую геологическую историю щитов, включая металлогеническую специализацию магматических комплексов. Щиты плотной и мощной корой, испытали значительно более сильную гранитизацию верхней части коры и метаморфизм, что привело к рассеянию и уничтожению рудных концентраций, связанных с зеленокаменными поясами. Слабое и умеренное проявление этих процессов способствовало сохранению месторождений, чем и объясняется высокий рудный потенциал зеленокаменных поясов Канады и их африканских и австралийских эквивалентов. Поэтому надежды на обнаружение богатого оруденения в пределах европейских щитов резонно связывать с выявлением в их пределах таких структурных блоков, геологическая история которых наиболее полно соответствует истории сопоставимых блоков Канадского и ему подобных щитов. Индикатором таких блоков могут служить характерные сопряженные изменения геофизических параметров коры и состава вулканогенных пород.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, СВЯЗАННЫХ С НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ГРАВИТАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКЦИИ

Очевидным следствием термо-гравитационной конвекции является нарушение изостатической уравновешенности литосферы в целом и ее отдельных крупных блоков. Сопутствующие этому петрологические эффекты изучены слабо, поскольку при обращении к событиям геологического прошлого геологу удается наблюдать лишь конечный результат перемещения глубинных масс и более или менее полную уравновешенность литосферы.

Понятно, что характер нарушения гравитационного равновесия может быть существенно разным при разных размерах

конвективной ячей. Соответственно неодинаковыми оказываются и ресурсы, идущие на восстановление равновесия; петрологические эффекты, по-видимому, также не могут быть вполне идентичными.

Здесь мы рассмотрим явления регионального уровня, т. е. соотношение петрогенезиса и изостазии при размерах конвективной ячей $n \cdot 10^2$ км. При этом ограничимся ячейми, возникающими на горячих окраинах континентов. Эти области, являясь ареной современной тектоно-магматической активности выделяются, как известно [3], значительными изостатическими аномалиями. Расчеты показывают, что центры масс, обуславливающих наиболее значительные изостатические аномалии, располагаются на глубинах до нескольких сотен километров. Аналогичный диапазон глубин типичен для очагов многих землетрясений, что дает основание связывать все эти явления с процессом выплавления базальтоидной магмы и перемещением мантийных масс при субдукции.

Можно представить по меньшей мере пять разных схем соотношения между вулканическим процессом и степенью гравитационного равновесия, выраженного в изостатических аномалиях.

1. Изостатические аномалии отражают физическое состояние вещества на больших глубинах, в то время как петрохимические признаки избытка или недостатка масс фиксируют ситуацию в зоне вулкана. В этом случае можно ожидать отсутствия четкой связи гравитационных аномалий в изостатической редукции с петрохимической характеристикой лав.

2. Изостатические аномалии, так же как и состав вулканических излияний, фиксируют избыток (недостаток) глубинных масс.

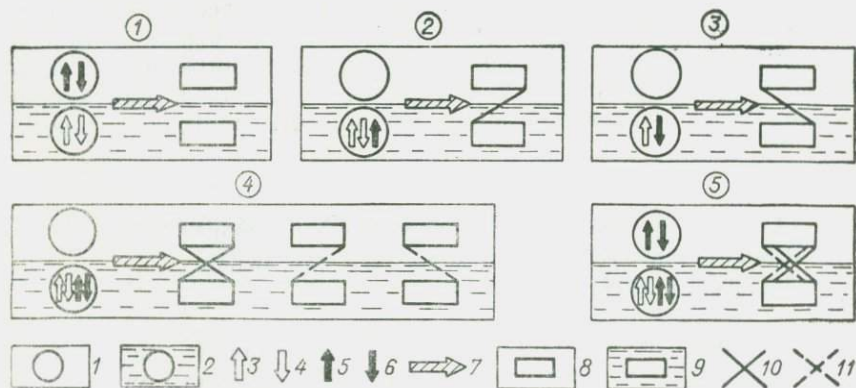


Рис. 7.8. Дедуктивные схемы соотношения петрогенезиса и изостазии.

Процессы: 1 — на малых глубинах (в зоне вулканического аппарата), 2 — на больших глубинах (в мантии); изменение гравитационного равновесия: 3, 4 — в результате конвективных перемещений мантийных масс (3 — нарушение, 4 — восстановление), 5, 6 — в результате петрогенетических процессов — перемещения расплава и изменения его состава (5 — нарушение, 6 — восстановление); 7 — логический знак следования; индикаторы избытка (недостатка) масс: 8 — петрохимические, 9 — геофизические; корреляционные связи (положительные и отрицательные) между различными индикаторами избытка (недостатка) масс: 10 — сильные, 11 — слабые.

Цифры в кружках — номера схем, соответствующие их описанию в тексте.

Однако изостатическая компенсация осуществляется не в результате петрогенетических процессов или достигается на иных глубинах. При этом мы вправе ожидать сопряженной вариации петрохимических и геофизических индикаторов аномальных масс.

3. Изостатические аномалии свидетельствуют только о результирующем уклонении от равновесия. Компенсация осуществляется в процессе петрогенезиса. В этом случае петрохимические и геофизические индикаторы аномальных масс должны быть связаны отрицательной корреляцией.

4. Комбинируются соотношения, указанные в пунктах 2 и 3, т. е. петрогенетические процессы прямо или косвенно участвуют и в нарушении равновесия и в его восстановлении. В этом случае связь между петрохимическими и геофизическими характеристиками может быть недостаточно четкой.

5. Комбинируются соотношения пунктов 2, 3 и частично 1, т. е. петрохимия реагирует как на совокупность глубинных (подкорковых) процессов, так и на ситуацию в зоне вулкана. Корреляционные связи между петрохимическими и геофизическими характеристиками масс в этом случае отличаются особо сложной структурой.

Перечисленные дедуктивные схемы изображены на рис. 7.8, для их эмпирической проверки требуется изучить сопряженные вариации разнообразных индикаторов аномальных масс, вовлеченных в конвекцию, и pT -условия на глубинах магмообразования. К числу индикаторов, как известно, относятся содержание железа и железистость пород, относительная распространенность вулканитов с разным содержанием кремнезема, гравитационные аномалии в разных редукциях, некоторые сейсмологические данные и т. д. Приходится учитывать и другие характеристики среды, которые создают помехи и искажают полезные сигналы. Кроме того, следует считаться с разной степенью надежности, точности и доступности данных. Все это вместе взятое определяет набор параметров, пригодных для выявления и трассирования конвективного перемещения мантийных масс (табл. 7.1). В этот набор входят следующие параметры.

1. Изостатическая аномалия Δg , вычисленная по схеме Эйри ($H = 30$ км).

2. Среднее содержание кремнезема в породах вулканического ареала.

3. Среднее содержание железа (в пересчете на FeO) в базальтах, андезитах и дацитах каждого вулканического ареала.

4. Средняя железистость этих же типов пород.

Для контроля оказалось полезным учесть также гравитационные аномалии в редукциях Буге и Фая, параметры упругих напряжений в сейсмофокальных зонах, тепловой поток и результаты повторных прецизионных геодезических измерений (нивелировки и триангуляции). Исходные данные относятся к сегментам Тихоокеанского кольца (Тонга — Кермадек — Марианы, Япония, Новая Зеландия и Каскадные горы на западе Северной

ТАБЛИЦА 7.1

Индикаторы мантийных масс

Регистрируемые эффекты и роль индикаторов	Петрохимиче- ские			Геофизические								
	Fe	$\frac{Fe}{Fe+Mg}$	SiO ₂	Гравитаци- онные аномалии			Сейсмологи- ческие данные			Электромагнитные данные	Тепловой поток	Геоэлектрические
				Буле	Фая	Изостатиче- ские	Скорость волн	Поглощение волн	Параметры напряжения			
Объем и глубина расположения масс	+	+	+	+	+	+	++	-	-	+	-	-
pT-условия	+	+++	+	+-	+-	+	+	++	+	+	++	-
Другие геологи- ческие эффекты (в том числе движение масс)	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Выбраны для анализа	×	×	×			×				×		
Оставлены для контроля выводов				×	×						×	×

Примечание. Указана эффективность индикаторов: высокая (++), хорошая (+), ограниченная (+-), недостаточная (-).

ТАБЛИЦА 7.2

Результаты факторного анализа

Фактор	Вес фактора, %	Нагрузки на переменные							Интерпретация	
		Δg	SiO ₂	Fe			Fe/(Fe+Mg)			
				Базальты	Андезиты	Дацинты	Базальты	Андезиты		Дацинты
I	45	+		+	+	+	+	+	+	Погружение океанической плиты и мобилизация глу- бинного материала
II	19				+	+		-	-	Базифицированность земной коры
III	14	+	+							Стадия субдукции (положе- ние геозотерм)
IV	9	+		-						Компенсационные перемеще- ния подкорковых масс

Примечание. Указаны нагрузки, превышающие по модулю 0,3.

Америки) и к Зондской дуге. Эти регионы хорошо изучены в гравиметрическом и петрохимическом отношении. Всего было учтено 1098 химических анализов, заимствованных из литературных источников. Петрохимические данные систематизировались в зависимости от содержания кремнезема и усреднялись в пределах каждого вулканического ареала. Для изучения структуры и иерархии корреляционных связей применен факторный анализ (метод главных компонент, *R*-модификация), результаты анализа представлены в табл. 7.2.

Для решения стоящей перед нами задачи можно ограничиться рассмотрением первых четырех главных компонент, которые в совокупности определяют около 87% суммарной изменчивости системы. Фактор I отражает главную тенденцию системы (~45% изменчивости). Изостатическая аномалия положительно коррелируется с содержанием железа и железистостью во всех типах пород. Это может свидетельствовать о накоплении избыточных масс в результате поглощения океанической плиты, выдавливания в зону магмообразования слабо дифференцированного мантийного материала, что приводит к выплавлению обогащенных железом «примитивных» базальтоидов. Увеличение давления в зоне генерации магмы способствует относительному обогащению ее легкоплавкой железистой компонентой.

Дополнительным обоснованием подобной интерпретации фактора I может служить распределение его значений по регионам. Положительные значения фактора преобладают среди вулканических ареалов дуг Тонга — Кермадек — Марианы и отчасти Индонезии и Японии, отрицательные — Новой Зеландии и Каскадных гор. Известно [49, 65—67], что эти группы регионов различаются также в сейсмологическом отношении. Для первой группы характерна значительная сейсмичность с выделением существенной части энергии на глубинах 400—500 км. Вторая группа отличается сравнительно слабой сейсмичностью и преимущественным развитием мелкофокусных очагов землетрясений. Кроме того, Тонга — Кермадек — Марианы, Япония и Индонезия, с одной стороны, Новая Зеландия и Каскадные горы — с другой, различаются по распределению и ориентировке упругих напряжений в сейсмофокальных зонах. Для первой группы типичны значительные напряжения сжатия на больших глубинах [49 и др.], для второй — сравнительно слабые напряжения, чаще связанные с тенденцией к растяжению. Не исключено, что при таком распределении напряжений в пределах Индонезии и Японии на глубине 300—600 км может происходить некоторое уплотнение вещества мантии, что в свою очередь также способствует возрастанию гравитационной неуравновешенности литосферы. В хорошем согласии с такой интерпретацией находится распределение значений фактора I в пределах Японских островов (рис. 7.9). Высокие значения фактора тяготеют к наиболее активным вулcano-тектоническим структурам.

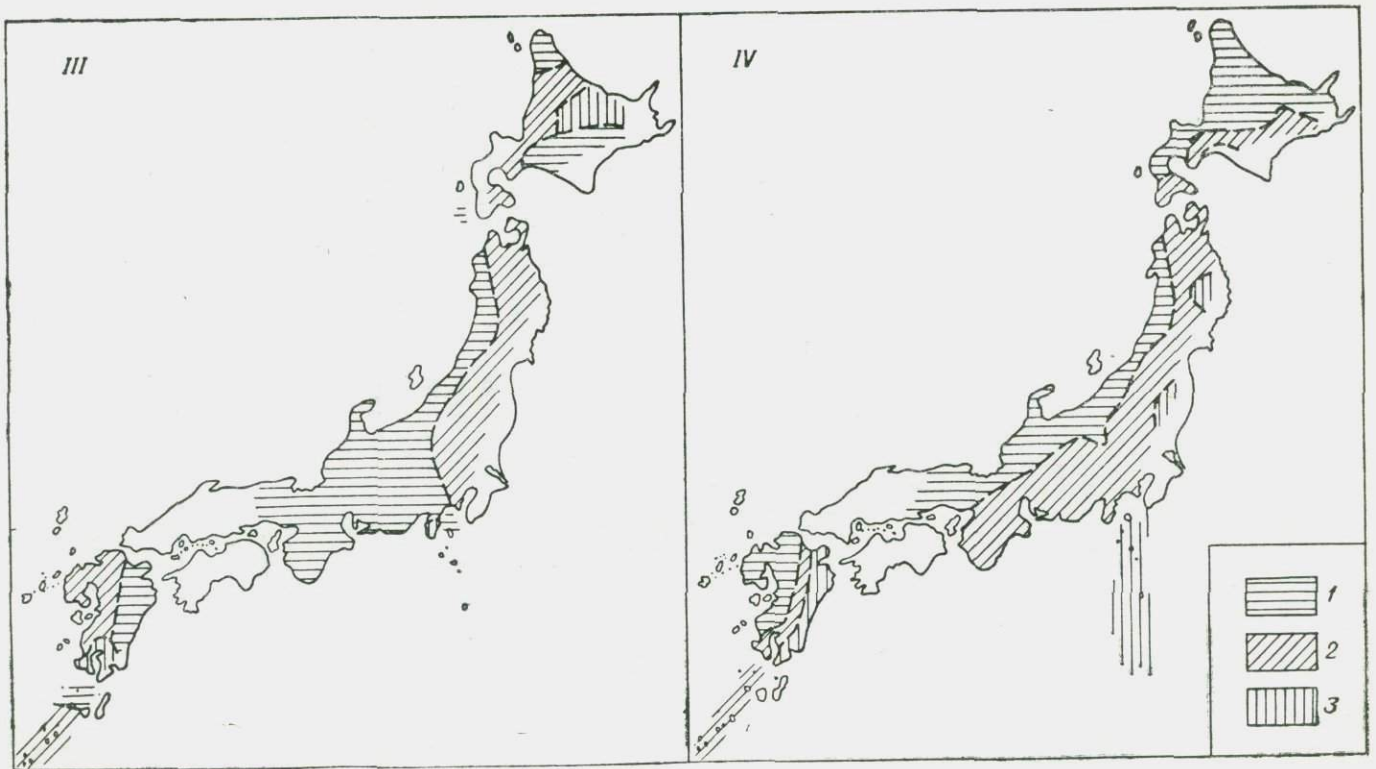
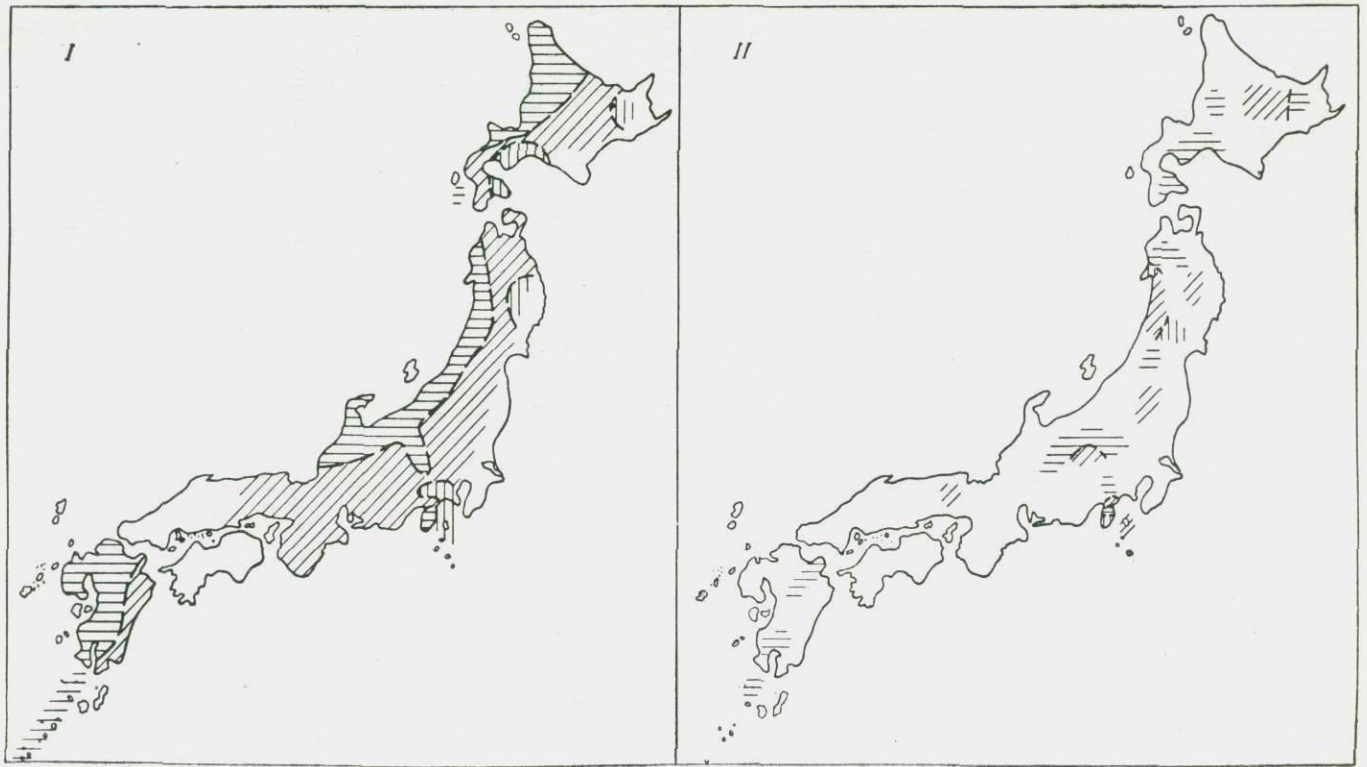


Рис. 7.9. Распределение значений факторов I—IV в пределах Японских островов.

1 — отрицательные; 2 — умеренные положительные (от 0 до 1); 3 — высокие положительные (> 1).

Фактор II, не связанный с изостатическими явлениями, включает со значительными нагрузками только петрохимические параметры: содержание железа и железистость в андезитах и дацитах. Существенно, что эти параметры входят в фактор с противоположными знаками. Фактор отражает типичные петрохимические вариации, обусловленные явлениями гибридизма, что в свою очередь можно связывать с влиянием базифицированности земной коры, степени ее контаминированности продуктами базальтоидного вулканизма и (или) с мощностью гранито-метаморфического слоя. Возрастание относительной роли базальтоидов приводит к тому, что более кислые разновидности вулканитов обогащаются фемическими компонентами — железом и магнием. Заметим, что подобные соотношения составов сосуществующих кислых и основных пород характерны и для многих других магматических ассоциаций. В частности, они наблюдались нами при анализе габбро-гранитовых серий [1], в которых распространность габброидов и гранитоидов менялась в широких пределах.

Влияние контаминации и гибридизма особенно ощутимо сказывается на составе более кислых пород, в которых нормальный фон фемических компонентов самый низкий. Это и приводит к тому, что значимая факторная нагрузка установлена только для содержания железа в андезитах и дацитах. Понятно, что добавка к кислой магме железа и магния в пропорции, типичной для магмы основного состава, снижает железистость дацитов, чем и объясняется несколько страшное, на первый взгляд, вхождение в фактор II таких параметров, как содержание железа и железистость, с противоположными знаками.

В пользу такой интерпретации свидетельствует также распределение значений фактора II в пределах опробованной территории, где проявляется его отчетливая связь с зональностью вулканических структур. В частности, вулканическим ареалам, образующим главную дугу Каскадных гор (Маунт-Худ, Крейтер Лейк, Лассен-Шик и др.), отвечают умеренные отрицательные значения фактора, в то время как вулканические центры, смещенные на запад (Стэйтон и др.), выделяются большими положительными значениями, а центры тыловых зон (Ньюберри и др.) — значительными отрицательными. Аналогичная зональность фиксируется также в пределах Японских островов.

Существенно, что отмеченные вариации химизма вулканитов связаны преимущественно с составом коры, а не с ее мощностью. Об этом свидетельствует отсутствие корреляционной связи между значениями фактора II и оценками глубины поверхности Мохо в пределах учитываемых ареалов и наличие явной связи с аномалиями Буге. С такой интерпретацией фактора II хорошо согласуются сопряженные вариации некоторых других характеристик химизма базальтов. Коэффициенты общей парной корреляции содержания в базальтах окислов натрия, калия, магния и каль-

ция со значениями фактора составляют соответственно $-0,37$; $-0,29$; $+0,41$ и $+0,45$.

Фактор III в отличие от двух предыдущих включает характеристики и глубинных и локальных процессов; его можно охарактеризовать как влияние стадии субдукции океанической плиты и связанного с этим процессом положения геоизотерм [62]. Раннему этапу погружения масс сопутствуют глубоководные землетрясения, умеренное нарушение изостатического равновесия, низкое положение геоизотерм и преобладание вулканических излияний базальт-андезитового состава. Этой стадии отвечают дуги Тонга — Кермадек — Марианы и отчасти вулканическая система Индонезии. Значения фактора III на соответствующих ареалах вулканизма преимущественно отрицательные.

Последующее погружение океанической плиты сопровождается столь же интенсивным выделением сейсмической энергии на больших глубинах, резким нарушением изостатического равновесия, максимальным подъемом геоизотерм и связанной с ним интенсивной вспышкой кислого вулканизма. В этой стадии зрелого орогена, вероятно, пребывают Японские острова и Северный остров Новой Зеландии. В пределах этих регионов преобладают положительные значения фактора III.

Наконец, позднеорогенной стадии отвечает постепенное восстановление изостатического равновесия, затухание сейсмичности со смещением центров землетрясений на малые глубины, опускание геоизотерм при сокращении масштабов излияния кислой магмы. На этой стадии, по-видимому, находится в настоящее время вулканическая система Каскадных гор. Значения фактора III на соответствующих ареалах преимущественно отрицательные.

Общее высокое положение геоизотерм способствует усилению процессов контаминации и гибридизма. По петрохимическому эффекту эти явления аналогичны вариациям соотношения масс (фактор II). Понятно, что распределение температур и соответственно значений фактора III вблизи центров вулканических излияний может быть достаточно сложным.

Фактор IV по соотношению знаков нагрузок противоположен фактору I. Его можно рассматривать как проявление компенсационных тенденций, которые реализуются исключительно благодаря глубинным подкорovým перемещениям масс. Чем сильнее нарушено изостатическое равновесие, тем интенсивнее конвективное перемешивание мантийного субстрата. Этот процесс складывается из растекания в пределах астеносферного слоя того глубинного вещества, которое выдавливает погружающаяся плита, и мобилизации из смежных зон более легкого материала с меньшей концентрацией железа.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в химизме вулканических излияний находят отражение как явления, связанные с нарушением изостатического равновесия и его компенсацией, так и особенности состава коры, зависящие в свою

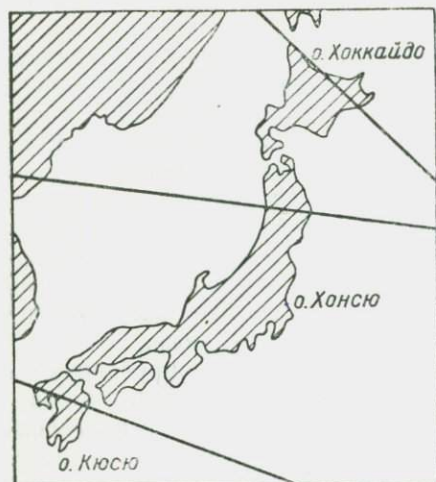


Рис. 7.10. Схема интерпретационных профилей в пределах Японских островов.

очередь от совокупного влияния предшествующих тектоно-магматических актов.

Выясним теперь, в каком соотношении с другими эмпирическими данными находится проанализированная выше схема; ограничимся при этом территорией Японских островов, уникальной по полноте геолого-геофизической изученности. Чтобы получить представление о развитии изучаемых процессов в пространстве и времени, рассмотрим несколько сечений конвективных ячеек в соответствии с профилями систематизированных эмпирических данных (рис. 7.10).

В районе о. Хоккайдо (рис. 7.11) движение Тихоокеанской

плиты приводит к формированию отчетливо выраженной зоны Беньофа. Интенсивное погружение холодного материала океанической коры снижает тепловой поток в районе глубоководного желоба, вызывает сжимающие напряжения в сейсмофокальной плоскости, ориентированные в соответствии с направлением перемещения материала, и приводит к интенсивному локальному разогреву пространства под вулканической дугой. При этом происходит уплотнение материала океанической плиты (эклогитизация базальта) и частичное выдавливание материала мантии в зону магмообразования. Процесс, близкий к всплыванию астенолита (по В. В. Белоусову), фиксируется и изменением теплового потока, и гравитационными аномалиями во всех редукциях. Разогрев вещества мантии приводит к магмообразованию, причем в составе изливающихся лав возрастает доля фемических компонентов. Восстановление гравитационного равновесия достигается частичным растеканием избыточных масс в астеносфере, а также мобилизацией менее плотного вещества верхних частей мантии и низов коры. Эти компенсационные конвективные перемещения также фиксируются в составе вулканических излияний.

В районе о. Хонсю (рис. 7.12) наблюдается примерно такая же картина, как и на о. Хоккайдо. В пределах же о. Кюсю (рис. 7.13) мы застаем более позднюю стадию процесса: зона Беньофа здесь практически исчезла; вулканы Ундзен, Асо и другие уже выбросили несколько кубических километров кислой пирокластике; движения коры минимальны; гравитационное равновесие восстановлено; петрохимия не регистрирует сколько-нибудь заметных

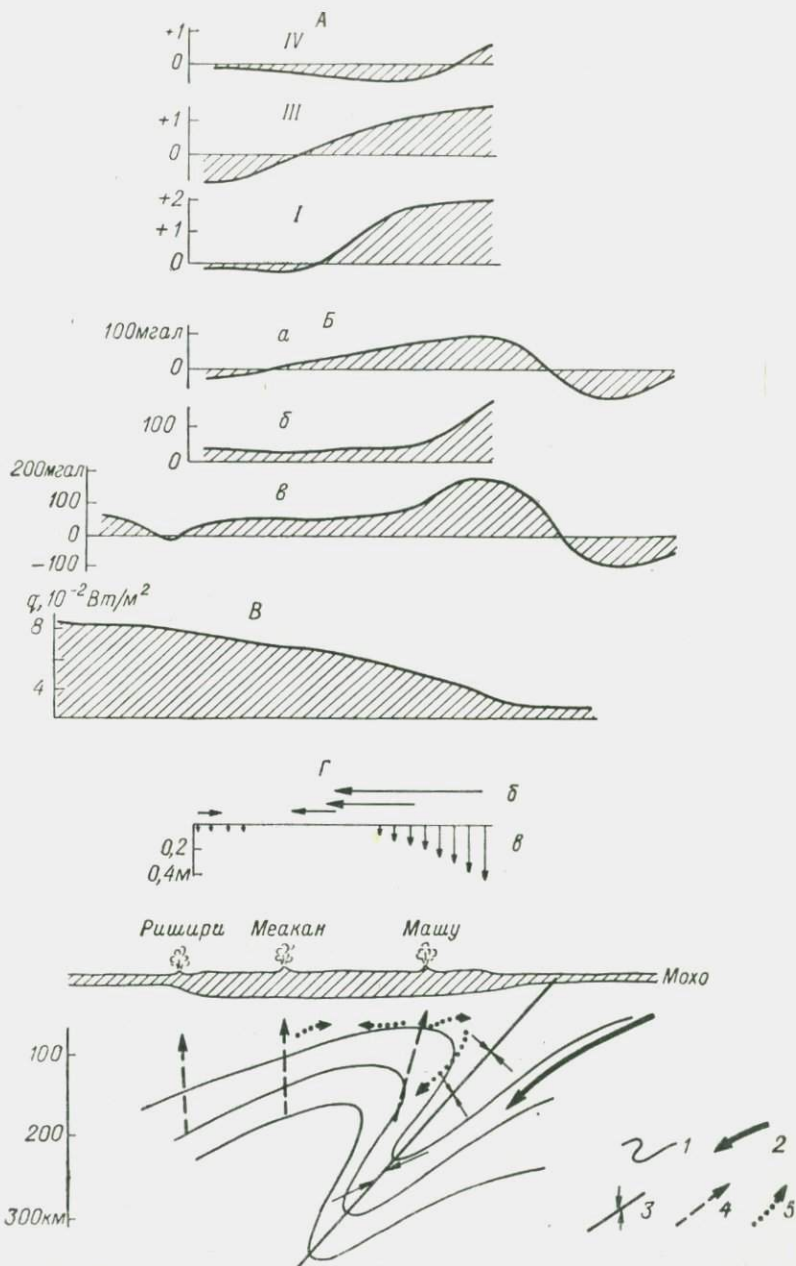


Рис. 7.11. Профиль через о. Хоккайдо.

A — факторы; **B** — гравитационные аномалии (*a* — изостатические, *б* — Буге, *в* — Фая); **B** — тепловой поток; **Г** — перемещения (*б* — горизонтальные за 50 лет, *в* — вертикальные с 1900 по 1955 г.).

1 — геозотермы; **2** — направление погружения океанической плиты; **3** — сейсмофокальная плоскость и направление напряжений сжатия и растяжения; перемещения мантийных масс: **4** — нарушающие гравитационное равновесие, **5** — компенсационные.

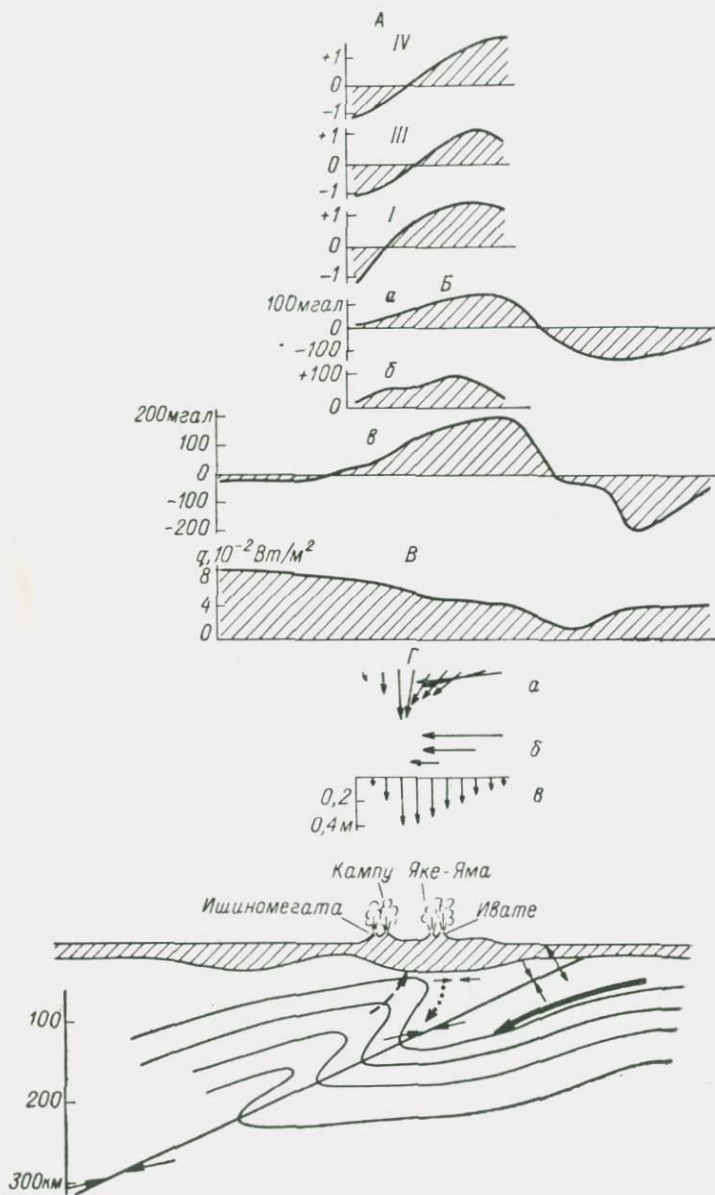


Рис. 7.12. Профиль через о. Хонсю.

Γ, α — результирующий вектор перемещений.
Усл. обозначения см. на рис. 7.11.

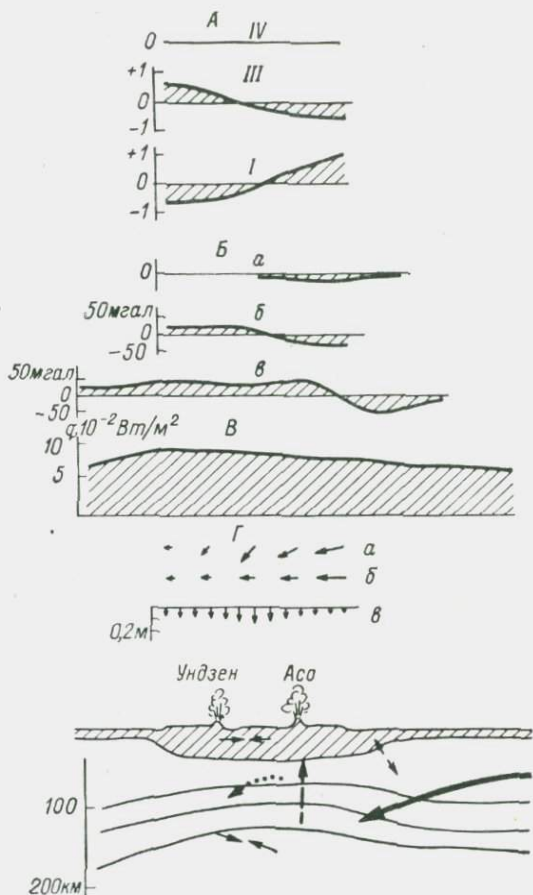


Рис. 7.13. Профиль через о. Кюсю.

Γ , α — результирующий вектор перемещений.
Усл. обозначения см. на рис. 7.11.

перемещений мантийного вещества. Все активные процессы сместились на восток, поскольку очередная гирлянда вулканических островов (Идзу-Бонинская дуга), находящаяся в начальной стадии развития, заэкранировала и о. Кюсю и авулканический о. Сикоку.

Такова в первом приближении схема нарушения и восстановления гравитационного равновесия в процессе конвекции на региональном уровне, что находит отчетливое выражение и в геофизических полях, и в составе вулканических излияний.

ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ РАЗЛИЧИЙ В ИНТЕНСИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Обратимся к некоторым хорошо известным эмпирическим закономерностям, относящимся к строению и составу вулканотектонических структур. Покажем, что они естественным образом вытекают из основной схемы процесса субдукции, если учесть возможные комбинации параметров динамического режима взаимодействующих плит. Есть основание предполагать, что полный учет этих комбинаций даст намного больше знаний, чем имеет сейчас феноменологическая составляющая учения о геосинклиналях и орогенных вулканоплутонических поясах. По разным причинам обоснование дедуктивно выводимых следствий дано с неодинаковой подробностью. Более детально рассмотрены петрологические эффекты, ранее не привлекавшие внимания геологов.

Важнейший параметр, определяющий интенсивность взаимодействия плит, — это их относительная скорость. Чем выше скорость, тем интенсивнее при прочих равных условиях выделение энергии в форме тепла и упругих колебаний, тем выше давление в зоне магмообразования. Таким образом, скорость взаимодействия плит должна оказывать стимулирующее воздействие на вулканическую активность. Это воздействие может быть весьма опосредованным и сочетаться с влиянием других факторов. В частности, сжимающие напряжения при больших скоростях плит могут приводить к снижению проницаемости земной коры.

Представляется небезынтересным получить прямое доказательство существования зависимости между интенсивностью вулканизма и скоростью субдуцируемых плит. Эта задача заслуживает внимания еще и потому, что вопрос о природе вулканической активности в целом на сегодня может считаться решенным лишь в самом первом приближении. Для тектонистов, геофизиков и петрологов очевидно, что вулканизм следует рассматривать как проявление процесса дифференциации вещества Земли или дегазации мантии [22]. На таком самом общем уровне мнения специалистов (если не всех, то явно преобладающего большинства) совпадают. Когда же дело доходит до конкретизации этого тезиса и начинается обсуждение таких «деталей», как, например, сил, вызывающих подъем магмы на дневную поверхность, или факторов, контролирующих вулканическую активность в регионах, единодушие геологов приходит конец.

Парадоксально, но факт, что, несмотря на многовековую историю наблюдения и изучения вулканов, специалисты не в состоянии объяснить различий в средней плотности расположения вулканических аппаратов на островных дугах, различий в интервалах между эруптивными циклами и т. д. Ответов на эти и многие другие вопросы, касающиеся закономерностей распределения вулканических явлений в пространственно-временных координатах, мы не найдем даже в обобщающих работах А. Ритмана,

Дж. А. Макдональда, И. В. Лучицкого и других видных вулканологов нашего времени. Все это означает, что в арсенале исследователей нет конструктивной модели вулканического процесса *. Иллюстрацией может служить также и обстоятельная работа В. И. Влодавца [7], где в глобальном масштабе систематизированы сведения об интенсивности и экстенсивности вулканической деятельности. Отражая существующий уровень знания, В. И. Влодавец вновь констатировал, что средняя плотность расположения вулканических аппаратов (обозначим ее n_v) и средний интервал времени между эруптивными циклами (τ , или с учетом резко асимметричного распределения этой величины $\lg \tau$) не зависят от типа тектонических структур.

В соответствии с общей схемой процесса субдукции можно было ожидать, что скорость v_n взаимодействующих литосферных плит должна обнаруживать положительную корреляционную связь с величиной n_v и отрицательную с $\lg \tau$. Предпринятое нами обобщение соответствующих данных в пределах вулcano-тектонических структур Тихоокеанского кольца с использованием сводки В. И. Влодавца показало, что предполагаемая связь действительно фиксируется, но сила ее невелика — общие парные коэффициенты корреляции не превосходят по модулю 0,15, при граничном значении $\sim 0,1$ с 90%-ной доверительной вероятностью. Этот результат может свидетельствовать, что повышенная скорость литосферных плит является необходимым, но не достаточным условием для индуцирования вулканической деятельности.

Рассмотрим несколько усложненный вариант механической модели процесса субдукции. Очевидно, что для создания повышенного давления в зоне генерации (концентрации) магмы существенно только нормальная компонента скорости сходящихся плит $v_n \cos \gamma$, где γ — угол между направлением вектора скорости океанической плиты и нормалью к фронту субдукции. Учет также возможные вариации вязкости в вертикальном разрезе верхней мантии; заметим, что принципиальное значение при этом имеет состояние подастеносферного вещества мантии, степень его пластичности, определяемые интенсивностью глубинного разогрева. Индикатором такого разогрева может служить недипольная и недрейфующая компонента Z_{st} вертикальной составляющей электромагнитного поля Земли. При повышенной температуре увеличивается электрическая проводимость мантии, что фиксируется соответствующими значениями Z_{st} . Чем горячее и пластичнее подастеносферный субстрат, тем при прочих равных условиях более круто погружается литосферная плита. Мерой проницаемости подастеносферного слоя мантии, таким образом, может служить значение вертикальной составляющей нормальной

* Это обстоятельство в свою очередь определяет, полуэмпирический уровень исследований, направленных на предсказание катастрофических явлений, связанных с вулканизмом.

компоненты скорости субдуцируемой плиты $v_n \cos \gamma \sin \alpha$, где α — угол наклона сейсмофокальной плоскости в ее нижней части. Чем больше эта величина, тем при прочих равных условиях меньше давление в прилегающей части астеносферы.

Подчеркнем еще раз необходимость учитывать именно глубинный подастеносферный разогрев мантий, а не тепловой поток q , регистрируемый при традиционных тектонических построениях. По нашим данным, между величинами q , с одной стороны, и n_b и $\lg \tau$ — с другой, сколько-нибудь ощутимой связи не наблюдается. Вместе с тем устанавливается отчетливая зависимость характеристик n_b и $\lg \tau$ от отношения тепловых потоков q_d/q_j , измеренных в пределах вулканической дуги и в прилегающей части глубоководного желоба. Это отношение, как показали наши исследования, может рассматриваться в качестве индикатора интенсивности процесса субдукции, ибо, чем с большей скоростью погружается холодная океаническая плита, тем выше тепловой поток в зоне вулканов и тем ниже он в желобе.

Таким образом, вулканическая активность в островных дугах в первом приближении зависит от сочетания двух факторов: скорости сходящихся литосферных плит, определяющей интенсивность субдукции, и реологического разреза мантий. Именно эти два фактора играют главную роль в формировании баланса перераспределения мантийных масс, поскольку прямо или опосредованно они контролируют соотношение потока материала, уходящего в подастеносферные глубины, перемещающегося в пределах астеносферы и выдавливаемого наверх в виде вулканических излияний.

Статистическая обработка материала по вулканизму Тихоокеанского кольца хорошо согласуется с этой схемой. В качестве примера типичных соотношений между рассматриваемыми характеристиками приведем результаты их канонической корреляции.

n_b	$\lg \tau$	Канонический корень r_k^2	$v_n \cos \gamma$	$v_n \cos \gamma \sin \alpha$	Z_{st}	q_d/q_j	q
+0,98	-0,21	0,72	+0,45	-0,47	-0,52	+0,45	-0,29

Как видим, согласие с предложенной моделью вполне удовлетворительное. Обратим внимание на одну деталь канонического решения. Коэффициент при n_b по абсолютному значению намного выше, чем при $\lg \tau$. Это связано с тем, что в правой части канонического соотношения находятся в достаточной мере инерционные характеристики термического и динамического режима в зонах субдукции. Они, естественно, теснее коррелированы со значительно более консервативной характеристикой вулканической деятельности — плотностью расположения вулканов n_b , чем с индикатором краткосрочных вариаций динамического режима глубин, каким является параметр $\lg \tau$.

Скорость литосферных плит оказывает влияние не только на интенсивность формирования магматического расплава и его

перераспределение в пространстве, но и на химический состав этого расплава. Иначе говоря, интенсивностью взаимодействия плит определяется ведущий тип вулканических излияний. При особо высоких скоростях движения плит в островных дугах вылавливаются преимущественно толеиты, при умеренных — известково-щелочные магмы, а при низких — щелочные [88]. Высокая скорость Тихоокеанской плиты относительно Евразийской предопределяет, в частности, щелочно-известковый профиль вулканизма Курильской, Японской и других островных дуг этого сочленения. Напротив, крайне низкая скорость субдукции в Эгейской дуге объясняет исключительно высокую щелочность вулканических пород региона.

В отношении причин, вызывающих разную щелочность пород, единодушия нет даже среди убежденных сторонников мобилизма, что видно хотя бы из обзора [90] посвященных этому вопросу работ. С нашей точки зрения, главенствующая роль в формировании того или иного уровня щелочности пород принадлежит давлению в зонах субдукции. При больших скоростях плит и соответственно значительном давлении щелочи и летучие мигрируют в пределах астеносферного слоя далеко в тыловые зоны островных дуг, о чем можно судить по экзотическим высокощелочным вулканам на востоке Азии (Мерген, Анюй, Балаган-Тас). При малых скоростях плит резкого перепада давления нет, поэтому щелочи и летучие в основном остаются в зоне магнообразования, питающей вулканы на фронте дуги.

Более тонкие различия в химизме пород можно прогнозировать, сопоставляя островные дуги, сходные по многим другим параметрам. Повышенное давление в зоне магнообразования приводит к преимущественному вылавливанию более легкоплавкой составляющей мантийного субстрата. Поэтому при больших относительных скоростях плит среди вулканических продуктов доминируют высокожелезистые разновидности. Именно такие соотношения в составе базальтов наблюдаются при сравнении дуги Тонга с дугой, образованной Южно-Сандвичевыми и Южно-Шетландскими островами. Обе дуги находятся на стыке океанических плит и относятся к классу простых (одиночных), различаются они лишь скоростью взаимодействующих плит. Из-за большой скорости субдукции в дуге Тонга вылавливаются базальты с содержанием железа (в пересчете на FeO) около 11,5%, в то время как в аналогичных породах Южно-Сандвичевых островов содержание железа не превышает 10%.

Скоростью взаимодействующих плит определяется не только состав вулканических продуктов, но и характер их последующего метаморфизма. Интенсивное одностороннее сжатие при больших скоростях субдукции приводит к характерному метаморфизму глаукофан-сланцевого типа [87 и др.].

Стабильность динамических параметров плит, вообще говоря, еще не означает стационарности петрологических эффектов, что

связано с грубой авторегулировкой, сопровождающей взаимодействие плит в зонах субдукции. По мере поглощения океанической плиты в результате трения выделяется и накапливается тепло [62], что приводит к снижению жесткости мантийного субстрата. Этот процесс влечет за собой уменьшение трения, что фиксируется сейсмичностью, и интенсивности последующего выделения тепла.

Специфические петрологические эффекты генерируются «косыми» взаимодействиями плит. Относительно слабое, не по нормали ориентированное перемещение и поглощение материала не приводит к накоплению значительных избыточных масс; интенсивная сейсмичность при этом фиксируется только в верхних зонах вне зависимости от стадии развития дуги. Вследствие относительно высокого положения фронта магмообразования лавы обогащаются глиноземом и обедняются феррическими компонентами. Примером дуги, ориентированной к вектору скорости океанической плиты перпендикулярно, могут служить Алеутские острова, для которых типичны все отмеченные признаки.

Сходные эффекты могут наблюдаться и в пределах одной дуги, если разные ее части неодинаково ориентированы относительно направления движения плит. Так, северное окончание дуги Тонга развернуто почти параллельно направлению движения Тихоокеанской плиты. По этой причине железистость базальтоидов на расположенном здесь о. Ниуафооу, оказывается более низкой, чем на островах Тофуа, Лейт, Фонуалей, Эуа и других, составляющих центральную и южную части дуги.

Теоретически можно представить весь спектр соотношений нормальной и тангенциальной компонент скорости взаимодействующих плит, т. е. все постепенные переходы от зон субдукции к трансформным разломам и далее к зонам спрединга. Примером сочленения плит, в котором доминирует скользящая составляющая при подчиненной расширяющей, может служить, по мнению У. Р. Дикинсона [44], Калифорнийский залив.

Ротационная компонента в кинематике плиты может приводить к продольным сжатиям в дуге [72], а также к асинхронности вулканической и плутонической активности в пределах единого магматического пояса [44]. Так, в системе Тонга — Кермадек — Новая Зеландия с севера на юг сжатие постепенно ослабевает, переходя в растяжение; кроме того, вращение плиты фиксируется разворотом на северо-запад северного окончания дуги Тонга.

Колебательные движения плит могут вызывать периодическую миграцию вулканической и сейсмической активности вдоль края континентальной плиты. Такое явление недавно зарегистрировано в области взаимодействия плит Наска и Кокос [37]. Активизация вулканов распространялась вдоль Анд с севера на юг со скоростью 900 км/год и повторялась через каждые 34 года.

Скоростью литосферных плит определяется не только средний уровень термодинамических параметров в зоне субдукции, но и их градиент, который тем резче выражен, чем выше скорость

погружения океанической плиты. Этим градиентом объясняется хорошо известная поперечная зональность вулкано-тектонических структур, и в частности обогащение калием вулканических продуктов в тыловых зонах островных дуг. Прежние объяснения этого явления контаминацией базальтовой магмы сиалическим материалом [103] и различиями в глубине выплавления магмы [79 и др.] уступили место представлениям о ведущей роли давления. При этом обычно учитывается неодинаковая устойчивость разных минеральных фаз [70], а также варьирующая полнота плавления пород [71 и др.]. Кроме того, не следует, вероятно, исключать влияние и некоторых других факторов, непосредственно связанных с динамикой и кинематикой литосферных плит; среди них назовем следующие.

1. Погружающаяся с большой скоростью плита создает противоток вещества, препятствующий накоплению щелочей в верхней зоне.

2. Интенсивное поглощение океанической плиты, сопровождающееся высокими сжимающими напряжениями в сейсмофокальной плоскости, перекрывает пути перемещения щелочей из глубинных зон мантии.

3. Материал океанической плиты, в целом обедненный щелочами, разубоживает мантийный субстрат в зоне генерации магмы.

4. Миграция щелочей в тылы островных дуг происходит в соответствии с градиентом давления, максимального во фронтальной зоне. Этот механизм представляется наиболее вероятным. Таким образом удастся объяснить возрастание щелочности не только от океана в глубь континента для вулкано-плутонических поясов в целом, но и от периферии к центру в пределах единичных интрузивных тел. Такое распределение зафиксировано в гранитоидных плутонах на западе Северной Америки [64 и др.] и в пределах Охотско-Чукотского пояса (по устному сообщению М. В. Гельмана).

В этом свете может быть пересмотрена трактовка такого хорошо известного явления, как возрастание щелочности изверженных горных пород по мере приближения к краю платформы или срединного массива [68 и др.]. Обычно эту закономерность объясняют особыми условиями образования магматического расплава и его эволюции, якобы свойственными жестким структурам (большая глубина расколов, контролирующих магнообразование; длительная дифференциация расплава в промежуточных очагах и т. п.). Не исключено, однако, что специфику магматизма жестких блоков проще связывать с положением этих структур всегда в тыловых зонах островных дуг. Преимущества единой универсальной модели латеральной pT -зональности кажутся очевидными.

При анализе причинно-следственных отношений между движением плит и магматической активностью нельзя не отметить явного несоответствия между непрерывностью перемещения плит и эпизодичностью вулкано-плутонической деятельности. Однако при

детальном изучении кинематики плит удастся зафиксировать явную неравномерность их движения, что выражается в виде пауз и толчков [33]. Вместе с тем, как резонно отметил Дж. Гиллюли [54], есть основание говорить только о локальных несоответствиях такого рода. В частности, при анализе материала по всем североамериканским Кордильерам этот автор установил практически непрерывное проявление плутонизма. По его мнению, локальной эпизодичностью плутонизм обязан локальным вариациям свойств взаимодействующих плит. Эта эпизодичность может быть также следствием маятникового движения плит.

Несомненно, что иную природу имеет эпизодичность магматизма, проявляющаяся в виде орогенных фаз. Для ее объяснения К. Ле Пижон [80] допускал соответствующую эпизодичность спрединга. Можно показать, однако, что в природе может реализоваться механизм, трансформирующий непрерывное спрединговое движение плиты в прерывистую (скачкообразно мигрирующую) субдукцию. Пусть в движущейся океанической плите в результате спрединга через единичное сечение в единицу времени проходит масса материала $m_1(t)$, а в зоне субдукции $m_2(t)$. В прилегающей к зоне субдукции части астеносферы за время t аккумулируется масса

$$M_2(t) = \int_0^t m_2(s) ds.$$

Полагая, что поглощению материала океанической плиты в зоне субдукции оказывается тем большее сопротивление, чем больше аккумулированная масса, с учетом растекания части материала в астеносфере получаем

$$m_2(t) = m_1(t) - \gamma M_2(t),$$

где γ — коэффициент пропорциональности.

Это положение приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{dm_2(t)}{dt} + \gamma m_2(t) = \frac{dm_1(t)}{dt},$$

имеющему решение

$$m_2(t) = e^{-\gamma t} \left[m_1(0) + \int_0^t \frac{dm_1(s)}{ds} e^{\gamma s} ds \right].$$

Анализ решения показывает, что с течением времени происходит нарастание различий

$$\Delta_1 = m_1(t) - m_2(t) > 0 \text{ и } \Delta_2 = M_1(t) - M_2(t) > 0.$$

Величина $M_1(t)$ определяется аналогично $M_2(t)$:

$$M_1(t) = \int_0^t \dot{m}_1(s) ds.$$

По достижении величиной Δ_1 или Δ_2 некоторого критического значения процесс поглощения океанической пластины в рассматриваемой зоне субдукции прекращается, но одновременно возобновляется по прежней схеме в океане на подступах к данной зоне. Таким путем в конечном итоге возникают характерные узоры аккреции вокруг континентальных блоков, являющихся ядрами стабилизации.

Рассматриваемая последовательность событий осложняется скачкообразными изменениями объема аккумулятивной массы в результате фазовых переходов типа базальт — эглогит. Такие переходы неизбежны из-за ограниченной сжимаемости материала мантии [39]. Это обстоятельство приводит к спорадической смене режима сжатия относительным растяжением с увеличением проницаемости в вулканической зоне. Результатом такого процесса, в соответствии с построениями Ю. А. Кузнецова [13], оказывается хорошо известная многократная импульсная последовательность внедрения вулкано-плутонических тел. История западного сектора Тихого океана изобилует свидетельствами реальности рассмотренного механизма. В частности, Г. П. Авдейко [34] указывает, что на Камчатке за последние 125—150 млн. лет вулканический пояс трижды смещался в сторону океана, каждый раз приблизительно на 125 км.

Необходимым условием «работы» такого механизма является достаточно высокая скорость спрединга, при которой поглощаемый материал не успевал бы растекаться в астеносфере. В противном случае будет осуществляться более или менее монотонное распространение тепла (и фронта магмообразования) в сторону континента, что приведет к ретроградному смещению вулканической оси. У. Р. Дикинсон [45], систематизируя результаты палеовулканологических реконструкций, указывает на многочисленные примеры миграции вулканических поясов в сторону континента в позднемезозойское время на западе Северной Америки (Британская Колумбия, Сьерра-Невада, Францискан). Скорость миграции во всех случаях была близка к 1 км/млн. лет.

Теоретически можно допустить длительно сохраняющееся динамическое равновесие (малая скорость субдукции при ограниченной «пропускной способности» астеносферы). При этом можно ждать стабильного разрастания вулканического пояса без существенного смещения его оси. Согласно Г. Плафкеру [91], такая ситуация сохранялась в пределах южной Аляски на протяжении последних 100—125 млн. лет.

Предполагаемое в рассмотренной модели уплотнение мантийного вещества приводит к накоплению избыточных масс, что фиксируется положительными аномалиями геопотенциала, близость которых к зонам субдукции впервые отметил У. М. Каула [73]. Недавно А. Б. Уотс и М. Тальвани [100] поставили под сомнение это заключение У. М. Каула. Они обратили внимание на малую разницу в плотности холодной океанической коры и разо-

гретой верхней мантии, явно недостаточную для создания заметных гравитационных эффектов. Представляется, что заключение А. Б. Уотса и М. Тальвани справедливо лишь в случае малой скорости спрединга, когда субдуцируемый материал успевает достаточно быстро растечься в астеносфере. При этом никаких существенных гравитационных эффектов над зонами субдукции не наблюдается.

Заметим, что для моделирования всех рассмотренных выше петрологических эффектов было необходимо и достаточно учитывать относительные скорости плит. Попытка Дж. Т. Уилсона [102] поставить формирование островных дуг в зависимость только от «фиксированности» континентов представляется не вполне убедительной.

К изложенному остается добавить, что рассмотренный механизм, влияющий на положение нисходящей ветви конвекции, хорошо увязывается с представлениями о том, что движение спредингового конвейера регулируется процессами не только в срединно-океанических хребтах, но и в островных дугах [75]. Поэтому не исключена возможность иного рассогласования интенсивности сопряженных восходящего и нисходящего течений. При этом нисходящее течение благодаря локальному оттоку астеносферного субстрата создает дефицит массы и способствует возникновению новой зоны субдукции. Возможно, что именно такой процесс протекает в северо-восточной части Индийского океана (южнее о. Шри Ланка), где фиксируется крупнейшая отрицательная аномалия геопотенциала. По данным Л. Р. Сайкса [98], в этом районе регистрируется довольно интенсивная сейсмичность, типичная для зон субдукции, находящихся в стадии их зарождения.

До сих пор мы рассматривали петрологические эффекты, обусловленные взаимодействием двух плит. При увеличении числа взаимодействующих фрагментов литосферы разнообразие петрологических следствий резко возрастает. Их дедуктивное моделирование — дело будущего. Хорошей основой для этого может служить теоретический вывод всех возможных устойчивых и неустойчивых видов тройных сочленений [85]. Здесь мы ограничимся двумя характерными примерами.

В зоне тройного спрединга можно ждать появления вулканизов — производных слабо дифференцированного относительно легкого и весьма разогретого субстрата. Такими породами, по-видимому, являются лавы Галапагосских островов [81], в районе которых сочленяются три плиты: Наска, Кокос и Тихоокеанская. В областях столкновения нескольких плит, наоборот, эффекты каждой элементарной субдукции могут суммироваться. Это означает накопление экстремально высоких избыточных масс, фиксируемых аномалиями геопотенциала, а также суперпозицию тепловых потоков и формирование сложной, но отчетливо выраженной петрологической зональности. Одним из примеров такого рода

сочленения может служить район островов Новая Гвинея и Новая Британия. Здесь в результате разно ориентированного, в том числе встречного, движения нескольких плит в мантии аккумуляровались большие избыточные массы, что фиксируется самой интенсивной на Земле положительной аномалией геопотенциала.

Встречное движение материала, поступающего с разных сторон и уходящего на глубину, способно обеспечить своеобразное динамическое равновесие геоблока. При этом оказывается возможным сочетание континентальной коры мощностью 30—35 км со значительными глубинами моря [41]. Обычное (гидростатическое) равновесие исключает такую комбинацию как аномальную по дефициту масс в верхней части плотностного разреза, относящейся к гидро- и литосфере.

Траекторные спутниковые данные об аномальном геопотенциале показывают, что материал, поступающий в зоны субдукции, частично накапливается в глубинных тыловых областях. При этом предельная граница распространения аномальных масс нередко оказывается удаленной по горизонтали от активных краев континентов на 1500—2000 км. Со временем, вероятно, происходит перераспределение материала, направленное на выравнивание его концентрации. Однако при ограниченных размерах континентальных плит или их отдельных активных сегментов неоднократное воздействие с разных сторон океанических плит может привести к ситуации, когда зоны избыточных масс сомкнутся и полностью закроют на глубине соответствующий сегмент. В этом случае глубинное перераспределение масс и выравнивание концентраций не уменьшают общего избытка мантийного материала повышенной плотности, что не может не найти отражения в региональной специализации магматизма.

В качестве примера можно указать на Западную Европу, которая представляет собой сравнительно небольшой выступ Евразийской плиты, длительное время «подпитывавшийся» материалом океанических плит, двигавшихся то с севера, то с юга. Избыток мантийных масс здесь отчетливо фиксируется астрогеодезическими и траекторными спутниковыми измерениями. Повышенная фемичность глубин отражается на составе разновозрастных и разнотипных магматических комплексов. Отмечено [4], что в палеозойских габбро-гранитовых комплексах Западной Европы породы основного состава играют более заметную роль, чем в сопоставимых синхронных образованиях центральных районов Евразии. Не менее четкие различия обнаруживаются при сравнении вулканических толщ. Так, среди продуктов инициального вулканизма вариссийских складчатых областей Западной Европы существенным распространением пользуются меланократовые базальтоиды, почти неизвестные среди разновозрастных вулканитов Алтая, Казахстана и многих других районов Центральной Азии (рис. 7.14).

Встречное движение плит может иметь своим следствием не только избыток глубинных масс, но и аккумуляцию значительного

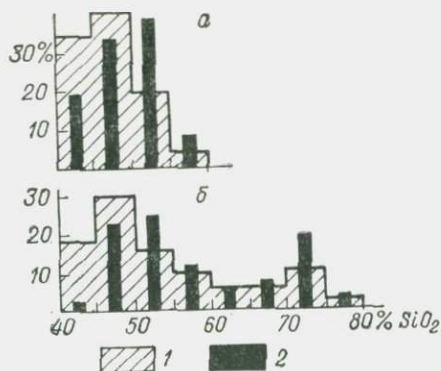


Рис. 7.14. Распространенность вулканических пород с разным содержанием кремнезема в вариссийских эвгеосинклинальных зонах Западной Европы (1) и Центральной Азии (2).

Вулканические ассоциации: а — спилит-диабазовые и другие существенно базальтоидные, б — спилит-кератофировые и им подобные «контрастные» и «полнодифференцированные».

	Западная Европа	Центральная Азия
Вулканические ареалы	8 (а); 8 (б)	18 (а); 28 (б)
Химические анализы	188 (а); 252 (б)	490 (а); 776 (б)

количества тепла. Примером региона с аномальным глубинным разогревом являются острова Фиджи, расположенные в тылу дуг Тонга и Новые Гебриды. Именно поэтому базальты этих островов (кальдера Тавуа и др.) отличаются экстремальным для Тихого океана содержанием калия (до 3,5%). Сейсмологическими наблюдениями здесь установлено аномальное поглощение волны, связанное с пониженной вязкостью материала мантии, т. е. с его разогревом.

Для областей сложных сочленений нескольких плит очень характерны также аномальные соотношения между физическими параметрами глубин, обусловленные частыми переориентировками зон субдукции. Так, в районе Соломоновых островов наблюдается аномально высокий тепловой поток со стороны современного глубоководного желоба, что объясняется существованием в недалеком прошлом другой противоположным образом направленной зоны субдукции, которая и породила этот тепловой поток. Кроме теплового потока, обладающего большой инерционностью, признаки исчезнувшей зоны усматриваются и в конфигурации вулканической дуги, и в особенностях рельефа морского дна [41].

Характер петрологических эффектов при прочих равных условиях зависит от экстенсивности процесса субдукции, т. е. от протяженности фронта взаимодействующих плит. При малой протяженности происходит рассеяние эффектов. Весьма вероятно, что обдукция океанической коры чаще завершает «нормальную» субдукцию при широком фронте взаимодействия плит. К такому выводу пришли, в частности, А. В. Пейве и др. [21], анализировавшие материал по палеозоидам Евразии.

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРЕДЫСТОРИИ НА ХАРАКТЕР ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛИТ

Тип магматизма и петрохимический облик пород существенным образом зависят не только от динамических параметров плит, но и от особенностей их состава и строения, т. е. от геологического прошлого взаимодействующих фрагментов литосферы. Раздельное рассмотрение названных факторов объясняется тем, что жесткая функциональная связь между ними отсутствует. Этот тезис, как известно, не принимается безоговорочно всеми петрографами. Явно или неявно его игнорируют и те, кто пытается все разнообразие магматических пород и их ассоциаций вывести опираясь главным образом на вариации pT -условий в зоне магмообразования, и те, кто надеется построить непротиворечивую классификацию магматических формаций на чисто тектонической основе.

В общем виде зависимость петрологических эффектов от типа литосферных плит учитывается во многих мобилистских построениях. Среди авторов этих построений, однако, нет единодушия в трактовке некоторых причинно-следственных связей, существенных при моделировании унаследованного и эволюционного развития тектоно-магматических структур. При моделировании указанных явлений приходится принимать во внимание, что магматическая история регионов не сводится к эволюции pT -условий в зоне магмообразования и что на эту историю влияют все предшествующие геологические события, интегральный итог которых запечатлен в активных окраинах контактирующих литосферных плит.

С учетом всего отмеченного, а также степени корреляции глубинной геодинамики с тектоникой можно выделить некоторую обобщенную последовательность тектоно-магматических структур. В первом приближении эту последовательность (допустимо называть ее стадиями развития [32]) иллюстрируют такие ряды регионов, как Тонга — Хонсю — Камчатка — Тайвань или Марианы — Курилы — Индонезия — Каскадные горы. Ряды подобного типа определяют главный эволюционный тренд и в связи с этим называются полезными при описании и предсказании некоторых петрологических особенностей регионов. Важно, однако, полностью отдавать себе отчет в принципиальной неполноте любых подобных последовательностей, что, как уже отмечалось, вытекает из относительной независимости между тектоникой, глубинными условиями и магматизмом. Поэтому нетрудно представить такие комбинации названных слагаемых, которые никак не могут быть «втиснуты» в прокрустово ложе одномерной эволюции.

Так, в рядах, подобных приведенным выше, не находят места Анды, которые по одним признакам близки к Каскадным горам,

а по другим напоминают молодые активные дуги типа Курил. Заметим попутно, что причины ревивации тектонического режима Анд не вполне ясны. Возможно, правы В. Д. Чехович и др. [28], связывая эти причины с резким изменением скорости спрединга в хребтах Тихого и Атлантического океанов, которое произошло приблизительно на границе мезозоя и кайнозоя. При этом в центральном секторе Анд (от выступа Консепсьон до «амазонской оси») часть континентальной коры была подвернута и затянута в глубь зоны субдукции. Скопление материала сопровождалось дополнительным выделением тепла и плавлением материала коры. В пользу этих построений свидетельствует аномальная мощность коры центрального сектора Анд (до 65—70 км), под которым в мантии располагается обширная зона интенсивного поглощения сейсмических волн. На это же указывает и смещение на восток соответствующего участка Перуанско-Чилийского глубоководного желоба.

Зависимость характера магматических явлений и их локализации от типа плит проявляется с самого первого момента взаимодействия плит, ибо при этом определяется ориентировка зоны субдукции и, следовательно, весь структурный план развития магматической провинции. При столкновении разнотипных плит океаническая обычно погружается под «непотопляемую» континентальную. В случае взаимодействия двух океанических плит решающее значение имеют различия в разогреве мантии: субдуцируется менее разогретая, т. е. более жесткая. Например, судя по палеотектоническим реконструкциям [46 и др.] в районе Южно-Шетландских и Южно-Сандвичевых островов начиная с мезозоя мантия разогревалась преимущественно с запада, что и определило погружение океанического края Американской плиты под океанический же край Антарктической плиты, а не наоборот.

Моделируя последствия столкновения континентальных плит, кроме всего прочего надо учитывать их размеры. Малые плиты, т. е. плиты, поперечные размеры которых составляют первые тысячи километров, при столкновениях обычно просто меняют направление своего движения и потому не создают устойчивых петрогенерирующих сочленений. Таково, в частности, поведение ряда малых плит Средиземноморья и Малой Азии [50]. В основном их перемещение диктуется взаимодействием плит-гигантов. Д. П. Маккензи [84], много сделавший для понимания сложных взаимодействий разномасштабных плит, установил, в частности, «стремительное» движение малой Турецкой плиты на запад вдоль трансформного Анатолийского разлома вследствие постепенного смыкания (с востока на запад) Евразийской и Аравийской плит.

Особый интерес представляет сочленение больших континентальных плит. Оно сопровождается интенсивным сжатием, резким снижением проницаемости коры при одновременном значительном разогреве верхней мантии. Избыточный с повышенной пластичностью материал, не находя выхода на поверхность, перераспре-

деляется в возбужденной астеносфере на больших расстояниях. В результате по обе стороны сочленения возникает достаточно широкая амагматичная зона, отличающаяся аномальным строением коры и верхней мантии. За пределами этой зоны, т. е. в условиях относительного растяжения, под воздействием распространяющегося вещества мантии проявляется магматизм, по многим параметрам отличающийся от типичного для зон нормальной субдукции. «Внутриконтинентальный» по своей позиции магматизм характеризуется повышенной калиевой щелочностью и другими признаками, указывающими на его происхождение из высоко дифференцированного исходного субстрата. Магматические комплексы этого типа обычно сокращены по объему и длительности формирования, что является прямым следствием нестабильности порождающей их обстановки.

Все эти процессы широко проявились в пределах Альпийско-Гималайского пояса, трассирующего зону сочленения Евразийской плиты с плитами Южного полушария: Африканской, Аравийской, Индийской. Аномальный разогрев и разуплотнение мантии в этом районе мира отчетливо фиксируются разнообразными геофизическими наблюдениями: сейсмологическими, электромагнитными и гравитационными. Исследование распространения поверхностных волн Лява и Релея приводит к выводу о весьма низких их скоростях в пределах Центральной и Южной Евразии. Экстремально низкая скорость установлена в высокогорных районах Гималаев и Тибета [59, 60, 99]. Кроме того, зона минимума распространяется далеко на север, охватывая не только Памир и Тянь-Шань, но и смежные равнинные районы Казахстана, т. е. территории с земной корой весьма разной по мощности и строению.

Особенно отчетливое уменьшение скорости отмечается у волн Лява. По данным Х. Гупта и Я. Сато [60], групповая скорость волн Лява (при периоде $T = 50$ с и эффективной мощности слоя 150—200 км) достигает в Тибете 3,0 км/с, Памире и Тянь-Шане — 3,4—3,6 км/с, тогда как на востоке, западе и севере Евразии соответствующая скорость равна 3,8—4,0 км/с. Известно, что скорость распространения поперечных колебаний весьма чувствительна к изменению вязкости среды, которая в свою очередь сильно зависит от температуры. Поэтому уменьшение скорости волн Лява резонно связывать прежде всего с глубинным разогревом коры и мантии. X

Минимум скорости сейсмических волн относится не только к самым верхам мантии; по-видимому, он распространяется до глубины 300—400 км. На это указывают данные о дисперсии скорости длиннопериодных поверхностных волн Релея. Значимые различия скорости волн, проходящих по большим круговым траекториям на поверхности Земли, сохраняются при периодах $T = 80 \div 100$ с и исчезают при $T = 200$ с (эффективная мощность слоя соответственно равна 300—380 и 700 км). Так, при $T = 100$ с на трассе, пересекающей Южный Сахалин, Байкал, Балхаш, X

южное побережье Каспия, Персидский залив, групповая скорость равна 3,76 км/с, а на трассе, пересекающей Хоккайдо, север Сибири, Полярный Урал, Ботнический залив, Пиренейский полуостров, скорость равна 3,83 км/с [61].

Наряду с аномальным уменьшением средних значений скорости сейсмических волн в мантии, характерным для всей зоны сочленения Евразийской и южных плит, на отдельных участках этого пояса отмечается специфический скоростной разрез, напоминающий переслаивание горизонтов коры и мантии. Слой с аномально высокой скоростью продольных волн ($\geq 8,0$ км/с), подстилаемый толщами с нормальным значением этого параметра, обнаружены в разрезах коры ряда районов на северо-западе Китая. Двойная граница Мохо предполагается на основании сейсмических данных в Гималаях. Специфический скоростной разрез Памира, Тянь-Шаня и других высокогорных областей является одной из причин неоднозначной оценки мощности земной коры [6, 47].

Повышенная электрическая проводимость мантии, также связываемая с глубинным разогревом, фиксируется высокими значениями недипольной и недрейфующей части напряженности геомагнитного поля (вертикальная компонента Z_{st} в редукции Т. Юкутаке и Х. Тачинака [104]), которая трассирует обширную термальную зону. Эта зона, охватывающая в той или иной мере альпийские и более древние складчатые сооружения Евразии, протягивается от Средиземного и Красного моря через Персидский залив и Балхаш в сторону Байкала.

Наиболее отчетливо результаты взаимодействия плит в зоне замыкания Тетиса фиксируются аномалиями геопотенциала, устанавливаемыми по результатам траекторных спутниковых измерений, а также по материалам комбинированных (спутниковых и наземных) гравиметрических данных. Особенно интересна в этом отношении карта Дж. Марша и С. Винченца [82], отличающаяся от карт Е. Гапошкина и К. Ламбека [53], В. Гюйе и Р. Ньютона [58] большей детальностью. Избыточные массы, связанные с движением южных плит, отмечаются в пределах Черного моря, Тавра, Малого Кавказа, Южного Каспия, Эльбурса, Куэнь-Луня, Южного Памира и т. д. Относительный максимум глубинных масс существует также в пределах Гималаев и Тибета. Значительно севернее протягивается зона дефицита масс, особенно сильно выраженная в пределах Казахстана примерно на широте оз. Балхаш.

С учетом отмеченных сейсмологических и электромагнитных данных отрицательную аномалию геопотенциала можно связывать с глубинным разуплотнением вещества вследствие разогрева мантии. Примечательно, что геофизическая характеристика глубинного разогрева на юге Казахстана выражена столь же сильно, как, например, в зоне Байкальского рифта, где разогретые массы находятся ближе к поверхности Земли и поэтому отчетливее проявляются в тепловом потоке, но занимают меньший объем.

В регионах, окруженных с нескольких сторон зонами субдукции, возникает своеобразный эффект «фокусировки» тепла, сопровождаемый соответствующими петрологическими эффектами. Эти эффекты сохраняются и при последовательном отступлении зон субдукции на значительное расстояние, так как, в соответствии с оценкой К. Хасебе, Н. Фудзи и С. Уеда [62], повышенный тепловой поток в тылу зоны субдукции за 50—100 млн. лет распространяется на расстояние до 1000 км. Весьма интересно в этом отношении Забайкалье. В мезозое этот регион был окружен дугообразным Монголо-Охотским поясом. Позднее Забайкалье оказалось в глубоком тылу зон сочленения и взаимодействия плит Евразии, Тихого океана и Тетиса. Примечательно, что и в современную эпоху расстояния от Забайкалья до зон субдукции, расположенных на юге и востоке, приблизительно одинаковы, так же как одинаковы и значения соответствующих функций $|\Delta \vec{v}|R^{-1}$, где $\Delta \vec{v}$ — разность векторов скоростей движения плит; R — расстояние от зоны взаимодействия плит. Для оценки функции $|\Delta \vec{v}|R^{-1}$ использованы кинематические параметры плит, полученные К. Соломоном и Н. Слипсом [97] применительно к наиболее общей модели движущих сил (модель D), хотя и другие, более специализированные, модели приводят к сходным результатам. Равенство указанных функций может быть истолковано как равенство физических эффектов взаимодействия, в свою очередь определяющих глубинные условия.

С этой точки зрения Забайкалье является регионом ослабленных и разно ориентированных давлений и суммированных тепловых эффектов. Такое сочетание особенно благоприятно для широкого проявления магматической активности, так как оно означает комбинацию повышенной проницаемости коры с избыточным глубинным разогревом. И действительно, Забайкалье в течение большей части мезозоя и кайнозоя было ареной интенсивной и разнообразной магматической деятельности. Наряду с образованиями мантийного происхождения (трахибазальтовая формация) здесь обильно представлены продукты коровых магм — разнообразные пестрые по составу гранитоиды нормальной и повышенной щелочности. Магматические комплексы, аналогичные забайкальским, распространены и во многих других частях Центральноазиатского пояса. В отечественной литературе они известны под названием внегеосинклинальных или активизационных. Таким образом, и загадочные из-за своей «автономности» зоны активизации находят естественное объяснение с позиций новой глобальной тектоники.

Геологическая предыстория литосферных плит, определяющая ведущий тип магматической деятельности и условия локализации ее продуктов, не может не оказывать заметного влияния на металлогеническую специализацию регионов. Покажем это на примере хорошо изученного Тихоокеанского металлогенического

пояса. Закономерности распределения медного, золотого, оловянно-вольфрамового, ртутного и другого оруденения в пределах этой планетарной структуры с давних пор привлекали внимание геологов. Важнейшее значение в свое время имело обобщение сведений о распределении рудных месторождений Тихоокеанского пояса, выполненное С. С. Смирновым [23]. Им было сформулировано представление о металлогенической зональности пояса, диссимметрии западного и восточного секторов, а также о локализации наиболее богатых оловоносных провинций мира в зоне интерференции Альпийско-Гималайского и Тихоокеанского подвижных поясов.

В дальнейшем закономерности размещения месторождений полезных ископаемых Тихоокеанского пояса неоднократно уточнялись. Были получены дополнительные сведения о неравномерном распределении оруденения. В обобщающих работах М. И. Ицксона, Л. И. Красного, Е. Т. Шаталова и других геологов особое внимание уделялось различиям в металлогенической специализации Австрало-Азиатского сектора, для которого кроме меди весьма характерны олово и вольфрам, и Американского сектора с его медью, серебром и полиметаллами. При этом делалась попытка увязать металлогеническую специализацию регионов с распространением главных типов земной коры или тектоносферы (т. е. земной коры и верхней мантии) [9, 16 и др.]. В основе этих построений лежала известная идея о влиянии состава среды (мелано- и лейкократовость) на вероятность обособления крупных концентратий соответственно фемафильных и фельсифильных элементов. С этих позиций убедительное объяснение получила зональность Тихоокеанского кольца, но оставалась непонятной причина тяготения оловянно-вольфрамовых месторождений к тем сегментам пояса, в которых широко развита кора промежуточного (переходного) типа.

Детальные данные о рельефе поверхности Мохо и о дополнительных сейсмических границах внутри коры послужили толчком к разработке локальных критериев размещения оруденения. Примером может служить установленная коллективом исследователей под руководством Е. А. Радкевич локализация оловорудных месторождений Сихотэ-Алиня вблизи валлообразных подъемов подошвы земной коры. Следует отметить, что локальные геофизические критерии обычно оказываются состоятельными лишь в пределах того региона, где они были установлены. Это объясняется тем, что общий диапазон условий локализации оруденения в пределах Тихоокеанского пояса необычайно широк, например, мощность земной коры в отдельных звеньях «Великого медного кольца» (Чилийские Анды, Бугенвиль и др.) меняется более чем в 2 раза. Поэтому остается актуальной задача выявления более общих устойчивых критериев рудоносности пояса [92].

Принципиально новый этап в изучении металлогении Тихоокеанского кольца начался со становлением идей новой глобаль-

ной тектоники. Иное объяснение получила зональность распределения оруденения. В частности, размещение месторождений меди, вольфрама и олова поставлено в соответствие с зональностью pT -условий, наблюдаемой при переходе от фронта взаимодействия литосферных плит в тыловые зоны [86 и др.]. Такое объяснение, как известно, хорошо согласуется с отчетливо выраженной поперечной зональностью распределения калия в магматических породах, концентрация которого увеличивается к тылу, где снижается давление и растет температура.

Из мобилистских построений логически следует необходимость изучения палеозон Беньофа. Однако схема рудной зональности, обоснованная в работе А. Митчела и М. Гарсона [86] (ее придерживаются многие специалисты на Западе), не дает ответа на вопрос о причине разной продуктивности ни современных зон, ни палеозон Беньофа, например Японских островов и Юго-Восточной Азии. Эти авторы не считают возможным распространить свои построения и на оловорудные месторождения Австралии, хотя последние, по мнению многих видных металлогенистов [9 и др.], следует рассматривать как крайнее звено единого пояса, протягивающегося от Тасмании до Чукотки.

Таким образом, известные эмпирические соотношения и построения, базирующиеся на реконструкции палеозон Беньофа, не объясняя различий в металлогенической специализации регионов, в главных своих чертах согласуются друг с другом. Тылы зон Беньофа обычно характеризуются более легкой и мощной корой. По мере разрастания континента, смещения зон Беньофа в сторону океана и одновременного уменьшения угла наклона сейсмофокальных плоскостей латеральная дифференциация тектоносферы усиливается. Поэтому зональность в строении коры и зональность pT -условий (на определенной стадии развития зоны Беньофа) в общем случае приблизительно повторяют друг друга.

Известно, однако, что рост мощной и легкой коры нередко сменяется противоположным процессом — океанизацией в связи с формированием вторичного спрединга в тылах островных дуг. Примером могут служить Охотское и другие внутренние моря на Востоке Евразийского континента, возникшие таким образом. По этой причине длительность и напряженность сепарирующей деятельности зон Беньофа, что определяет суммарный эффект миграции щелочей и летучих в тыловые зоны (равно как и миграции фторгидроксильного комплекса — вероятного переносчика олова), лишь косвенно отражаются в строении тектоносферы. Режим сейсмичности в современную эпоху не может служить надежным показателем сейсмической активности в прошлом. Все это вместе взятое заставляет искать связь между металлогенией и аккумулярованными эффектами взаимодействия плит.

Рассмотрим, есть ли возможность дедуктивно вывести интересные нас соотношения. Цепь рассуждений такова. Если ско-

рость движения океанической плиты существенно больше, чем скорость континентальной, то фронт их взаимодействия определяется в основном размерами океанической плиты. Общие следствия взаимодействия плит проявятся в вулcano-плутонических поясах на интервалах, близких к фронтальным размерам плит. Длительное движение океанической плиты в одном и том же направлении и ее погружение под континент имеет следствием нагнетание и аккумуляцию избыточных глубинных масс. Движение из-под континента аналогично создает недостаток глубинных масс, а чередование движений различного направления — любые промежуточные варианты.

Субдукция океанической плиты порождает градиент давления в мантии. Величина этого градиента и его стабильность зависят не только и не столько от динамики взаимодействия плит в каждый данный момент (индикаторы — сейсмичность и некоторые особенности состава вулканических пород), сколько от концентрации избыточных масс, накопившихся в предыдущий период взаимодействия плит (индикаторы — гравитация и петрохимия мантийных выплавов). Чем выше перепад давления, чем он устойчивее во времени, тем полнее проявляется эффект сепарации летучих и связанных с ними рудных элементов, тем отчетливее пространственная локализация зон равного давления, определяющая петрографическую и петрохимическую зональность магматических провинций.

Динамическим режимом в мантии индуцируется соответствующее распределение напряжений в низах земной коры, что в свою очередь сопровождается латеральным перераспределением вещества: щелочей, летучих и ассоциирующих с ними рудных компонентов. Этот процесс, теоретически и экспериментально изученный Г. В. Ицкисон, связан с изменениями параметров структурных решеток силикатов. В зонах сжатия при высвобождении калия (а также рубидия и цезия) из полевых шпатов и слюд происходит уплотнение структуры минералов, а в зонах относительного растяжения в результате привноса главным образом калия наблюдается «разрыхление» структуры. По данным Г. В. Ицкисон изменение параметров решетки калиевого полевого шпата в породах метаморфического фундамента складчатых областей может служить индикатором мобилизации и перераспределения рудного вещества, т. е. указателем природных рудопитающих систем.

Таким образом, и в астеносферном слое мантии, и в низах земной коры термо-барический градиент порождает однотипные по своим конечным результатам процессы перераспределения вещества. Очевидное существование наряду с горизонтальным и вертикальным перепадами давления и температуры может приводить и, вероятно, приводит к обогащению коры щелочами и летучими мантийного происхождения. Свидетельством этому служит корреляция щелочности разновозрастных и пространственно сопряженных пород мантийного и корового происхождения. Есть

все основания предполагать, что рудные компоненты в металлогенические провинции поставляет также смешанный источник. Это подтверждается, в частности, и результатами специальных изотопных исследований.

Учитывая все эти процессы, обратимся к тектонической истории Тихого океана в мезозое и кайнозое. На протяжении последних по меньшей мере 200—250 млн. лет в западной части океана сохранялось устойчивое субширотное с востока на запад движение гигантской Тихоокеанской плиты. Об этом свидетельствуют соответствующим образом ориентированные весьма протяженные трансформные разломы (Мендосино, Пионер и др.), распределение разновозрастных (от меловых до современных) донных осадков, конфигурация магнитных аномалий и, наконец, ориентировка вулcano-тектонических структур в западной части океана. В восточной части океана преобладало движение в противоположном направлении. В нем участвовало несколько сравнительно небольших плит: Кокос (в Центральной Америке), Наска (в Андах), а также (вероятно, до конца мезозоя) плита Кула (в Северной Америке). В кайнозое поступление океанического материала в направлении Северной Америки полностью прекратилось. Более того, в связи с формированием рифта (провинция Бассейнов и Хребтов) мантийный материал начал перемещаться в противоположном направлении.

Таким образом, на протяжении достаточно длительного времени характер взаимодействия литосферных плит в западном и восточном секторах Тихого океана оставался существенно разным. На западе шла монотонная аккумуляция мантийного материала, в то время как на востоке этот процесс протекал эпизодически и не отличался устойчивым трендом.

Интегральный эффект перераспределения мантийных масс нашел отражение на картах гравитационного потенциала, построенных по результатам траекторных спутниковых наблюдений. В западном секторе Тихоокеанского кольца от Тасмании до Чукотки непрерывно прослеживается сверхглубинная гравитационная ступень. Осевая зона полосы ступенчатости изоаномал, т. е. экстремального горизонтального градиента, фиксирует область спада давления, созданного нагнетаемыми массами. Эта полоса однозначно транслирует оловоносный металлогенический пояс (рис. 7.15).

Примечательно, что самые богатые рудные провинции (Юго-Восточная Азия) располагаются в той части гравитационной ступени, где перепад в концентрации глубинных масс и соответственно давлений особенно велик (приблизительно в 2 раза выше, чем на других участках ступени). Эта часть ступени находится между самым глубоким минимумом геопотенциала на Земле (Индостанский полуостров, северо-восточная часть Индийского океана) и самым высоким максимумом (Новая Гвинея). Интерференция Альпийско-Гималайского и Тихоокеанского поясов, о которой писал академик С. С. Смирнов [23], физически проявилась здесь

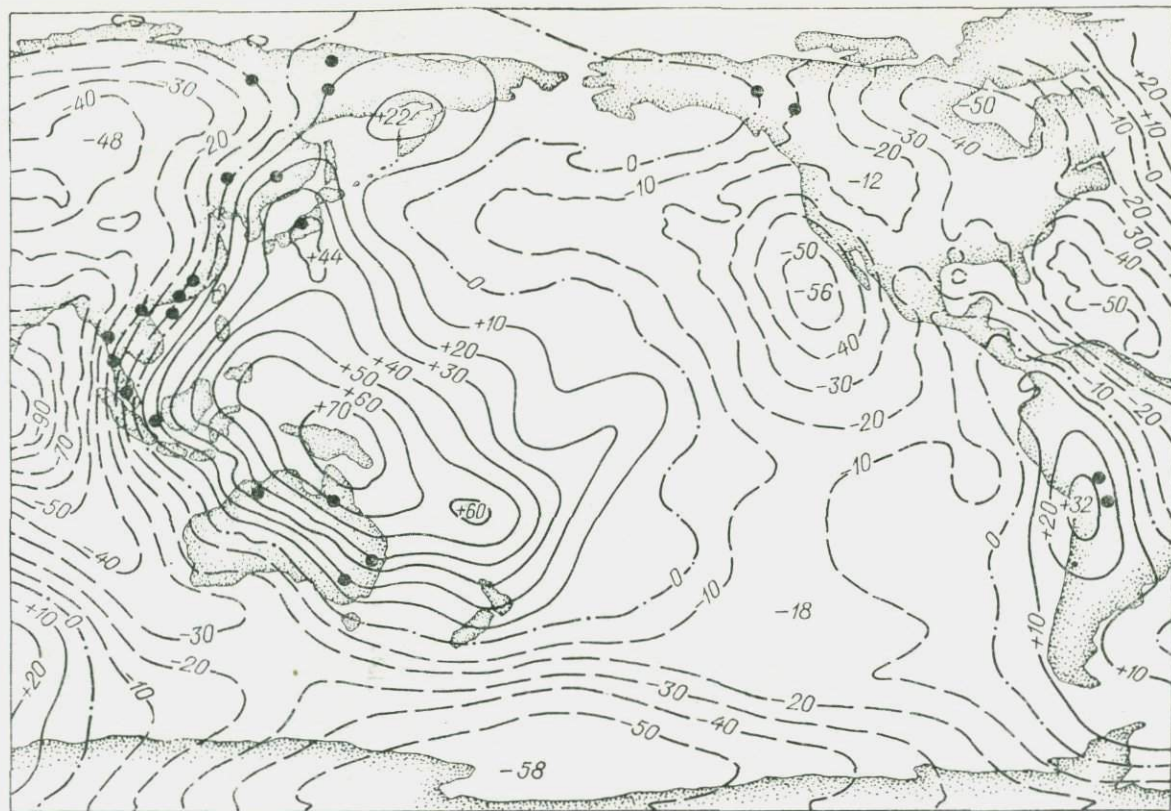


Рис. 7.15. Превышения геоида (данные Центра космических исследований НАСА [82]) и распределение основных оловорудных провинций Тихоокеанского кольца [86].

Изобилие даны в метрах.

в том, что встречное движение масс, субдуцируемых с запада дугой Сунда, а с востока — дугами Филиппин, Соломоновых и других островов, породило экстремальные по своим параметрам глубинные условия. Самая богатая оловоносная провинция (узкий Малаккский полуостров) располагается в наиболее удачной с этой точки зрения позиции по сравнению со всеми остальными фрагментами Австрало-Азиатского оловоносного пояса. Судя по изолиниям геопотенциала, в районе Суматры пояс резко изгибается, а не разрывается, как иногда предполагалось [9].

Весьма характерно, что в пределы выделяемого Тасмано-Чукотского термо-барического мантийного сепаратора попадают участки с весьма разным строением коры и в разной степени удаленные от границы континент — океан (о. Хайнань, Забайкалье и др.). Определяющим условием возникновения единой оловоносной структуры, протянувшейся на 19 000 км, оказалось состояние мантии, обусловленное длительным движением Тихоокеанской плиты.

В пределах восточного сектора обрамления Тихого океана в соответствии с особенностями его тектонической активности в мезозое и кайнозое наблюдается принципиально иное распределение глубинных масс. Полосе Кордильер отвечает минимум геопотенциала, Анд — умеренный максимум. Гравитационная ступень в северной части Тихого океана, выраженная не очень четко, и соответствующие ей оловорудные месторождения Аляски, вероятно, связаны с накоплением избыточных масс в результате мезозойского спрединга в хребте Ломоносова. Формирование оловоносной провинции Анд может быть объяснено теми же процессами, что предполагались для Тасмано-Чукотского пояса, но не столь резко выраженными. Вместе с тем эта провинция служит еще одним примером, показывающим, что тип земной коры выводимый из оценки ее мощности, весьма слабо контролирует региональное распределение промышленных концентраций олова, поскольку диапазон изменения мощности коры достигает 30—60 км. Как и в случае медного оруденения, учитываемая переменная изменяется в 2 раза.

С рассматриваемых позиций находит объяснение в целом незначительная и неравномерно распределенная оловоносность северного обрамления Тетиса. Хотя во многих отношениях Альпийско-Гималайский пояс похож на Тихоокеанский, тем не менее, судя по палеотектоническим реконструкциям Р. С. Дитца, Д. П. Маккензи, К. Ле Пижона и других специалистов, динамическая обстановка в Тетисе на протяжении всего мезозоя весьма напоминала ту, что существовала в восточном секторе Тихого океана (широкий спектр размеров и скоростей литосферных плит). Современные дуги Средиземноморья отличаются от тихоокеанских крайне низкими скоростями субдукции. Все это привело к существенно иной картине распределения избыточных мантийных масс, что подтверждается спутниковой гравиметрией. Имеет смысл

подчеркнуть также отчетливую продольную зональность мантии в пределах Тетиса. Это является дополнительным признаком отсутствия здесь единого рудного пояса, аналогичного Австрало-Азиатскому.

* * *

Главнейшие результаты рассмотренных в этой главе эвристических возможностей новой глобальной тектоники в петрологическом аспекте сведены в табл. 7.3. В этой таблице перечислены основные характеристики мобилистских моделей, вариации которых определяют спектр петрологических следствий и методы их идентификации. Из таблицы явствует, что все важнейшие эмпирические закономерности пространственно-временного распределения изверженных горных пород, составляющие ныне фундамент теоретической петрологии, находят свое место в единой и стройной концепции взаимодействующих литосферных плит. Эта концепция делает понятной природу наблюдаемого разнообразия магматических пород и их ассоциаций и позволяет предсказывать новые факты, которые раньше либо ускользали от внимания геологов, либо не получали удовлетворительного объяснения. С позиций мобилизма получает простое и ясное истолкование отсутствие однозначной зависимости геологического строения регионов от физического состояния глубин, а также отсутствие вследствие этого жесткого однозначного соответствия типов магматических формаций тектоническим условиям их локализации.

Значение идей мобилизма не ограничивается расшифровкой магматических событий, сопутствовавших распаду Пангеи. Методология мобилизма в полной мере приложима к анализу и самых ранних магматических эпизодов в истории Земли. Однако условием корректности палеотектонических и палеовулканических реконструкций является несравненно более полное и точное знание изменчивости состава магматических образований в пространственно-временных координатах, чем то, на которое пока что вынуждены опираться не только тектонисты, но и петрографы.

Мы старались показать, что обоснование унаследованного развития тектово-магматических структур и связи состава пород с особенностями строения коры и мантии не является «узким местом» мобилистских построений, а напротив, естественным образом следует из реальной картины петрогенетических процессов, которую можно в настоящее время наблюдать в местах нарушения сплошности литосферы, анализируя сопряженные вариации петрографических и геофизических данных. Мы старались также проиллюстрировать сложность соотношений геодинамики и петрогенезиса и показать недостаточность для их изучения только анализа простейших бинарных связей.

В заключение можно констатировать плодотворность и конструктивность методологической платформы мобилизма. Есть все основания предполагать, что теоретическая петрология про-

ТАБЛИЦА 7.3

Верификация мобилистских построений на петрологическом материале

Характеристика исходных моделей	Дедуктивно выводимые следствия (петрологические эффекты)	Методы верификации моделей (пути регистрации петрологических эффектов)
<p>Условия возникновения и существования конвекции</p> <p>Вертикальный градиент температур</p> <p>Неоднородности распределения масс</p> <p>Достаточно низкая вязкость</p> <p>Размер конвективной ячейки: $n \cdot 10^3$ км (конвекция в глобальном масштабе), $n \times 10^2$ км (конвекция регионального уровня)</p>	<p>Глобальная синхронизация магматической активности</p> <p>Противоположно направленные тенденции эволюции состава изверженных горных пород: гомогенизация химизма глубинных пород (эффект глобальной компоненты конвекции) и рост дисперсии содержания петрогенных элементов (эффект усложнения системы конвективных ячеек)</p> <p>Повышенный разогрев мантийных масс в периоды наиболее значительного перемещения и распада континентов</p> <p>Отсутствие строгого соответствия между петрохимическими индикаторами глубинных и поверхностных масс, с одной стороны, и индикаторами pT-условий — с другой</p> <p>Участие петрогенетических процессов в нарушении и восстановлении гравитационного равновесия</p>	<p>Геохронологические обобщения</p> <p>Глобальные петрохимические обобщения с поочередным алиминированием различно направленных влияний</p> <p>Петрохимическая и петрографическая индикация температурных условий выплавления базальтов (сравнительная палеотермометрия)</p> <p>Корреляционный и факторный анализ петрохимических данных</p> <p>Корреляционный анализ связи изостатических аномалий с петрохимическими индикаторами избытка (недостатка) масс</p>
<p>Положение литосферных блоков в конвективной ячейке</p>	<p>Принципиально односторонний характер связи между параметрами коры и мантии в зонах современного нисходящего мантийного течения; островных дугах и их палеогомологах — геосинклиналях фанерозоя и палеопрозоиских зеленокаменных поясах</p>	<p>Сравнительный анализ сопряженных вариаций петрологических и геофизических данных</p>

Характеристика исходных моделей	Дедуктивно выводимые следствия (петрологические эффекты)	Методы верификации моделей (пути регистрации петрологических эффектов)
	<p>Зависимость состава траппов от их пространственно-временной близости к зонам наиболее мощных восходящих мантийных потоков (в частности, определивших распад Пангеи в пермское время)</p> <p>Наследование и частичное сохранение на протяжении по крайней мере 2,5 млрд. лет во внутренних областях литосферных плит существовавших ранее соотношений между типом магматических провинций и особенностями глубинного строения территории</p>	
<p>Характер взаимодействия литосферных плит</p> <p>Интенсивность модуль скоростей, ориентировка векторов скоростей, количество взаимодействующих плит</p> <p>Экстенсивность (протяженность фронта взаимодействующих плит)</p> <p>Длительность</p>	<p>Поперечная зональность вулканоплутонических поясов, определяемая относительной скоростью взаимодействующих плит</p> <p>Зависимость интенсивности и экстенсивности вулканизма (плотность расположения вулканов на островной дуге и частота эруптивных актов) от нормальной компоненты скорости взаимодействующих плит и от вязкости мантийного субстрата на астеносферном и подастеносферном уровнях</p> <p>Интегрирование петрологических эффектов и усиление разнообразия соотношений между глубинными условиями и магматическими проявлениями в областях тройных и более сложных сочленений плит</p> <p>Продольная асинхронность вулканических</p>	<p>Сравнение состава магматических пород (с использованием аппарата дисперсионного анализа)</p> <p>Сопоставление вулкано-логических данных с кинематическими параметрами литосферных плит и термическими условиями в зонах субдукции</p> <p>Сравнительный анализ петрологических и геофизических данных в областях различного сочленения плит</p> <p>Сравнительный геохронологический анализ</p>

Характеристика исходных моделей	Дедуктивно выводимые следствия (петрологические эффекты)	Методы верификации моделей (пути регистрации петрологических эффектов)
	<p>поясов под воздействием ротационной компоненты скорости плит</p> <p>Рассеяние физических и петрологических эффектов при малой протяженности фронта взаимодействия плит и их усиление в противном случае.</p> <p>Поперечная миграция вулканических поясов в направлении, зависящем от интенсивности взаимодействия плит: в сторону океана — при высокой скорости плит, ретроградное смещение — при умеренной и малой скорости</p>	<p>Палеовулканологические и палеотектонические реконструкции</p>
<p>Тип взаимодействующих плит</p> <p>Океаническая — океаническая</p> <p>Океаническая — континентальная</p> <p>Континентальная — континентальная</p>	<p>Зависимость характера магматизма не только от стабильной и эволюционирующей компонент pT-условий в зоне магмообразования, но и от типа взаимодействующих плит.</p> <p>Зависимость пространственной ориентировки зон субдукции и развития магматизма от типа взаимодействующих плит; при коллизии двух однотипных плит — зависимость от различий разогрева и, следовательно, от различий вязкости мантии в их краевых частях.</p> <p>Формирование амагматичных зон сжатия, ориентированных вдоль протяженного фронта взаимодействия континентальных плит.</p> <p>Проявление магматизма активизационного типа в глубоком тылу более стабильной из взаимодействующих плит под</p>	<p>Выявление систематических уклонений от направленного и унаследованного тектоно-магматического развития регионов</p>

Характеристика исходных моделей	Дедуктивно выводимые следствия (петрологические эффекты)	Методы верификации моделей (пути регистрации петрологических эффектов)
	влиянием латерального тепло-массопереноса в пределах астеносферы	
Изменение параметров конвективной ячеи В глобальном масштабе На региональном уровне	Формирование новых петрографических провинций. Относительная независимость динамического режима в зоне субдукции от стадии развития вулкано-тектонических структур	Установление относительной независимости типа магматических формаций от тектонических условий их локализации

должит свое развитие в русле идей новой глобальной тектоники. Это означает, что наряду с традиционным направлением моделирования, охватывающим процессы формирования того или иного расплава в зависимости от pT -условий и состава исходного субстрата, а также движение расплава, его дифференциацию и кристаллизацию, в сферу возможностей петрологов войдет моделирование условий возникновения и эволюции петрографических провинций, изменения этих условий, а также состава изверженных и метаморфических горных пород на протяжении геологической истории Земли. Систему теоретического знания, полученного в результате такого моделирования, вероятно, правомерно будет называть новой глобальной петрологией.

8

О РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОЦЕССОВ УДАРНО-ВЗРЫВНОГО ПОРОДОБРАЗОВАНИЯ

Большинство магматических и метаморфических процессов порообразования протекает в земной коре и на ее поверхности при температуре от 600 до 1200, реже до 1400° С и давлении от $1 \cdot 10^5$ Па (атмосферное) до $(10 \div 15) \cdot 10^8$ Па, реже при более высоком [1]. Эти процессы (внедрение и изливание магмы, ее взаимодействие с окружающей средой, кристаллизация и дифференциация, региональный метаморфизм и ультраметаморфизм и т. д.),

имеющие известную геологическую длительность (от часов до миллионов лет) и ряд динамических показателей (скорости тепло- и массопереноса, изменения концентраций компонентов и т. д.), характеризуются соответственно и определенными уровнями преобразования энергии, связанной с подъемом эндогенного вещества. При длительном существовании петрогенетических систем породообразование является как бы общим результатом многочисленных ступенчато развивающихся процессов или многократного повторения одного и того же элементарного процесса.

Процессы породообразования в конечном счете ведут к уменьшению энтропии петрогенетических систем [11], что позволяет применять для их анализа различные долгоживущие физико-химические модели, учитывающие стремление систем к равновесию (механическому, химическому, тепловому и т. д.). Предполагается, что эти свойства природных петрогенетических систем, так же как и длительность существования и взаимозависимость, позволяют интерпретировать их изменение во времени, не выходя за рамки понятия об эволюции в его геологическом смысле. Традиционно широко применяется соответствующий петрологический анализ ассоциаций изверженных и метаморфических пород, дающий возможность реконструировать процессы их образования.

Особый характер имеют эндогенные процессы породообразования, происходящие с очень быстрым превращением энергии и выделением ее в окружающую среду, т. е. протекающие по типу взрыва. К ним относятся многие вулканические извержения взрывного характера, в частности катастрофические [2]. Эти процессы, при которых в течение нескольких минут выделяется до $4 \cdot 10^{18}$ Дж энергии, характеризуются быстрым восстановлением равновесия, нарушенного резко возросшим давлением (до $3 \cdot 10^8$ Па) в вулканическом канале. При эксплозии частично разрушается вулканическая постройка, разбрасываются раздробленные породы и ювенильный магматический материал, возникают различные игнибритовые потоки и покровы, накапливаются отложения раскаленных лавин и палящих туч, появляются пепловые и пемзовые потоки и покровы, отложения направленных взрывов, шлаковых конусов, камне-, пемзо- и пеплопадов.

Реконструкция процессов, происходящих при вулканических взрывах, основывается на непосредственных наблюдениях в областях современного вулканизма [2, 6 и др.] и на общей теории взрыва [9]. Единичные взрывы всегда носят деструктивный характер по отношению к геологической структуре, формируют большие объемы обломочных и нераскристаллизованных вулканических пород. Взрывные извержения (в том числе и катастрофические), неоднократно повторяясь и чередуясь с периодами покоя, представляют собой как бы элементарные акты нарушения и восстановления равновесия. Палеовулканологические реконструкции процессов породообразования, основанные на детальном изучении геологических тел, состоящих из различных горных пород, в боль-

шинстве случаев воссоздают именно интегральную историческую и эволюционную картину формирования соответствующих толщ горных пород. Некоторые методологические особенности таких реконструкций проанализированы И. В. Лучицким [6].

В последнее десятилетие были получены данные о существовании на земной поверхности принципиально иного типа порообразования (по сравнению с лито-, петро- и метаморфогенезом), идущего, так же как и некоторые взрывные вулканические процессы, с очень быстрым превращением энергии. При этом давление в начальный момент достигает сотен или даже сотен тысяч мегапаскалей, а температура превосходит несколько тысяч градусов Цельсия, что принципиально отличает этот процесс от обычных геологических явлений [20, 23, 28, 29]. Это происходит при формировании взрывных метеоритных кратеров, относительно редко обнаруживаемых на Земле, но составляющих характерный элемент поверхности других планет: Луны, Марса, Меркурия и, вероятно, Венеры [3, 5, 26].

В течение микросекунд или нескольких секунд на поверхности планеты или на небольшой глубине может выделиться до 10^{23} Дж энергии, значительная часть которой переносится центробежно на фронте ударной волны, часть выделяется в виде тепла, а часть переходит в кинетическую энергию выбросов. Теоретический анализ физического процесса соударения крупных метеоритных тел с поверхностью планет проведен свыше 25 лет назад [12], однако значение этого процесса для формирования структуры поверхности планет (особенно лишенных атмосферы) и специфической группы пород было оценено лишь в последние годы.

Моделирование процессов высокоскоростного кратерообразования в условиях лабораторных экспериментов и при искусственных подземных взрывах больших энергий (ядерных и химических) позволило с достаточной определенностью установить характер преобразования горных пород, происходящего под воздействием мощной ударной волны (аналогичной той, что возникает при взрыве метеорита), а также получить данные о необходимых давлении и температуре [28]. Подобные породы были найдены в пределах кратеров, метеоритное происхождение которых не вызывает сомнения (Барринджер в Аризоне, Волф Крик в Австралии и др.), в то же время они нигде не были обнаружены среди вулканических выбросов или эндогенных образований других типов.

Ведущим признаком ударно-взрывных структур на земной поверхности является присутствие остатков метеоритного вещества, что бывает в редких случаях и обычно в кратерах диаметром до 1,0—1,2 км, или же наличие обусловленных высокоскоростным ударом и взрывом специфических преобразований горных пород, что наблюдается в подавляющем большинстве структур, как небольших, так и гигантских. Взрывные метеоритные кратеры разного возраста (от 1700 млн. лет до современного) и разного диаметра (от 100 км до 100 м) известны на всех континентах, их

сейчас насчитывается более 70 [3, 5, 7, 8, 20, 26, 28], примерно такое же количество круговых морфоструктур относят к числу вероятных объектов космического происхождения. По своим размерам наиболее крупные и обычно видоизмененные эрозией, тектоническими движениями и осадконакоплением структуры во многих случаях соизмеримы с глубинными магматическими телами или вулканическими постройками, их площади достигают нескольких тысяч квадратных километров.

Особый характер этих морфоструктур и слагающих их пород долгое время не привлекал широкого внимания из-за недостаточной разработанности способов их опознания (особенно при выявлении астроблем — древних метеоритных кратеров, погребенных под толщами перекрывающих осадков или значительно эродированных и утративших первичные морфологические черты), а также из-за консервативности применявшейся при их исследовании методологии. Эта методология, приспособленная для изучения длительно формирующихся геологических объектов (осадочных и вулканогенных толщ, массивов изверженных и метаморфических пород, тектонических структур и т. д.), обеспечивала возможность реконструкции процессов пороодообразования лишь в рамках широко известных моделей вулканизма, осадконакопления, метаморфизма, динамических полей и т. п. Многие метеоритные кратеры рассматривались, например, как вулканические или криптовулканические структуры [16].

В последние годы в пределах ряда крупных астроблем выполнен комплекс специальных петрологических и других исследований, значение которых для развития методологии анализа ударно-взрывного пороодообразования трудно переоценить [18, 20, 21, 27, 28]. Исследования показали существенные отличия этих структур от вулканических, а также значительное своеобразие вновь возникающих и преобразованных взрывом пород, которые нередко принимают облик изверженных и метаморфических пород, а иногда тектонитов и осадочных отложений. Признаки высокоскоростного удара проявляются в комплексе специфических деформаций минералов, в их переходе в стеклообразные и гипербарические фазы, плавлении в результате повышения температуры за фронтом ударной волны. Признаки ударного метаморфизма пород и минералов служат решающим фактором в опознании астроблем, определяющим пути дальнейшего анализа первичных пороодообразующих процессов [28]. Реконструкция этих процессов основана на детальном анализе как вещественного состава материала, испытавшего ударные нагрузки, так и характера его распределения. С учетом теории взрыва подобные описания пород и их соотношений в различных астроблемах (Седбери, Рис, Госес Блаф, Маникуаган, Пучеж-Катунская, Попига́йская и др.) даны в многочисленных работах.

Дробление, плавление и выброс материала — это ведущие физико-механические процессы кратерообразования, которые при-

водят к возникновению трех главнейших групп пород: ударно-метаморфизованных и брекчированных пород основания кратера — аутигенной брекчии; импактного расплава, за счет которого формируются различные типы импактитов; и литоидных аллогенных брекчий. Состав пород этих групп, их текстура и структура во многом определяются особенностями геологического строения в месте удара, составом пород мишени и энергией взрыва [19, 22].

Ударное сжатие, воздействие отраженной волны разрежения, давление расширяющихся газов и разброс материала вызывают возникновение сложного комплекса преобразованных и новых обломочных горных пород, главнейшей особенностью которых является наличие различных деформаций как в микро-, так и в макромасштабах. Такие широко распространенные минералы исходных пород, как кварц, полевые шпаты, слюды, амфиболы и пироксены, приобретают многочисленные деформации: от смещений отдельных атомов в кристаллических решетках и дефектов структуры по определенным направлениям до различных расколов. Концентрация дислокаций кристаллической структуры при этом достигает $10^{12}/\text{см}^2$, чего нельзя добиться никакими иными способами, кроме как высокоскоростным воздействием. В ударно-метаморфизованных породах и импактитах при благоприятных условиях возникают различные гипербарические модификации кремнезема (коэсит, стিশовит) и других соединений. Синтез происходит в динамических условиях и невозможен при статическом давлении, существующем в земной коре.

Для понимания особенностей состава, структуры и взаимного расположения различных типов выбросов весьма существенна реконструкция динамических условий их возникновения, главным образом начального импульса и траектории. Растекание и выбрасывание расплавленного и раздробленного материала мишени из центра взрыва происходит с начальной скоростью, достигающей многих сотен метров и даже нескольких километров в секунду, что устанавливается по находкам выбросов за многие десятки и даже сотни километров от кратера. Газовые струи, насыщенные каплями расплава и обломками, двигались радиально от центра по разным траекториям — от весьма пологих до весьма крутых. Судя по результатам моделирования ударных кратеров [25, 28], наибольшие массы материала, в том числе в виде расплава, выбрасывались по относительно пологим траекториям, выплывавая и сдвигая при этом породы мишени. Газово-пылевое облако со сравнительно небольшим количеством более крупных обломков поднималось вертикально вверх, достигая значительной высоты (до многих десятков километров).

Результатом высокоскоростного выброса раздробленного и расплавленного материала являются накопления аллогенной брекчии и витрокластических импактитов — брекчий, в которых существенную часть составляют частицы и бомбы застывших стекол. Во внешних зонах возникшего кратера обломочные массы

оказываются перекрытыми более горячим обломочным и частично расплавленным материалом. Все эти образования погребены под массами обломков и крупиц стекла, выпавшими из тех частей газово-пылевого облака, которые имели крутую или вертикальную траекторию.

Вследствие кратковременности процесса, быстрого подъема и спада давления и температуры, а также перемешивания материала при его перемещении и выбросе возникающие литоидные брекчии отличаются неупорядоченностью в распределении текстур и структур, неравновесностью минеральных ассоциаций, в которых одновременно присутствуют минералы, испытавшие различные стадии ударного метаморфизма и плавления. Если в этих брекчиях возникают отдельные участки плавления или при перемешивании они частично захватывают распыленный при взрыве импактный расплав, образуются сложные переплетения различных типов пород.

Примером такого сочетания являются толщи пород, залегающие в основании крупных кратеров. Здесь сложно смешаны брекчированные и катаклазированные первичные кристаллические породы (гнейсы, граниты, кристаллические сланцы и др.), в которых местами проявляются не только хрупкие, но и пластические деформации, развиты различные стекла плавления, в том числе псевдотахилиты, полимиктовые и мономиктовые инъекционные брекчии со стеклом, внедренные в породы в течение фазы сжатия при прохождении ударной волны. В этих условиях иногда затруднительно или вообще невозможно петрографически определить породу, особенно в штуфе, если при этом исходить из обычных представлений о ее формировании. Так, перемещенные кратерные брекчии в отдельных случаях образованы глыбами кристаллических и осадочных пород, имеющими поперечник в десятки и первые сотни метров, иногда они сцементированы мелкообломочной брекчией, иногда этот мелкообломочный цемент отсутствует вовсе. В этом случае «горной породой» при среднемасштабном геологическом картировании следует считать не каждый отдельный блок или глыбу того или иного состава, а всю мегабрекчию в целом. Отсутствие какой-либо слоистости, сортировки обломочного материала — характерная черта аллогенных брекчий. Вместе с тем в ряде случаев устанавливается наличие текстур течения, обусловленных перемещением обломочных масс или их отложением из быстро движущихся потоков газа.

Образование импактного расплава, особенно в больших объемах, происходит в тех случаях, когда породами мишени являются кристаллические породы, имеющие большое сопротивление сжатию, а энергия взрыва достаточно велика. Застывший импактный расплав внешне обычно напоминает эффузивную горную породу, поэтому раньше массивные импактиты рассматривались как магматические образования. Названия некоторых из них вошли в петрографию в качестве наименований для разновидностей

эффузивных пород. Таковы, например, деллениты — массивные импактиты из астроблемы Деллен, впервые описанные В. Брегером [15] как богатая плагиоклазом разновидность липаритодацитов. Поскольку породы, застывшие из импактных расплавов, являются «огненными» (igneous), исследователи, пишущие на английском языке, иногда употребляют этот термин для характеристики импактитов [19]. В петрографической литературе на русском языке слово igneous неточно переводится как «изверженные», что подчеркивает не состояние эндогенного вещества, а способ его появления в верхних горизонтах земной коры и на поверхности. Поскольку импактиты не являются эндогенными образованиями и не появляются в результате «извержения» расплава, очевидно, что относить их к этой категории пород неправильно.

Импактные расплавы возникают при ударном плавлении больших масс горных пород, нередко разных по составу, однако радиальное растекание и выбрасывание этого расплава приводит к его интенсивному перемешиванию и известной гомогенизации. Часть расплава испаряется при температуре в несколько тысяч градусов, часть распыляется и входит в состав витрокластических импактитов, часть застывает в виде сплошных масс стекловатых или раскристаллизованных пород, содержащих многочисленные включения исходного материала, оплавленного и ударно-метаморфизованного. Большая скорость возникновения расплава, высокая температура, динамика его радиального перемещения — все это не позволяет использовать для анализа происходящих процессов обычные петрогенетические модели. Некоторые методы (в частности, корреляционный анализ в его различных модификациях) помогает установить меру унаследованности состава импактитов по отношению к исходным породам, например характер изменения связей между компонентами при частичном и полном плавлении. Чтобы объяснить ряд особенностей состава импактитов, необходимо привлечь модели селективного испарения, реакций в газовой фазе, несмесимости и т. п. Лишь последующая кристаллизация стекол может найти аналогии в явлениях кристаллизации эффузивных пород, в частности переохлажденных, однако и здесь имеется важное отличие: в импактитах отсутствуют вкрапленники или разные поколения микролитов, характерные для двухстадийной кристаллизации.

Брекчиевые импактиты (зювиты) распространены шире, чем массивные, образующие сравнительно мощные пластовые тела лишь в крупных кратерах. Отложение зювитов (иногда они перемешаны с материалом литоидных брекчий) происходило из кольцевой, радиально расширяющейся взрывной базисной волны — облака большой плотности, образованного выбросами обломков, расплава и газов по пологим траекториям, а также материалом, оседающим из вертикальной газовой колонны выбросов, уже частично охлажденной. Возникающие при этом процессе разные типы зювитов различаются размерами и соотношением

витро- и литокластов, количеством мелкообломочного цемента, характером цементации, текстурами и т. д. Некоторые разновидности по отдельным внешним признакам, обусловленным способами транспортировки и отложения, могут напоминать игнибриты, однако в зювитах отсутствует ювенильный магматический материал. В верхних горизонтах зювитовых толщ обнаруживаются признаки отложения из радиально движущихся турбулентных потоков газа — определенным образом ориентированные косые серии слабосортированных обломков.

Особое значение имеет обладающая градационной слоистостью пачка обломочных пород, перекрывающая несортированные брекчии и связанная с оседанием материала из взрывного облака по вертикали. Эту пачку составляют сохраняющиеся лишь в редких случаях отложения самых верхних горизонтов полного разреза брекчий, заполняющих кратер. Гравитационное оседание, происходящее на последнем этапе катастрофы, некоторым образом приближает условия породообразования к обычным седиментационным. По-видимому, подобные, но тонкообломочные пепловые отложения можно обнаружить после мощного взрыва в достаточно удаленных от кратера районах (на сотни и тысячи километров).

Условия породообразования значительно осложняются при формировании кратера не на суше, а на мелководье, когда заполнение кратера идет в условиях бурной водной эрозии. Детальный анализ таких процессов пока отсутствует.

Взрывной метеоритный кратер, имеющий поперечник от первых километров до нескольких десятков километров, образуется не более чем за несколько минут, хотя некоторые постумные явления могут продолжаться значительно дольше, в частности оседание тонкой пыли и обломков из взрывного облака, оползни с бортов кратера, выпадение катастрофических дождей и разрыв брекчий, охлаждение и кристаллизация импактных расплавов, низкотемпературные гидротермальные преобразования пород и минералов, наконец, медленные движения дна кратера, связанные с упругой отдачей после взрыва. Эти движения (иногда блокового характера) могут обеспечить перемещение вверх сохраняющейся в глубинной части кратера линзы импактного расплава.

Многообразные явления последствия создают впечатление многостадийности породообразования и в отдельных случаях частично стирают первичные особенности пород, в частности некоторые структурно-текстурные признаки. К таким же результатам может привести и последующее наложение каких-либо эндогенных процессов (метаморфизм, тектонические движения), а также проникновение по возникающим разломам магматических расплавов с глубины. Возможность проявления триггерного магматизма в пределах астроблем требует специального обсуждения. Существует мнение о широком развитии такого магматизма, однако доказательные примеры весьма немногочисленны [24].

Большие скорости выброса, значительные различия в температуре отдельных частей взрывного облака, разная степень преобразования и дробления пород, хаотическое перемешивание разнородного материала — все это создает большие трудности в интерпретации наблюдаемых соотношений различных пород, если исходить из представлений об обычных геологических процессах: эрозии, осадконакоплении, тектонических движениях, явлениях вулканизма и т. д. Каждый небольшой кусок брекчи или включенная в нее глыба могут производить впечатление, что они образовались в результате самостоятельного геологического процесса, имеющего определенную длительность и связанного с другими такими же процессами соотношениями последовательности. Однако истинная интегральная картина, реконструируемая по отдельным фрагментарным наблюдениям, оказывается совершенно иной, если учитывать перечисленные выше особенности взрывного процесса.

Особо следует сказать о соотношениях отдельных типов пород, чему при анализе обычных геологических процессов придается существенное генетическое значение. Известно, что для суждения о геологическом процессе недостаточно знать вещественный состав и взаимное расположение отдельных порожденных им тел, необходимо определить характер их отношений. Эти сведения получают, анализируя поверхности контактов и особенно изменения внутренней структуры тел перпендикулярно к этим поверхностям.

В толщах пород, выполняющих астроблемы, могут наблюдаться различные типы контактов между породами, а также различные переходы одной породы в другую. При этом соотношения между двумя породами могут трактоваться и как включение первой во вторую (и наоборот) и как пересечение первой породы второй (и наоборот); в то же время могут наблюдаться и постепенные переходы между ними. Трактровка таких ситуаций как отношений последовательности образования пород в обычном геологическом смысле приводит к противоречиям и путанице. Очевидно, что применимость традиционных методов интерпретации соотношения пород к продуктам высокоскоростных процессов ограничена. Можно было бы привести множество примеров такой традиционной интерпретации, которая допускает нагромождение различных последовательных геологических процессов в ряде крупных астроблем.

Подобные схемы реконструкции процессов породообразования, предлагавшиеся разными авторами, которые отстаивают земное (эндогенное или экзогенное) происхождение этих структур, обычно различаются лишь в деталях. Например, предполагалось, что в платформенных условиях сначала возникает обширное куполовидное поднятие большой амплитуды (до 2—3 км), со склонов которого селевые потоки сносят массы грубообломочного материала, содержащего глыбы до нескольких десятков метров

в поперечнике; эти потоки якобы могут деформировать окружающие осадочные толщи. Затем к вершине купола будто бы проникают вулканические газы, вызывающие гигантский поверхностный взрыв, после которого происходит обрушение и образование кратера или кальдеры. Допускалось также, что вулканическая деятельность затем может возобновляться и сопровождаться явлениями метасоматоза и оруденения. Иногда к объяснению привлекались также процессы эрозии, выветривания, осадконакопления, гидровулканизма и т. д.

Нередко круговые морфоструктуры рассматриваемого типа считают структурами длительного развития, связанными с различными линеаментами [10, 14, 16, 17].

Надо заметить, что при всех этих построениях не высказывается сомнений в реальности такого последовательного нагромождения разных, подчас невероятных процессов на небольшом участке земной коры, происходящих к тому же за сравнительно короткое в геологическом понимании время (эпохи или один-два периода). Объяснение же всех наблюдаемых фактов одним-единственным физически возможным событием при этом не принимается, а представление о внезапной природе взрывных структур является антиисторичным. Традиционное представление об универсальности так называемого принципа историзма (возможность измерять геологическое время путем анализа структуры) неоднократно подвергалось критике [13, 23]). На ограниченность сферы действия этого принципа указывают Ю. А. Косыгин и В. А. Соловьев [4].

Процессы породообразования при метеоритных ударах и взрывах по сравнению с большинством интегральных геологических процессов (текто-, лито-, петрогенез) могут рассматриваться как единичные, элементарные, несмотря на всю сложность возникающих при этом объектов. В условиях земной поверхности и верхних горизонтов коры (где могут встречаться захороненные древние взрывные метеоритные кратеры) явления наложения кратеров, столь характерные для Луны, Марса, Меркурия, практически не отмечаются. Это объясняется сравнительно короткой экспозицией поверхности под метеоритные удары, а также уничтожением их следов эрозией. В этом заключается принципиальное различие в характере пород, выполняющих метеоритные кратеры на Земле и на Луне: на Земле эти породы созданы одноактным процессом, на Луне они почти всегда являются результатом многократного повторявшегося дробления, плавления и охлаждения [22].

Это положение сохраняет свою силу лишь на геологической стадии развития Земли. На догеологической стадии многократное повторение отдельных метеоритных ударов является фактором исторического значения, формирующим соответствующий покровный комплекс пород. Соударение крупных метеоритов, астероидов или комет с поверхностью Земли или других планет представляет

собой реальное природное явление, имеющее катастрофический характер; в случае большой энергии взрыва могут быть катастрофические последствия для определенных ареалов живых организмов. По подсчетам Г. Юри [30], при массе кометы около 10^{18} г, скорости 45 км/с (соответственно энергия около 10^{24} Дж) удар может привести к повышению температуры атмосферы Земли на 190° С (если вся энергия израсходуется на нагрев атмосферы). Но и в том случае, если на такой нагрев пойдет незначительная часть всей выделившейся энергии, катастрофические последствия подъема температуры атмосферы даже на десятки градусов несомненны.

Г. Юри в этой связи указывает, что к некоторым границам геологических периодов в кайнозойе, отмеченным сменой комплексов фауны и флоры, приурочено образование тектитных полей рассеяния, которые могли возникнуть при кометном ударе большой энергии и выбросе части расплавленного материала за пределы атмосферы. Так, образование австралитов (возраст 0,7 млн. лет) и тектитов (1,2) Берега Слоновой Кости приурочено к границе плиоцена и плейстоцена (1,0 млн. лет), молдавитов (14,7) — к границе миоцена и плиоцена (13 млн. лет), стекла Ливийской пустыни (28,6) — к границе олигоцена и миоцена (25 млн. лет), а бедиазитов (34,7) — к границе эоцена и олигоцена (36 млн. лет). Эти данные указывают на одну из возможных естественных причин внезапных перемен в животном и растительном мире прошлого.

Катастрофический процесс соударения и взрыва по своим результатам противоположен большинству эндогенных и экзогенных геологических процессов породообразования, так как ведет к разрушению геологической структуры в месте удара, разрушению горных пород и минералов и их кристаллических решеток вплоть до появления полностью или почти полностью разупорядоченной системы — расплава, обычно застывающего в виде стекла. Можно, по-видимому, предполагать резкое увеличение структурной энтропии в месте удара, обусловленное переходом кинетической энергии в тепловую и ее диссипацией. Появление расплава и быстрое застывание его в виде стекла интересны и с позиций термодинамики, поскольку стекло обладает большей энтропией по сравнению с кристаллическими породами того же состава при той же температуре. Как известно, стекло (переохлажденный расплав) имеет и конечную энтропию при абсолютном нуле, что является исключением из третьего закона термодинамики. Эта сторона процесса ударно-взрывного породообразования весьма важна для сравнительной оценки структуры поверхностных слоев Земли, Луны и других планет.

Интересно отметить, что ударно-взрывное породообразование относится к древнейшим процессам формирования горных пород на планетах земной группы, и в частности на Земле. Лишь с началом дифференциации ее внешних частей на оболочки этот тип

породообразования был почти полностью вытеснен петро- и литогенезом. По аналогии ударно-взрывное породообразование может быть названо коптогенезом: от греческих слов, означающих ударять (дробить, разрушать ударами) и рождение.

9

ВРЕМЕННЫЕ ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ (ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫЙ АСПЕКТ)

Петрохимические обобщения поставляют уникальный материал для суждения о необратимых изменениях состава литосферы и отдельных ее частей. Имеет смысл различать методические подходы к выявлению эволюционных тенденций в зависимости от того, какие объекты, временные (диахронические) интервалы и признаки принимаются во внимание. В соответствии с этим можно говорить о многообразии аспектов изучения эволюции. Фиксируя объект, ограничиваясь тем или иным возрастным диапазоном и выбирая нужные признаки, исследователь тем самым определяет предмет изучения, т. е. интересующее его явление: эволюцию вещества мантии, структурно-тектонической зоны, магматического очага и т. д. Можно различать такие градации эволюционирующих объектов: литосфера в целом (кора, верхняя мантия), регион (структурно-формационная зона, складчатый пояс, континент и т. д.), магматическая ассоциация, горные породы. Понятно, что эти градации условны, они могут варьировать в зависимости от целей исследования и поэтому не имеют ничего общего с канонизированным перечнем так называемых уровней организации вещества.

В зависимости от масштаба изучаемого явления целесообразно различать временные интервалы по их протяженности, выраженной, например, в миллионах лет, — «масштабы эволюции», как это делает Д. В. Рундквист [36], или учитывать определенную градацию геологических процессов — диахронический диапазон: геологическую историю в целом, тектоно-магматический цикл, этап тектоно-магматического цикла, фазу магматической активности. При этом глобальные петрохимические обобщения поставляют материал для анализа временных трендов в рамках первых двух из числа перечисленных диапазонов. В особую категорию можно выделить исследования, при которых временной интервал априори не фиксируется. Сюда относится изучение всякого рода постмагматических преобразований пород, например эволюция химизма базальтоидов в процессе их зеленокаменного перерождения [8].

Чаще всего в центре внимания геологов оказывается состав магматических образований, его направленное изменение. По этой причине в рассмотрение принимаются всякого рода средние концентрации и соотношения петрогенных элементов (кларки, ферсмыв и т. п.). В последнее время, однако, появился интерес к изучению эволюции дисперсии состава и внутренних корреляционных связей элементов. В этом плане получены интересные результаты [11—13]. В дальнейшем, вероятно, геологов будет привлекать также эволюция связей в пределах магматических ассоциаций, дисперсия ферсмов, а также эволюция связей химизма магматических образований с глубинной структурой регионов. Специфический интерес представляет выявление петрохимических инвариантов разного масштаба — теневой стороны эволюционного процесса [4].

Рассмотрим более подробно методическую специфику возможных конкретных подходов к изучению эволюции разномасштабных объектов.

Задача оценки эволюции состава литосферы в целом по петрохимическим данным путем последовательного вычисления палеокларков была сформулирована Ф. Э. Викманом более 10 лет назад [15]. Попыток ее решения, насколько нам известно, не предпринималось; причиной тому можно считать трудности, часть которых имеет принципиальный характер. К ним относится бесследное исчезновение некоторой части магматических образований в процессе гомогенизации крупных блоков земной коры. Реликты подобных событий можно видеть в осколках континентальной коры среди океана (Сейшельские острова), в гранитах на дне Японского моря и т. д. Оценку палеокларков в первом приближении можно получить, изучая химизм продуктов разрушения и аккумуляции изверженных пород, как это делает А. Б. Ронов [34]. Эта оценка, безусловно, смещенная из-за систематических различий состава осадочных и изверженных пород [7]. Тем не менее некоторые главные тенденции таким путем, по-видимому, выявляются [34].

Другая категория трудностей имеет методический характер. Они связаны с получением несмещенных оценок современной распространенности химических элементов (как, впрочем, палеокларков и палеоферсмов). Если пренебречь влиянием погрешностей аналитических определений, то можно выделить две главные причины, вызывающие наблюдаемый достаточно широкий разброс оценок. Одна из них обусловлена различиями используемых моделей строения земной коры: предполагаемой распространенностью пород различного типа (базальтов, андезитов, гранитов и т. д.); другая — тем, в какой мере учитывается разнообразие химического состава петрографически однородных пород. Это разнообразие состава, порождаемое пространственно-временным трендом, обычно фигурирует в качестве формационной специфики пород; недоучет его чреват смещенностью оценок кларков.

Иногда для оценки глобальной и региональной распространенности химических элементов прибегают к процедуре получения вполне рандомизированной выборки из различных сводок химических анализов [10]. Очевидно, что при таком подходе несмещенность оценок природной распространенности химических элементов может быть достигнута только при условии, когда в совокупности выполненных анализов пропорционально представлены разнотипные формации. Едва ли это так, поскольку известно, что редкие формационные типы опробуются более полно; то же можно сказать и о разнородностях пород, с которыми связано промышленное оруденение. Полученные таким путем цифры следует принимать не как оценку распространенности химических элементов в породах того или иного типа, а как оценку распространенности имеющихся аналитических определений, что далеко не одно и то же.

Можно предложить несколько путей, обеспечивающих корректные оценки региональной и глобальной распространенности элементов. Один из них заключается в вычислении химического состава магматических формаций с подсчетом их относительной распространенности. Так поступал, в частности, Е. К. Устиев, определявший средний химический состав пород Охотского вулканического пояса. Другой путь связан со специальным дополнительным рандомизированным опробованием территории. Этим путем следовали, в частности, канадские геологи (Д. Шоу и др.), изучавшие средний химический состав Канадского щита. Наконец, третий путь предполагает организацию такой выборки из имеющейся совокупности химических анализов, которая действительно бы гарантировала случайность в отношении географических координат и, следовательно, разнотипных формаций и слагающих их пород. Это может достигаться, например, использованием таблиц случайных чисел для определения точек на геологической карте, которым затем должны быть поставлены в соответствие вполне определенные химические анализы или группы анализов (в зависимости от принятой техники вычислений). Любое обращение к сборникам химических анализов, минуя геологическую карту, ведет к получению смещенных оценок региональных и глобальных кларков.

Эволюции состава магматических ассоциаций (формаций) посвящено значительное число работ. С методической точки зрения важно выделить два подхода: в зависимости от того, фиксирован или не фиксирован априори тип изучаемой ассоциации. В том случае, когда сравнивается состав последовательно формирующихся магматических комплексов вне зависимости от их формационной принадлежности, с помощью некоторых петрохимических индикаторов иногда удается выявить наиболее общие тенденции тектоно-магматической эволюции регионов [18, 26, 33].

В случае априорной фиксации типа ассоциации геологи стремятся уловить различия в химизме однотипных в некотором

смысле магматических комплексов. Чаще всего задача формулируется как изучение эволюции состава какого-либо формационного типа [14, 31], при этом обычно подразумевается, что в процессе эволюции формационный тип не утрачивает своей качественной определенности. Заметим, что в этих двух, по существу, взаимоисключающих ограничениях кроется некоторое противоречие. Действительно, либо геолог сначала фиксирует тип магматической ассоциации (в том числе и ее состав) и выявляет среди разновозрастных образований однотипные, приходя тем самым к выводу, касающемуся не направленности развития, а повторяемости магматических продуктов и, возможно, условий их образования; либо, напротив, геолог устанавливает формационную несопоставимость разновозрастных образований. При априорной строгой фиксации формационной принадлежности магматической ассоциации третьего не дано. Иначе говоря, сама формулировка задачи «изучение эволюции формационного типа» звучит столь же некорректно, как намерение изучать варьирующий эталон или неизменяемую константу.

Практика подобных исследований подтверждает высказанный тезис. Так, при попытках проследить эволюцию состава гранитоидных комплексов в течение палеозоя мы всякий раз убеждаемся в формационной несопоставимости каледонских и варисцийских образований. Среди последних мы не найдем, в частности, представителей, отвечающих по составу таким раннегеосинклинальным габбро-гранитовым комплексам, как таннуольский в Туве, ольховский в Восточном Саяне, крыккудукский в Северном Казахстане и т. д. Сопоставляемые иногда с ними варисцийские комплексы типа змеиногорского, саурского, пластовского, дарханского и им подобные неизменно отличаются по таким важнейшим характеристикам состава, как общая кремнекислотность и соотношение щелочей [3]. И наоборот, столь типичная для варисцийских структур формация аляскитовых гранитов (акчатауский, бороундурский и им подобные комплексы) полностью отсутствует в каледонидах.

Аналогичная ситуация возникает при попытках проследить эволюцию альпинотипных гипербазитов. Единодушие петрологов в вопросах о формационных аналогах сохраняется до тех пор, пока сопоставление ограничивается рамками фанерозоя. Первые неопределенности появляются при обращении к гипербазитовым комплексам протерозоя. В большинстве своем эти гипербазиты более железистые, так что с учетом известного критерия Хесса их «альпинотипность» принимается лишь «по необходимости». Что же касается гипербазитов архея возрастом 2,5 млрд. лет и более, то большинство петрографов категорически отказываются видеть в них те породы, которые Г. Хессом и его последователями именуется гипербазитами чистой линии. Архейские гипербазиты подобно фанерозойским ассоциируют с базальтоидами, которые с определенной долей условности можно считать эвгеосинкли-

нальными. Однако состав, морфология массивов и даже, вероятно, способ образования у архейских гипербазитов во многом иной, чем у фанерозойских. Таким образом, и в данном случае, по-видимому, нецелесообразно, решая проблему эволюции, априори жестко фиксировать формационную принадлежность сопоставляемых объектов. Предтечей альпинотипных гипербазитов приходится считать «примитивные» по составу (высокожелезистые, высокоглиноземистые) гипербазиты архея — «протогипербазиты», как их назвала М. И. Каденская [21].

При изучении эволюции состава магматической ассоциации во многих случаях не только возможна, но и целесообразна априорная фиксация некоторых ее параметров, т. е. ограничение класса рассматриваемых объектов, но недопустима в явном или неявном виде фиксация тех характеристик, изменчивость которых подлежит изучению. К числу наиболее часто задаваемых характеристик относятся тектоническая позиция, морфологическая, фациальная и прочая специфика магматических комплексов.

Все это в равной мере относится и к методам изучения эволюции, основанным на прослеживании изменения состава тех или иных разновидностей пород. При этом полезно различать три методических подхода, которые базируются на прослеживании изменения химизма пород.

1. Петрографический (петрохимический) тип априори не фиксируется.

2. Петрографические и (или) некоторые петрохимические особенности (например, содержание кремнезема) фиксируются.

3. Дополнительно к условию, отмеченному в предыдущем пункте, фиксируется тип магматической ассоциации в указанном выше смысле.

С первым подходом мы сталкиваемся в работах тех исследователей, которых занимают вопросы эволюции магматического очага, последовательность становления интрузивных массивов и т. п. [20, 42]. Возможность таким путем прослеживать эволюционные тенденции в более крупных диахронических диапазонах сомнительна. Заметим попутно, что далеко не всегда послойное описание разреза вулканогенных пород дает право судить об эволюционных тенденциях. Переслаивание пород основного и кислого состава часто может объясняться не сменой гомодромного направления дифференциации антидромным, а сосуществованием разнотипных магматических очагов. При этом на сравнительно небольших расстояниях может наблюдаться и та и другая последовательность. На подобные соотношения основного и кислого вулканизма в последнее время обращали внимание А. Н. Кен [22] и В. И. Чернов [38].

Наблюдать характерные тенденции эволюции состава вулканических продуктов удастся лишь при их детальной хронометрической изученности. На примере строго датированных извержений Соммы и Везувия можно видеть качественно разные результаты

дифференциации расплава в магматическом очаге и в подводящем канале [19]. Нечто похожее наблюдается и при анализе лав Килауэа и Мауна-Лоа на Гавайских островах [50]. Вулканические продукты, отвечающие началу извержения (эксплозивная фаза), обычно отличаются повышенным содержанием таких типичных компонентов «остаточных магм», как титан, марганец, фосфор. Подобную специфику состава, в частности, можно видеть в первых порциях лавы, сопровождавшей образование паразитного кратера Такетоми на вулкане Алаид (Курильские острова).

Фиксация петрографического типа пород (второй подход) позволяет решать интересующую нас задачу в любом временном интервале. При этом, однако, наиболее ценные результаты получаются при изучении эволюции тектоно-магматического цикла и отдельных его частей [9, 32, 37, 49]. Многие важные детали общепланетарных тенденций остаются вне поля зрения геолога.

Третий методический подход играет ведущую роль при изучении эволюции в глобальном масштабе. Именно таким путем удалось установить главные тенденции эволюции базальтов в складчатых областях и на платформах, а также гипербазитов и раннегеосинклинальных гранитоидов [5, 24]. Важным условием получения надежных выводов является организация такой выборки эмпирического материала, которая составляла бы значительную часть генеральной совокупности.

Кроме изучения состава магматических образований интерес представляет оценка направленных изменений таких характеристик, как дисперсия, коэффициент вариации и структура внутренних связей химических компонентов. В этом плане сделаны еще только первые шаги. Тем не менее к числу твердо установленных фактов можно отнести тенденцию возрастания дисперсии составов магматических образований, подобную той, что была отмечена Д. В. Рундквистом при анализе изменчивости рудных месторождений [36]. Существование такой тенденции можно связывать с тем очевидным обстоятельством, что рост дисперсии продуктов магматизма зависит от дисперсии условий их образования, которая в свою очередь зависит от дисперсии параметров процесса на предыдущем этапе. В результате дисперсия растет, так как растет число ее источников (умножается число «актов производства» во времени, влияние «неточности технологии» в пределах каждого акта и т. д.).

При изучении изменчивости связей между составными частями магматических образований к интересным результатам приводит обращение к моделям факторного анализа [3, 11, 16].

Таким образом, накопленный к настоящему времени опыт изучения петрохимической эволюции свидетельствует о том, что этим путем удастся выявлять общепланетарные разнонаправленные тенденции изменения состава и строения литосферы,

ТАБЛИЦА 9.1

Масштабы и аспекты петрохимической эволюции (опыт изучения)

Диахронический диапазон	Исследуемые характеристики объектов							Изменение дисперсии содержания элементов и их внутренних связей ***
	Изменение средних содержаний петрогенных элементов							
	Литосфера в целом (кларки)	Регион (фермы)	Магматические ассоциации		Горные породы			
			Тип не фиксирован	Тип фиксирован *	Тип не фиксирован	Фиксированы петрографические особенности	Фиксированы петрографические особенности и тип **	
Геологическая история в целом	[15, 44]	[17, 41, 46]		[3, 14, 31]	[43]	[41, 48]	[1—3, 5, 6, 14, 24, 25, 28]	[11, 16, 24]
Тектоно-магматический цикл	? ****		[18, 23, 26—30, 33, 37, 44]			[9, 35, 45]		[4, 12]
Этап тектоно-магматического цикла	?	?		?	[20, 42]	[32, 37, 47, 49]	[23]	[3, 12, 40]
Фаза магматической активности	?	?	?	?	[19, 30, 39, 50]		?	

* Могут быть фиксированы принадлежность к определенному этапу тектоно-магматического цикла, морфологические, фацialsные, или иные особенности.

** Могут быть фиксированы некоторые петрохимические особенности, например содержание кремнезема.

*** Возможна более дробная систематизация объектов.

**** Знак вопроса показывает, что изучение эволюции в данном масштабе и аспекте по разным причинам не представляет сколь угодно существенного научного интереса или вообще лишено смысла.

проявляющиеся, в частности, в вариациях химизма магматических образований, их размеров и морфологии, а также удается проследивать соотношения петрогенетических процессов. В табл. 9.1 систематизированы подходы к изучению петрохимической эволюции разномасштабных объектов и даны ссылки на работы, в которых иллюстрируются возможности того или иного подхода.

10

О КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПОСТРОЕНИЯХ НА ПЕТРОХИМИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

Классификация как метод изучения всего разнообразия ассоциаций изверженных горных пород лежит в основе формационного анализа. Любая классификация, даже если ее создатели приписывают ей статус «естественной», не более чем модель, в том или ином смысле упорядочивающая объекты исследования. Модельностью классификационных построений определяется их множественность. При этом, однако, очевидно, что среди принципиально неограниченного количества мыслимых классификаций не все равноценны с точки зрения простоты их построения, формализованности исходных признаков и пригодности для решения того или иного спектра геологических задач. Так, классификации магматических формаций на тектонической основе, как правило, не обеспечивают однозначности в соотношении классифицируемых объектов из-за гипотетичности и неформализованности исходных понятий. Кроме того, подобные классификации принципиально непригодны для тектонических построений, ибо в этом случае геолог неизбежно попадает в ситуацию порочного круга. Опыт построения такой классификации [15] с выделением образований, отвечающих ранним, средним и последующим стадиям развития регионов, показывает, что магматические комплексы, практически тождественные по набору слагающих их пород, нередко занимают разную позицию в классификационной схеме [11].

С учетом этих замечаний становится вполне понятным то предпочтение, которое геологи давно уже отдают классификациям, опирающимся на структурно-вещественные характеристики объектов. Известны классификации, учитывающие соотношение породообразующих и аксессуарных минералов, петрогенных элементов и элементов-примесей, рудоносность пород и т. п. При этом минералого-геохимическая, металлогеническая и им подобные классификации ориентированы на выполнение узких специализированных функций; это вспомогательные диагностические классификации, обычно не претендующие на учет полной группы объектов. Их построение и использование часто сопряжено со

значительными техническими трудностями, а познавательные возможности остаются не вполне ясными.

Классификации на петрографической и петрохимической основе, напротив, играют в петрологии первостепенную роль. Сравнительный анализ этих двух главных типов классификаций предпринимался неоднократно. При этом вскрывались в какой-то мере некомпенсирующие друг друга преимущества и недостатки того и другого подхода, вследствие чего обычно констатировалась их приблизительная равноценность. В последние годы накоплен большой опыт формационных исследований, существенно уточнены сведения о разнообразии состава магматических комплексов, значительно усовершенствованы приемы обработки эмпирической информации. Все это стимулирует дополнительное обсуждение затронутого вопроса.

Отметим прежде всего, что назначение петрографической и петрохимической классификации в основных чертах одно и то же: это обычно не детализируемый достаточно широкий спектр геологических целей (главным образом, задачи тектоники и металлогении), достижимость которых по ряду объективных причин, как правило, не обсуждается и редко контролируется. Петрохимический подход более универсален, поскольку позволяет получать характеристику состава как неполнокристаллических пород, так и пород, минералогический состав которых претерпел существенные изменения.

Петрографическая номенклатура пород более удобна в повседневной практике, поскольку она вполне отвечает потребностям полевой геологической документации. Однако в течение ближайших 10—15 лет весь накопленный и вновь поступающий материал, вероятно, лишь в малой мере может быть освоен, если систематизировать его на минералого-петрографической основе. Это определяется неунифицированностью петрографической терминологии и низкой точностью рядовых наблюдений. В отличие от минералого-петрографических данных петрохимическая информация, как известно, предельно формализована, а точность современных аналитических определений в большинстве случаев достаточно высока. Считается, что минералогический состав породы в большей мере, чем химический, отражает условия становления магматических тел. Это справедливо лишь отчасти. Опыт петрохимических исследований последних лет свидетельствует, что практически все нюансы петрогенетических процессов любого масштаба так или иначе отражаются в химическом составе магматических тел.

Все это вместе взятое заставляет с полной определенностью высказаться за целесообразность построения «главной», «рабочей» классификации магматических формаций на петрохимической основе. Такая классификация в свою очередь будет способствовать строго количественной типизации крупных блоков земной коры и повышению надежности прогнозно-металлогенических построений.

Соображения, подобные рассмотренным, давно уже приводили к попыткам построить петрохимическую классификацию пород и их ассоциаций (серий пород). В последнее время в печати вполне конструктивно обсуждается проблема классификации магматических формаций. Принципиальное значение имеет статья Н. Л. Добрецова [6], в которой автор наметил главные стадии построения петрохимической классификации. Н. Л. Добрецов резонно отмечает, что исторически сначала создаются классификации, которые представляют собой результат эмпирического обобщения. В дальнейшем, однако, становится возможным создание классификаций, которые оказываются следствием динамической модели (совокупности моделей) петрогенетических процессов; по существу, это общий путь математизации геологического знания, построения теоретических основ науки.

Рассмотрим более внимательно некоторые вопросы, относящиеся к созданию классификации первого этапа, т. е. к задаче синтезирования эмпирического материала. Очевидно, что этот чисто индуктивный путь, связанный с группировкой магматических комплексов (конкретных формаций), может иметь лишь вспомогательное значение. Это объясняется сильной зависимостью результатов классификации не только от набора учитываемых признаков, но и от используемого алгоритма группирования (задания метрики, выбора критерия объединения и т. п.). Существенно также, что при этом упорядочивается только выборочная совокупность объектов и каждый дополнительный магматический комплекс может заметно изменить схему. Иначе говоря, процедура любой модификации кластерного анализа не обеспечивает теоретически полной группы классифицируемых объектов.

Всех этих недостатков лишена дедуктивная классификация. Перспективы ее построения заслуживают пристального внимания. По-видимому, дедуктивная классификация получится достаточно сложной, непременно иерархической, с общим числом основных подразделений не менее двухсот (напомним, что на карте магматических формаций СССР, составленной во ВСЕГЕИ [15], было выделено более 50 формационных типов). Понятно, что для решения некоторых тектонических задач удобнее пользоваться укрупненными категориями (число их может составить несколько десятков), которые будут приблизительно отвечать формационным типам, ныне выделяемым на минералого-петрографической основе. При разработке дедуктивной классификации, несомненно, будет учтен опыт предыдущих петрохимических обобщений. Однако уже сейчас ясно, что далеко не весь накопленный опыт равноценен в этом отношении. Региональные петрохимические обобщения поставляют ценные сведения о пределах вариации состава ассоциаций пород, но опыт региональных классификационных построений практически бесполезен для конструирования глобальной схемы.

Много полезного можно извлечь из разработок петрохимических классификаций пород, особенно тех, которые учитывают тонкие различия между породами. Еще более важен опыт классификации серий пород. В этом отношении крайне интересными представляются результаты, полученные Э. П. Изухом [7, 8], В. С. Соболевым и В. В. Кенезинским [14], В. Бернататом [16] и некоторыми другими исследователями.

До сих пор не было попыток классифицировать формации с учетом их разнообразия в глобальном масштабе. Имеющийся опыт ограничен, как уже отмечалось, региональными схемами. Классификация «чистых формаций» Н. Л. Добрецова [6] во многих отношениях представляет значительный интерес, однако это также, по существу, классификация не формаций, а породных групп, в понимании А. Ф. Белоусова [1].

Принципиальное значение имеет подход к выбору границ формационных подразделений. Ю. А. Кузнецов [9] в своей весьма содержательной программной статье, несомненно, учитывая результаты многолетней дискуссии по этому поводу [3, 5 и др.], справедливо подчеркивает неизбежную условность и искусственность границ. Однако далее он отмечает, что эти условные границы должны быть проведены по возможности так, чтобы они не «резали по живому» природные ассоциации. Это, на первый взгляд, весьма скромное дополнительное условие, к сожалению, едва ли выполнимо. Оно продиктовано уверенностью в существовании неких устойчивых статистических минимумов в пространстве учитываемых признаков. В связи с этим можно отметить следующее.

Представление о дискретности типов пород и их ассоциаций даже в сознании убежденных сторонников модельно-целевого подхода необычайно живуче. Оно питается всем опытом работ на региональном уровне, когда действительно имеет смысл говорить об «естественных границах магматических комплексов», «очаговых ареалах» [13], «породных группах» [1], «естественной границе между андезитами и базальтами» [4] и других подобных категориях. Не случайно поэтому многие петрографы до сих пор убеждены в том, что «должны существовать некоторые специфические механизмы генерации магмы ... широко распространенных типов» [12]. Понятно также стремление распространить вполне успешный опыт систематики формаций в региональном масштабе на обобщения планетарного уровня. Однако на этом пути возникают трудности, имеющие принципиальный характер, поскольку мы сталкиваемся с качественно иной ситуацией.

При глобальных обобщениях на первый план выступают латеральные и возрастные вариации состава магматических комплексов. Характер и масштабы этих вариаций порождают такие различия между комплексами, которые могут трактоваться и действительно трактуются как различия формационные. Таким образом, формационную специфику магматических образований,

если не вкладывать сюда генетических представлений, приходится рассматривать как результат суммарного влияния указанных вариаций. Пространственно-временные вариации состава магматических комплексов приводят к тому, что мы можем наблюдать все постепенные переходы буквально между всеми формационными типами. Иначе говоря, приходится считаться с тем, что перед нами не многократно повторяющийся конечный набор типов магматических ассоциаций, а непрерывное поле составов, своего рода петрохимический континуум. Учет этого обстоятельства важен не только для систематики магматических ассоциаций, но и для методики изучения природы этих вариаций, а также в чисто прикладном металлогеническом аспекте. Он важен и для понимания причин ограниченных возможностей современного фациально-формационного анализа, столь эффективного до тех пор, пока задачи диагностики магматических образований ограничиваются региональными рамками.

Петрохимический континуум, безусловно, имеет какую-то внутреннюю структуру, определяемую статистическими экстремумами распространенности. Надежные сведения об этой структуре, если иметь в виду не типы пород, а их ассоциации, чрезвычайно скудны. Есть, однако, основание полагать, что те немногочисленные глобальные экстремумы, существование которых может считаться доказанным, выражены нерезко, подобно минимуму на кривой Ричардсона и Снизби [17]. На этой кривой, как известно, четко фиксируется минимум, приходящийся на породы типа диорита и дацита. Разумеется, что это обстоятельство ни в коей мере не облегчает решения вопроса о границах, так как породы в пределах минимума должны найти свое место в классификации. В частности, и диориты и дациты, хотя и более редки, чем граниты и базальты, но все-таки достаточно обычны; более того, они определяют облик некоторых магматических ассоциаций.

Минимумы, разделяющие породные группы в магматических комплексах (конкретных формациях), нередко выражены весьма отчетливо, однако их положение неустойчиво. Можно привести множество примеров постепенного дрейфа статистического минимума, в соответствии с чем столь же постепенно меняется тип ассоциации. Эмпирические распределения современных вулканических пород из разных ареалов Тихоокеанского кольца в зависимости от содержания кремнезема (рис. 10.1) показывают, что «естественная» граница между базальтовым и андезитовым вулканизмом не имеет фиксированного положения на оси абсцисс. Можно представить аналогичные данные, характеризующие колебания щелочности габбро-гранитовых серий, титанистости базальтов, железистости гипербазитов и т. д.

Крайне заманчиво воспользоваться теоретическими границами, доставляемыми физико-химическим моделированием петрогенетических процессов, подобными тем, что намечены в работе В. С. Соболева и В. В. Кепежинская [14]. Однако, как отмечают

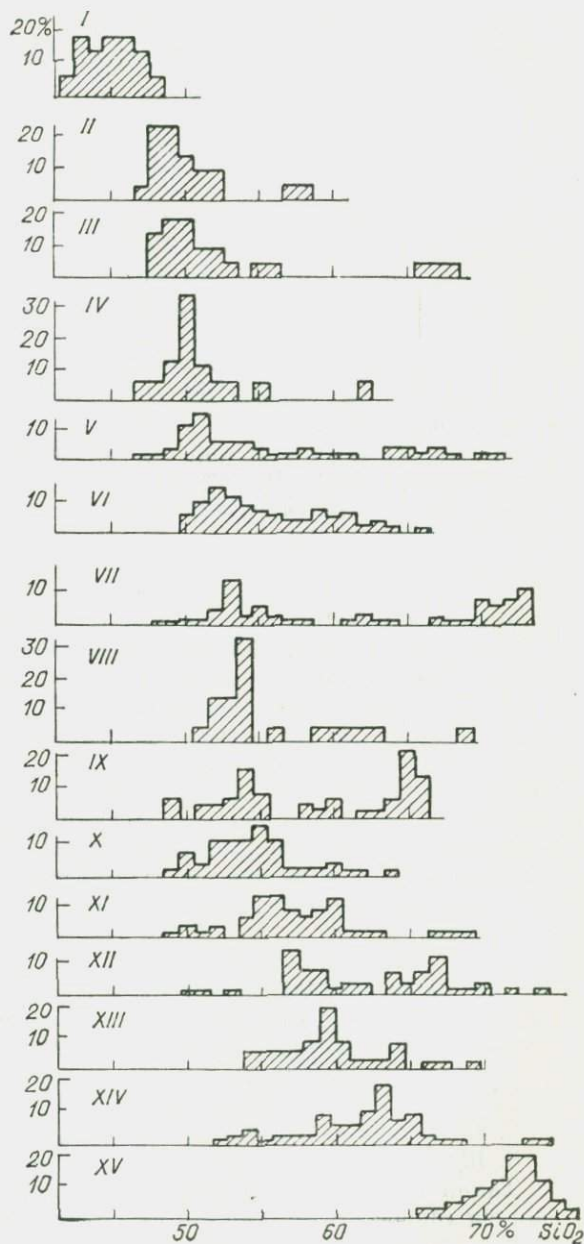


Рис. 10.1. Гистограммы распределения пород по содержанию кремнезема в вулcano-тектонических структурах Тихоокеанского кольца.

I — Окленд, Новая Зеландия (учетных анализов 15); II — Фиджи (20); III — Кермадек (31); IV — Новые Гебриды (155); V — Хаконе, Хонсю (52); VI — Центральная Камчатская депрессия (202); VII — Ньюберри, Каскадные горы (73); VIII — Пуна, Северо-Западная Аргентина (20); IX — Тонга (56); X — Центральная Ява (48); XI — плато Манагале, Новая Гвинея (43); XII — Южный Кюсю (39); XIII — Рюкю (77); XIV — Мехико-Вали (70); XV — Таупо, Новая Зеландия (71).

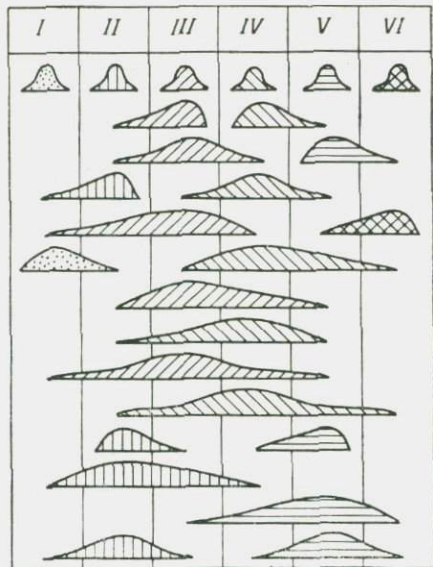


Рис. 10.2. Группы магматических формаций, выделяемые по основности — кислотности.

I — ультраосновные (< 45% SiO₂);
II — основные (45—55%); *III* — средние (56—61%); *IV* — умеренно кислые (62—67%); *V* — кислые (68—75%);
VI — ультракислые (> 75%).

авторы этой работы, естественные (теоретические) барьеры никак не фиксируются на эмпирическом уровне: магмообразование имеет место в достаточно широком диапазоне условий — на больших, малых глубинах и в промежуточных очагах.

Таким образом, не онтологические, а гносеологические соображения, вероятно, будут определяющими в выборе количества и положения границ в глобальной классификации. По этой же причине и традиционное требование — выделять в качестве формаций «устойчиво повторяющиеся ассоциации», может не приниматься во внимание как заведомо невыполнимое: любая единожды выделенная ассоциация оказывается неоднократно повторяющейся.

Далее возникает вопрос, какие именно признаки и в каком порядке должны быть положены в основу классификации. Представляется, что для выделения основных таксономических единиц (формационных видов) достаточно три характеристики (три набора признаков).

1. Фациально-морфологическая.
2. Основность — кислотность ассоциации.
3. Щелочность входящих в ассоциацию пород.

Такой перечень и порядок характеристик отвечают уже устоявшемуся «среднестатистическому» мнению петрографов.

По фациально-морфологическому признаку отделяются ассоциации вулканические от плутонических. Необходимость учета более дробных градаций глубинности [6, 10] в данной ситуации

представляется спорной. Заметим, что использовать в классификации подобные генетические понятия допустимо и оправданно, поскольку в указанном смысле фаціальность может быть однозначно установлена в результате непосредственных геологических наблюдений (измерений).

Каждый из классов (вулканический и плутонический) делится на группы в зависимости от характера распределения пород по содержанию кремнезема. Представляется целесообразным учитывать при этом как среднее значение данного признака, так и диапазон его изменения. Полный теоретически мыслимый набор групп формаций показан на рис. 10.2. Отчетливые полимодальные распределения (контрастные формации) в классификации отсутствуют. Их, вероятно, следует рассматривать как сочетания различных групп, к чему в последнее время и склоняются многие петрологи. В представленном на рисунке варианте деления интервалы изменения содержания кремнезема имеют разную длину. Это, безусловно, несколько затруднит статистическую обработку результатов формационного анализа (на что обратил внимание А. Ф. Белоусов [2]). Однако при этом обеспечивается удовлетворительное согласование с общепринятой петрографической терминологией.

Каждая из 26 групп делится на типы в зависимости от содержания и соотношения щелочей. Представляется целесообразным отказаться от традиционного параметра — суммы окислов натрия и калия, поскольку по результатам петрохимических обобщений последних лет со все большей ясностью выявляется принципиально разная петрогенетическая роль калия и натрия. Принимаемая во внимание хорошо известную коррелированность щелоч-

ТАБЛИЦА 10.1

Типы магматических формаций по содержанию щелочей

Na ₂ O, %	K ₂ O, %				
	< 0,5	0,5—1,0	1—2	2—5	> 5
< 0,5					
0,5—1,0					
1—2	=====				
2—5	=====	=====			
> 5	=====	=====	=====		

Примечание. Вертикальной штриховкой показаны существенно калиевые типы формаций, горизонтальной — натровые; не заштрихованы промежуточные (кали-натровые).

ности различных пород, входящих в формацию, по-видимому, разумно ограничиться характеристикой щелочности доминирующей разновидности пород, т. е. той разновидности, которая определяет группу формаций. Если весь диапазон концентрации окислов натрия и калия разбить на пять градаций, то получим для каждой группы теоретически полный набор, состоящий из 25 типов формаций (табл. 10.1).

Всего при учете трех рассмотренных наборов признаков в общей сложности выделяется $2 \times 26 \times 25 = 1300$ формационных типов. После исключения пустых классов для практического использования, вероятно, останется 200—300 типов. Заметим, что задача определения пустых классов представляет самостоятельный интерес, так как при этом появится возможность предсказать существование некоторых ранее неизвестных типов и, кроме того, получить исходный материал для последующего уточнения природы контуров петрохимического континуума.

ТЕКТОНИКА И ГЕОФИЗИКА

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕКТОНИКИ

Ярко выраженной особенностью развития современной геологии является стремление к синтезу различных ее частей, еще недавно почти независимых друг от друга. Такие разделы геологии, как геотектоника и экспериментальная петрология, геохронология и палеомагнитные исследования, геоморфология и металлогения, представляющие собой самостоятельные, хотя и смежные, дисциплины, за последние 10—15 лет оказались особенно тесно взаимосвязанными, и именно на стыке этих дисциплин были сделаны выдающиеся научные открытия. Воссоединение, взаимное обогащение и осмысление разрозненных преимущественно описательных направлений геологических исследований позволило геологам вплотную подойти к созданию основ единой теории строения и развития Земли.

Одной из причин совершающегося революционного переворота в геологических знаниях является резкое расширение объекта геологических исследований. Если четверть века назад геология имела дело почти исключительно с веществом и структурой приповерхностных участков материковой и островной суши, то последние годы характерны интенсивным изучением океанов, драгированием и бурением океанического дна, бурным развитием дистанционных, и в частности космических, исследований и съемок поверхности Земли; получены также богатейшие новые данные о строении поверхности Луны, Марса, Меркурия и доставлены на Землю образцы лунных пород. Одновременно достигнуты большие успехи в экспериментальных исследованиях физико-химических условий образования глубинных минеральных ассоциаций, проведены обширные работы по изучению глубинного строения земной коры и мантии. Большое значение имеет внедрение в геологию математических методов исследования, неизбежно ведущих к перестройке ее методологической базы, к принятию системного подхода и гомоморфизма при изучении геологических явлений.

Геотектоника — наука о структуре и развитии литосферы в связи с развитием Земли в целом [23, 43] — занимает центральное положение в кругу геологических дисциплин, связывает многие из них между собой, поскольку все главнейшие события геологической истории так или иначе связаны с развитием тектонических движений. Обобщающие геотектонические концепции представляют собой теоретическую основу геологии на каждом последовательном этапе ее развития. На современном этапе такую роль играет концепция новой глобальной тектоники [25], рассматривающая формирование и развитие земной коры и слага-

ющих ее формаций как результат последовательной и непрерывной дифференциации протопланетного вещества Земли, которая приводит к конвекции мантийного вещества, отражающейся в жесткой приповерхностной литосфере Земли в виде медленно, но непрерывно происходящих перемещений блоков литосферы — литосферных плит. Границы современных литосферных плит четко фиксируются на картах сейсмичности по распределению очагов землетрясений.

Каждая плита или блок литосферы имеет тыловую и фронтальную части; тылы литосферных плит (зоны растяжения) маркируют положение восходящих ветвей мантийной конвекции, а фронтальные части (зоны сжатия и субдукции) — положение нисходящих ветвей конвективных ячеек. В самом обобщенном виде зоны растяжения и сжатия образуют четыре сопряженные планетарные системы протяженностью по 25—30 тыс. км каждая, закономерно ориентированные по отношению к оси вращения Земли; это две системы зон субдукции и сопряженных с ними трансформных сдвигов (Средиземноморско-Индонезийско-Кермадекская и Японо-Алеутско-Ангийская) и две системы океанических рифтовых зон и хребтов (Арктическо-Атлантическо-Западно-Индийская и Индийско-Антарктическо-Восточно-Тихоокеанская) (рис. 11.1). Эти системы зеркально симметричны, взаимосвязаны и отражают ориентировку двух гигантских ячеек конвекции вещества мантии Земли [39, 41, 52].

Основой современного объяснения процессов формирования и развития земной коры (внешней алюмосиликатной оболочки Земли, слагающей верхнюю часть литосферы) является представление о нескольких последовательных этапах корообразования.

1. Последовательное формирование первичной океанической коры и литосферы над восходящими ветвями мантийной конвекции в зонах срединно-океанических хребтов.

2. Растекание (спрединг) океанической литосферы и перемещение новообразований океанической коры от тыловых частей литосферных плит к фронтальным.

3. Поглощение океанической коры в зонах субдукции (зонах Беньофа) и формирование вторичной, более дифференцированной и более сложно построенной коры континентального типа над этими сейсмофокальными зонами (рис. 11.2). Здесь формируются очаги андезитовых и гранитоидных магм, геохимические особенности которых находятся в тесной связи с глубиной расположения сейсмофокальных зон. С увеличением глубины этих зон возрастает общая щелочность магм в очагах над ними и особенно резко повышается содержание калия, рубидия, стронция [67, 78, 86].

Представление о переносе вещества океанической коры от срединно-океанических хребтов к зонам субдукции и о накоплении дифференциатов этого вещества в континентальной коре, формирующейся над зонами субдукции, впервые позволяет удовлетворительно объяснить общий геохимический баланс вещества внешних

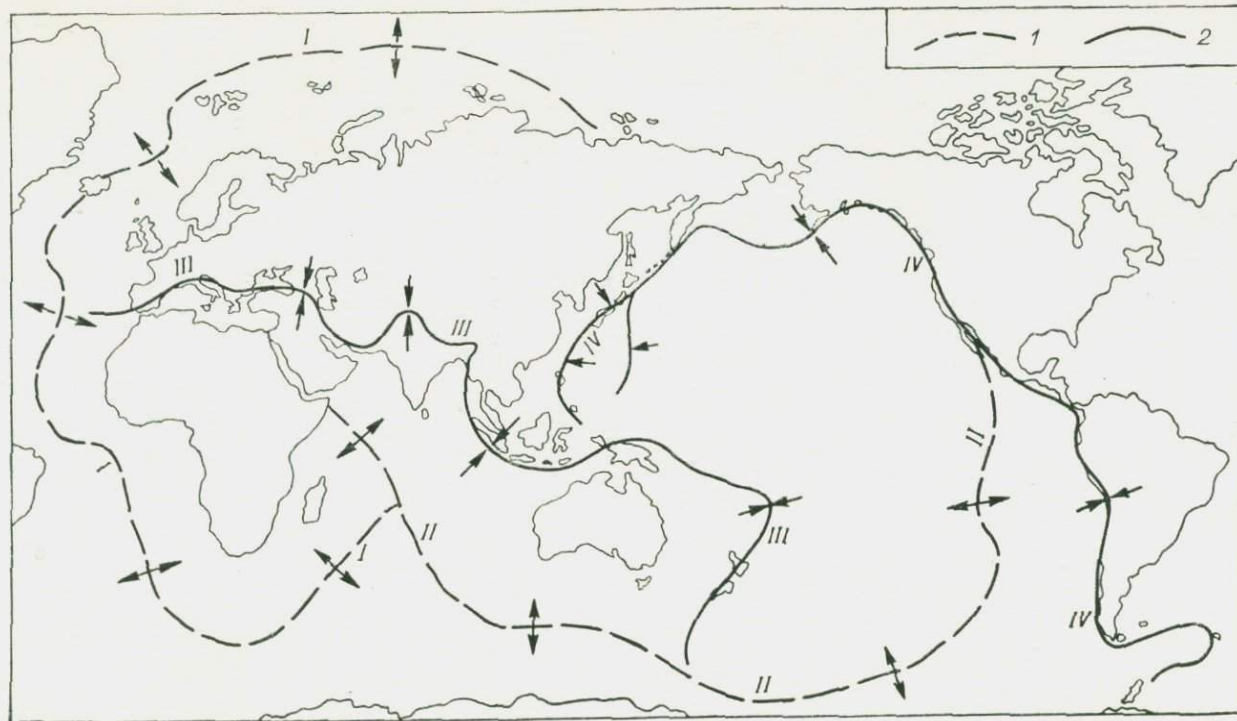


Рис. 11.1. Планетарные системы зон растяжения и сжатия, ограничивающие главнейшие литосферные плиты Земли.

1 — системы океанических рифтовых зон и срединно-океанических хребтов (I — Арктическо-Атлантическо-Западно-Индийская, II — Индийско-Антарктическо-Восточно-Тихоокеанская); 2 — системы зон субдукции и сопряженных с ними трансформных сдвигов (III — Средиземноморско-Индонезийско-Кермадекская, IV — Японо-Алеутско-Андийская).

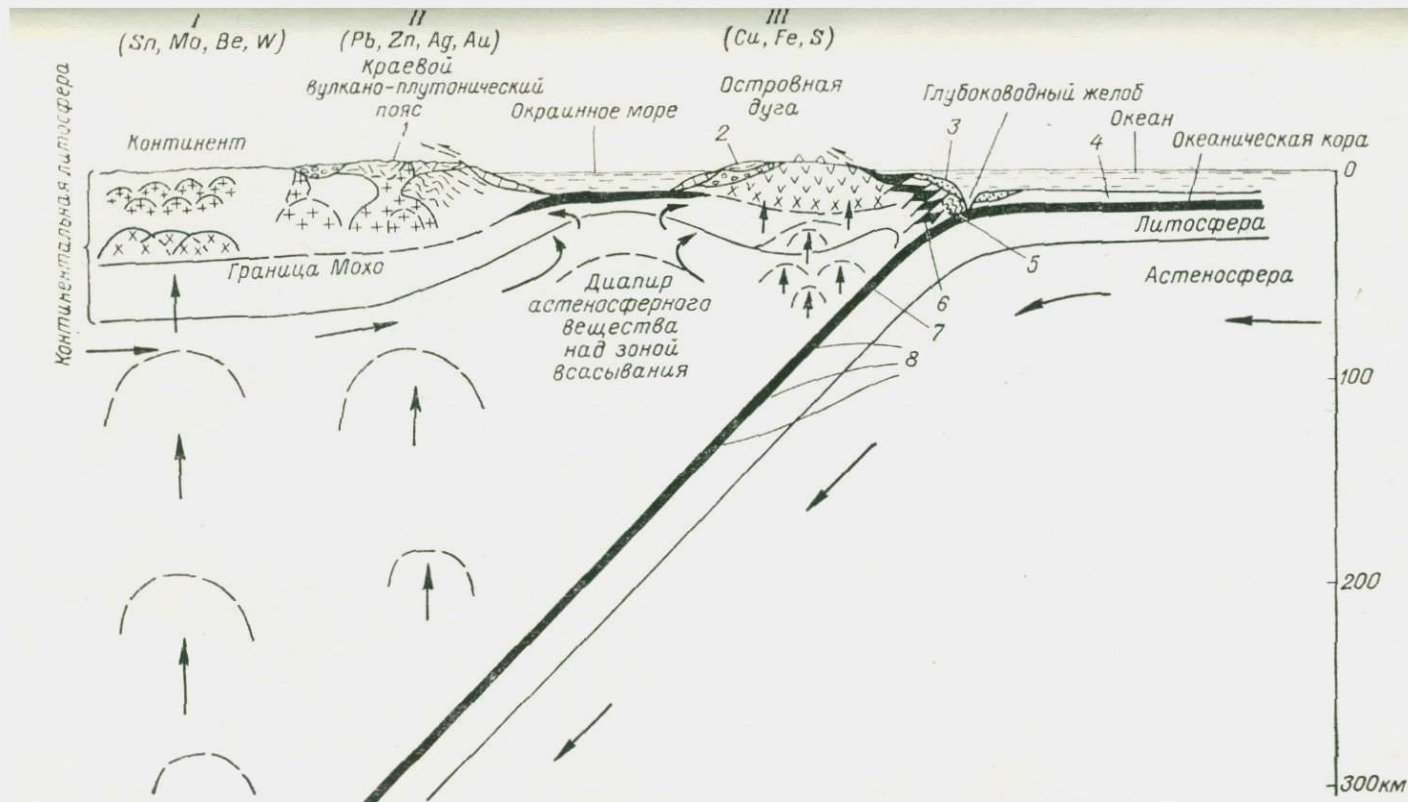


Рис. 11.2. Схематический обобщенный разрез зоны субдукции западно-тихоокеанского типа.

Зоны: I — оловоносных гранитоидов и щелочных массивов, II — риолитовая, III — андезитовая.

1 — субсеquentные вулканы; 2 — паралические угли, флиш, моласса; 3 — флиш, олигострома; 4 — океанические осадки; 5 — серпентинитовый меланж; 6 — динамометаморфические сланцы; 7 — амфиболиты; 8 — эклогиты.

Горизонтальный масштаб равен вертикальному.

оболочек Земли. Исследованиями последних лет установлена комплементарность составов базальтов и гипербазитов в срединно-океанических хребтах. Эти породы рассматриваются соответственно как вещество формирующейся океанической коры и «рестит» нижней части океанической литосферы [4, 11, 12, 75] — тугоплавкий остаточный дунит-гардбургитовый слоистый комплекс, образующийся в процессе выплавки базальтовых магм из мантийного астеносферного вещества.

Такой комплементарности нет между породами континентальной коры и подстилающей ее мантии, вещество которой выносятся в верхние горизонты коры в виде ксенолитов в трубках взрыва [19, 36]. Более того, содержания многих элементов (калий, рубидий, цезий, уран, торий) в континентальной коре настолько велики по сравнению с их содержаниями в мантии, что если исходить из классических фиксистских представлений о поступлении их в земную кору снизу вверх, не допуская конвекции мантийного вещества, перемещения и субдукции океанической коры (промежуточного «полуфабриката» сиалической оболочки), то всего объема мантии под континентами оказывается недостаточно для достижений наблюдаемой в континентальной коре концентрации перечисленных элементов. Это обстоятельство является важным доводом в пользу мобилизма и против любых вариантов фиксистских геотектонических концепций и теории расширяющейся Земли.

РЯД ГЛУБИННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ВЕЩЕСТВА ЗЕМЛИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Обобщение и сравнение накопленных аналитических данных позволяет установить закономерную выдержанность состава пород каждого из главнейших формационных комплексов, слагающих внешние оболочки Земли. Региональные отклонения от среднего состава, как правило, оказываются второстепенными. Эти комплексы составляют: 1) включения шпинелевых и гранатовых перидотитов в кимберлитах и базальтах океанических и рифтовых областей, рассматриваемые большинством исследователей [19, 57, 72, 76] как образцы мантийного вещества; 2) базальты срединно-океанических хребтов [24, 32, 44, 47, 75]; 3) андезитобазальтовые формации островных дуг [32, 40, 67, 80, 86]; 4) кислые вулканыты и гранитоиды краевых вулкано-плутонических поясов континентов [9, 32, 38, 96]. По своему химическому составу перечисленные комплексы образуют единый последовательный ряд с одинаковым поведением в нем большинства химических элементов — обогащением пород одними элементами и обеднением другими (рис. 11.3, 11.4).

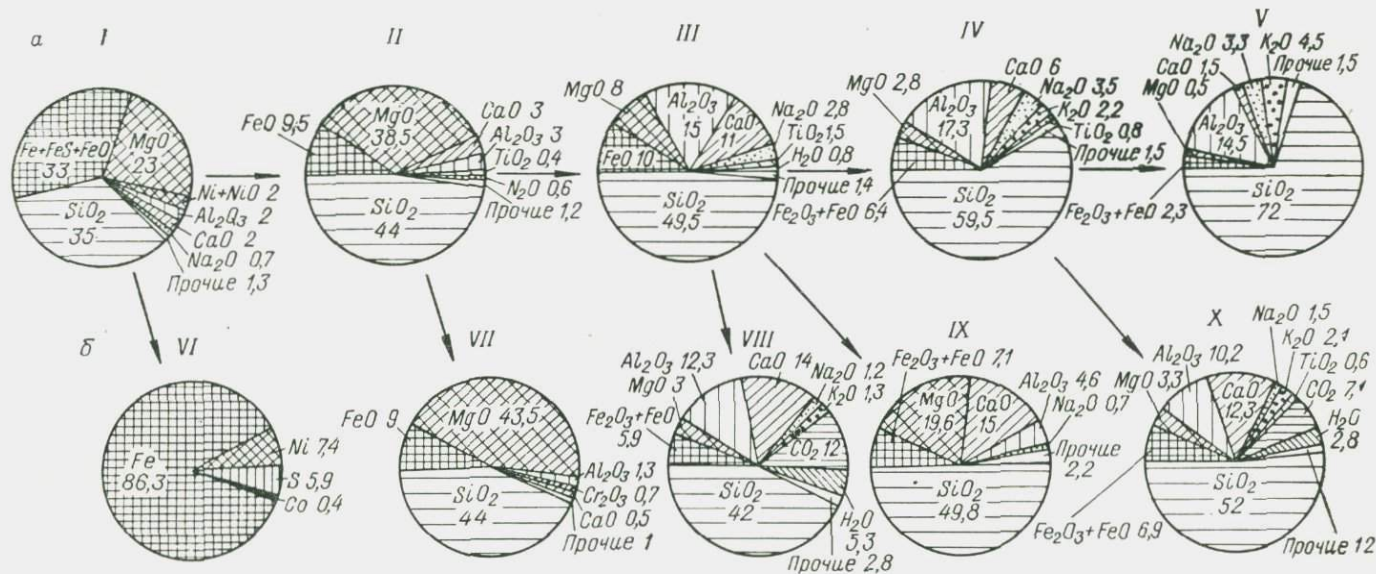


Рис. 11.3. Геохимическая направленность процессов дифференциации вещества Земли.

a — основной ряд глубинной дифференциации; *б* — остаточные и смешанные формационные комплексы. Вещество: I — протопланетное (хондриты), II — астеносферы (лецилитовые нодулы), III — первичной океанической коры (толеитовые базальты срединно-океанических хребтов), IV, V — континентальной коры [IV — первый этап формирования (андезиты островных дуг), V — второй этап (граниты и липариты краевых вулканно-плутонических поясов континентов)], VI — ядра Земли, VII — нижней части океанической литосферы (рестит), VIII — осадков океана, IX — нижней части континентальной коры, X — осадков континентов. Состав пород дан в весовых процентах [3, 4, 11, 12, 20, 36, 38, 67, 75, 76, 79, 80, 98].

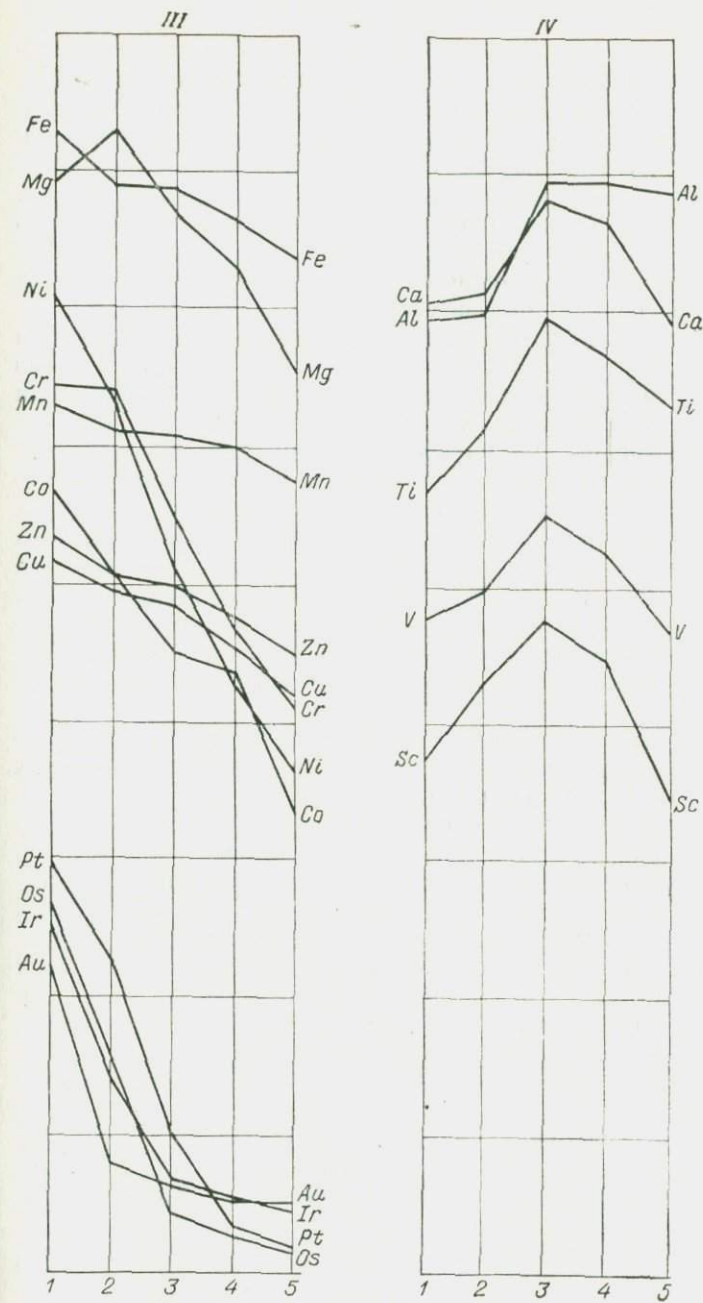
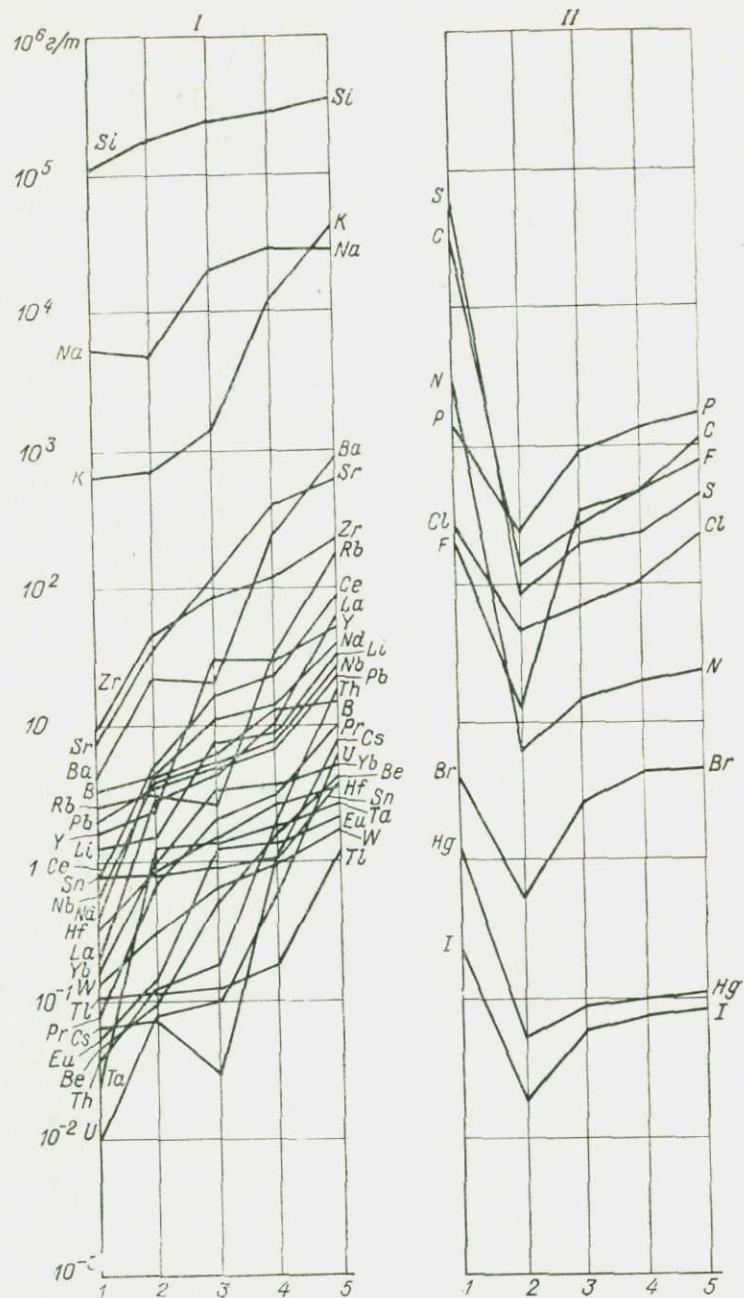


Рис. 11.4. Последовательность изменения содержания элементов в ряду
 Группы элементов: I — центробежных, II — центробежных летучих, III — центро-
 Цифры на оси абсцисс: 1 — углистые хондриты (содержание элементов по работам [20, 79,
 3 — базальты срединно-океанических хребтов [24, 32, 44, 47, 75], 4 — андезиты островных

глубинной дифференциации вещества Земли.

стремительных, IV — океанических.
 2 — нодулы гранатовых перидотитов в базальтах и нимберлитах [1, 19, 57, 72, 76, 93],
 дуг [32, 40, 67, 80, 96], 5 — бедные кальцием гранитоиды [9, 32, 38, 96].

В левой части ряда помещены хондриты, представляющие собой, по мнению большинства геохимиков и геологов [20, 21, 97], вероятные аналоги протопланетного вещества Земли. Направленность в изменении химического состава пород рассматриваемого ряда показывает, что эти породы являются продуктами последовательных этапов дифференциации исходного вещества Земли. Дифференциация и в настоящее время продолжает наращивать кору и ядро Земли и служит главнейшим двигателем тектонических процессов. Сам ряд можно назвать поэтому основным рядом глубинной дифференциации вещества Земли.

Важнейшим результатом внутримантийной дифференциации вещества является отделение металлической и сульфидной фаз от силикатной и постепенная концентрация железа и никеля в ядре с одновременным повышением магнезиальности верхней мантии. Именно этот процесс определяет, по-видимому, постоянное существование в мантии конвективных ячеек, восходящие и нисходящие ветви которых маркируются в верхних оболочках Земли рифтовыми зонами и зонами субдукции. Над восходящими ветвями происходит селективное плавление мантийного вещества и формирование океанической коры. Над нисходящими ветвями в результате переработки и дифференциации вещества как эклогитизированных блоков океанической коры, затягиваемых на глубину, так и мантии, образуется континентальная кора (см. рис. 11.2).

В ряду глубинной дифференциации земного вещества химические элементы ведут себя по-разному, в соответствии с чем их можно разделить на четыре группы (рис. 11.4 и 11.5).

К первой группе — группе центробежных элементов (термин Ю. Г. Щербакова) — относится почти половина элементов периодической системы. Эти элементы последовательно накапливаются и увеличивают свое содержание в породах на всех этапах процесса дифференциации. При этом концентрация калия, рубидия, цезия, стронция, бария, бериллия, ниобия и редкоземельных элементов возрастает на два порядка; урана и тория — на три порядка; лития и циркония — в 50 раз; натрия, бора, вольфрама, гафния, олова — приблизительно на один порядок. К этой же группе относится и кремний, содержание которого увеличивается почти в 3 раза.

Вторая группа объединяет летучие центробежные элементы, содержание которых в верхней мантии много ниже, чем в хондритах. Для них характерно монотонное накопление в породах океанической и особенно континентальной коры. Сюда относятся углерод, азот, фтор, хлор, бром, иод, сера, ртуть, фосфор, селен, теллур.

Для третьей группы — центростремительных элементов (термин Ю. Г. Щербакова) — характерно снижение их концентрации в последовательных продуктах дифференциации вещества Земли. В эту группу входят железо, никель, кобальт, хром, магний, медь,

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII					
1	(H)							H	He				
2	Li	Be	B	C	N	O	F		Ne				
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl		Ar				
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni			
	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br			Kr			
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd			
	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I			Xe			
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt			
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At			Rn			
7	Fr	Ra	Ac**	Ku									
* Лантаноиды													
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
** Актиноиды													
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	(No)	(Lr)

Рис. 11.5. Классификация химических элементов по их поведению в ряду глубинной дифференциации вещества Земли.

1 — центробежные; 2 — центробежные летучие; 3 — центростремительные; 4 — океанические.

цинк, марганец, платина, осмий, иридий, рений, рутений, родий, палладий, серебро, золото. Особенно заметно уменьшается содержание в породах никеля (в 2000 раз); содержание платины и хрома снижается в 300—500 раз; магния, кобальта, осмия, иридия, золота — на два порядка; железа, меди, цинка, марганца — на один порядок.

Входящие в четвертую группу «океанические» элементы в процессе дифференциации ведут себя не однонаправленно: они последовательно накапливаются в мантии и океанической коре, но в породах континентальной коры их содержание значительно уменьшается. К этой группе относятся титан, кальций, скандий, ванадий и алюминий. Содержание титана и кальция возрастает в породах океанической коры более чем на порядок по сравнению с содержанием в хондритах, а затем уменьшается в 5 раз в породах континентальной коры; содержание скандия и ванадия увеличивается в океанической коре соответственно в 8 и 4 раза, а затем уменьшается в континентальной коре в 10 и 8 раз; содержание алюминия сначала вырастает более чем в 10 раз, а затем незначительно сокращается.

Чем объясняется такое поведение элементов? Можно заметить, что большинство s- и f-элементов попадает в группу центробежных, а ряд d-элементов — в группу центростремительных. Однако в последнюю группу входит и магний (s-элемент), а такие d-элементы, как гафний, тантал, вольфрам, попадают в группу центробежных. Большинство сидерофилов и некоторые халькофилы относятся к третьей группе. В первую группу входят многие литофильные элементы, но наряду с ними и такие типичные халькофилы, как свинец, висмут и таллий. Поведение элементов в ряду глубинной дифференциации является, по-видимому, суммарной функцией их потенциалов ионизации и атомных объемов: чем больше потенциал ионизации и чем меньше атомный объем, тем полнее вытесняется такой элемент из внешних оболочек Земли; максимальную же концентрацию в континентальной коре имеют элементы с минимальными потенциалами и максимальными объемами. Это дает основание полагать, что энергетические характеристики ионов и электромагнитные силы оказывают на процесс дифференциации вещества Земли существенное влияние, которое иногда недоучитывается существующими геотектоническими и петрологическими концепциями.

Поведение элементов в ряду глубинной дифференциации дает возможность по результатам химических анализов горных пород и геологических формаций выявлять их генезис и условия образования. Примеры использования такой методики при тектонических исследованиях уже имеются в геологической литературе [65, 88—90]. Успешно применяется, в частности, разработанная Дж. Пирсом и Дж. Канном методика разделения базальтовых формаций океанического, островодужного, окраинно- и внутри-материкового происхождения (сложно дислоцированных и перемешанных в орогенических областях) по содержанию в вулканитах титана, циркония, иттрия, хрома и других элементов*. Еще большее значение имеет региональное изучение зональных изменений содержания калия, рубидия, цезия, стронция, бария в вулканических и плутонических формациях. Такая зональность позволяет определять вероятное направление наклона зон субдукции геологического прошлого и может быть использована при тектоническом и металлогеническом анализе [14, 15, 17, 35, 50, 61 и др.].

Процесс дифференциации вещества, по-видимому, протекал на протяжении почти всей геологической истории планеты приблизительно с одной и той же скоростью. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что скорость накопления продуктов островного и континентального вулканизма, по многократным подсчетам для последних четырех столетий приблизительно равная

* Дискриминантные функции вычислены Дж. Пирсом и Дж. Канном без учета региональных и возрастных вариаций состава базальтов, что существенно ограничивает их диагностические возможности. — *Прим. ред.*

1 км³ экструзивных образований и лав в год [33], находится в хорошем соответствии с объемом всей континентальной коры, накопленной за геологическую историю Земли (4,5·10⁹ км³ за 4,7·10⁹ лет).

Океаническая кора формируется значительно быстрее, чем континентальная, как по объему (около 4 км³/год), так и по площади. Определение возраста осадков и базальтового ложа мирового океана, а также скорости спрединга, рассчитанной по полосовым магнитным аномалиям, показывает, что сформировавшаяся с конца юрского периода молодая океаническая кора покрывает около половины поверхности Земли (если учесть и площади микроокеанических бассейнов типа окраинных и средиземных морей, образовавшихся за это время над зонами субдукции в процессе вторичного рифтогенеза, то около 55% площади земного шара). Следует иметь в виду, что не менее 20% океанической коры было поглощено в зонах субдукции и приняло участие в формировании орогенов и островных дуг. За время существования Земли на ее поверхности сменялась, по-видимому, целая серия поколений океанов: одновременно с замыканием «старых» океанов идет раскрытие «молодых», а «зрелые» ограничиваются зонами субдукции.

ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ И ПАЛИНСПАСТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

Современные геотектонические концепции заставляют по-новому взглянуть на историю формирования и развития складчатых областей и фундамента континентов Земли, дают объяснение богатейшему фактическому материалу, накопленному за последние десятилетия в процессе детального геологического картирования складчатых поясов. Фундамент континентов предстает перед исследователями как сложно построенный агломерат переработанных аллохтонных пластин, блоков и чешуй, скучивавшихся над зонами субдукции геологического прошлого и прорванных вулканоплутоническими формациями андезитового и гранитоидного рядов — «глубинными пузырями» вещества, поднимавшимися из этих зон. Фундамент состоит из разновозрастных складчатых поясов, чаще всего представляющих собой полосы новообразованной континентальной коры. В пределах складчатых поясов выявляются эвгеосинклинальные зоны, или пакеты аллохтонов, сложенные формациями преимущественно океанического происхождения (формациями островных дуг и их шельфов), и миогеосинклинальные зоны, представленные в основном шельфовыми формациями континентов. Участки континентальной коры (края континентов и срединные массивы внутри складчатых поясов), подтянутые к зоне субдукции, образуют области вулканоплутонической активизации. Шарьяжное строение складчатых областей

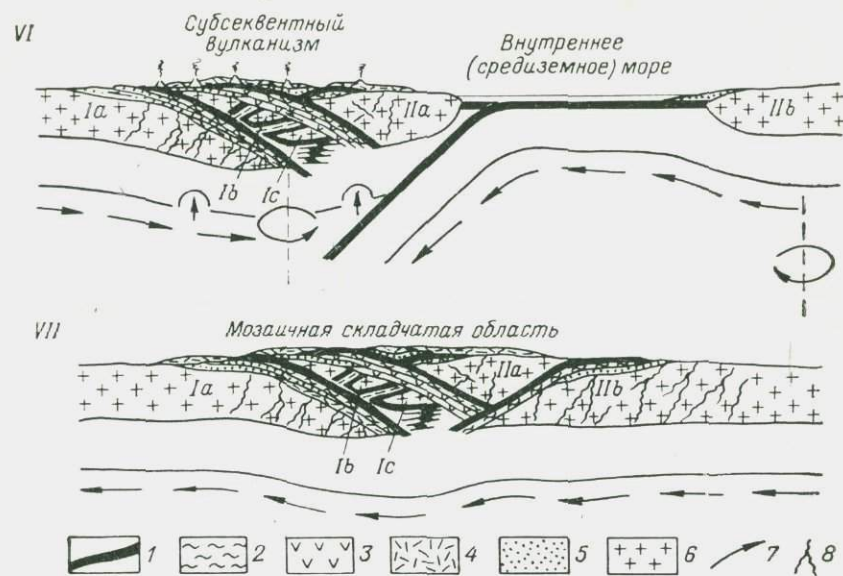
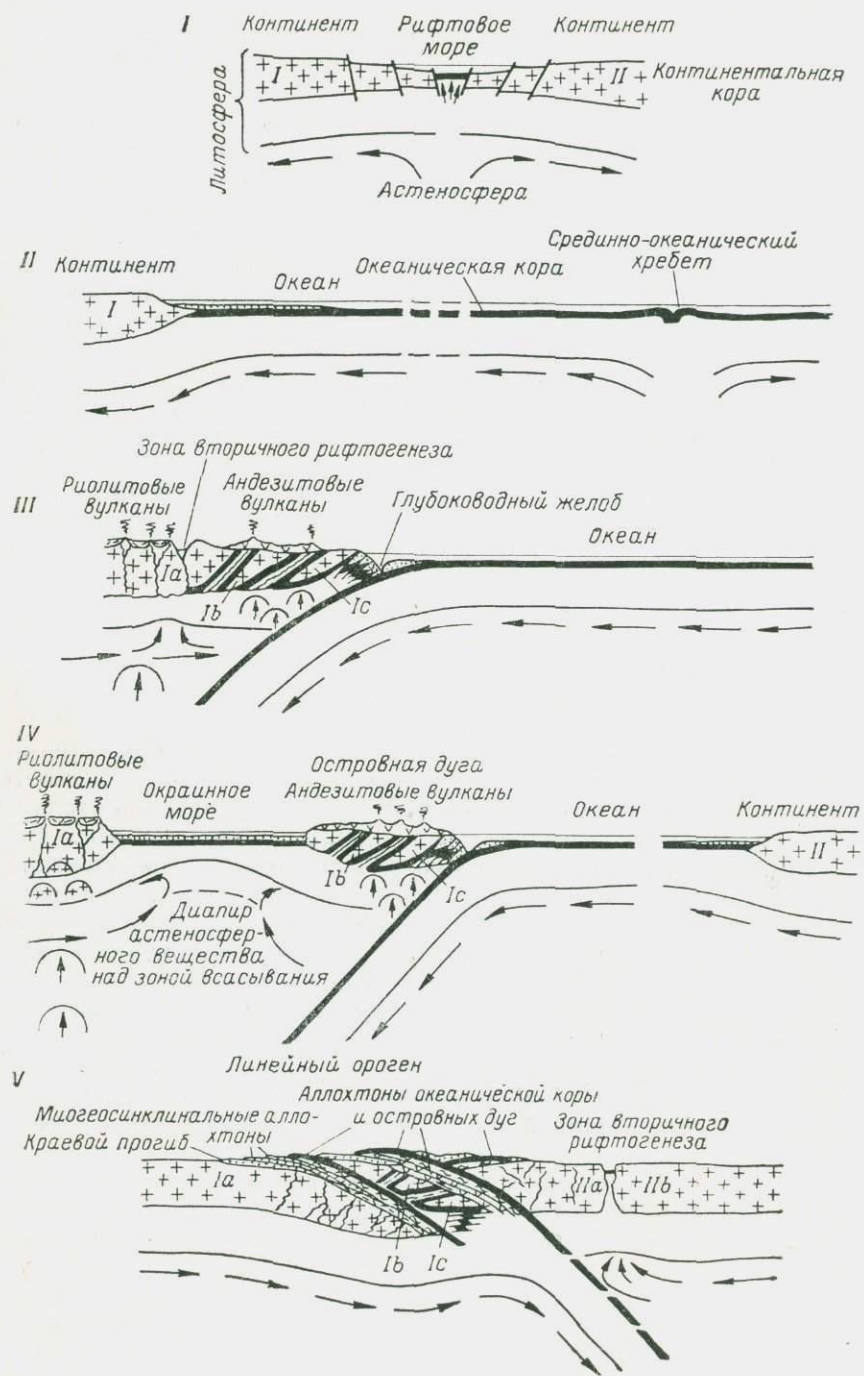


Рис. 11.6. Тектоно-магматический цикл формирования складчатой области.

Первичный рифтогенез: I — раскол континента, разрыв континентальной коры (красноморский этап), II — молодой океан, спрединг, не компенсирующийся субдукцией (атлантический этап); вторичный рифтогенез окраинно-континентального типа: III — зрелый океан, формирование зоны субдукции океанической коры, уходившей под континент, заложение рифтовых зон на краю континента (восточно-тихоокеанский, андийский, этап); IV — островная дуга, раскрытие окраинных морей (микроокеанов), отрыв и отбрасывание в сторону океана краевых частей континента (западно-тихоокеанский, японский, этап); V — линейный ороген, столкновение континентов, замыкание океанов и микроокеанов, формирование орогенических областей, заложение новых внутриконтинентальных рифтовых зон (альпийский этап); VI — вторичный рифтогенез средиземноморского типа, формирование внутренних и средиземных морей, повороты и смещения литосферных блоков в пределах орогенических областей (средиземноморский этап); VII — консолидация складчатой области, замыкание средиземных и внутренних морей, дополнительные сдвиговые и ротационные дислокации, формирование мозаичных складчатых областей. 1 — океаническая кора и аллохтоны океанической коры в складчатых областях; 2 — зоны развития глаукофаносодержащих голубых и зеленых сланцев; 3 — андезитовые вулканы; 4 — субокеанские вулканы; 5 — осадочные отложения; 6 — гранит-метаморфическая континентальная кора; 7 — направление движения вещества астеносферы; 8 — магмопроводящие структуры в земной коре.

на континентах получает логичное объяснение как результат всасывания, выбрасывания (обдукции) и скупивания вещества коры на границах сходящихся литосферных плит.

Восстановление истории развития складчатых областей и проводимые при этом палинастические реконструкции показывают, что над зонами субдукции геологического прошлого происходили не только процессы сжатия и шарьирования, но и процессы растяжения, расширения, рифтогенеза, приводившие к формированию систем окраинных и средиземных морей с корой океанического типа и островных дуг. При этом сначала на краю континента над зоной субдукции формировалась рифтовая зона, где накапливались рифтовые и грабеновые фации; затем происходил разрыв континентальной коры и краевая полоса континента превращалась

в островную дугу, отделяясь от континентальной окраины микроокеаническим бассейном, который образовывался на месте рифтовой зоны в процессе ее расширения (рис. 11.6, этапы III—VI).

Рифтогенез над зонами субдукции во фронтальных частях литосферных плит можно назвать вторичным в отличие от первичного, основного, рифтогенеза над восходящими потоками мантийного вещества в срединно-океанических хребтах, порождающего основную массу океанической коры. Результаты вторичного рифтогенеза — окраинные и средиземные моря (микроокеаны) — отличаются от нормальных океанов быстротой (одноактностью) своего формирования, отсутствием срединных хребтов и постоянного разрастания океанической коры (спрединга), значительно меньшими размерами, структурным положением (между континентом и островной дугой, между двумя островными дугами или в зоне столкновения двух континентов) и относительной недолговечностью (первые десятки, редко 100—150 млн. лет).

Возможной причиной формирования микроокеанических бассейнов является воздымание диапиров мантийного астеносферного вещества над зонами субдукции. Впервые такое объяснение было дано Д. Кэригом [74], который рассмотрел процесс формирования окраинных морей в северо-западной части Тихого океана. Сходные процессы рифтогенеза, разрыва континентальной коры и формирования микроокеанических бассейнов характерны для мезозойской и кайнозойской истории Альпийской складчатой области и современного Средиземноморья, для палеозойской истории варисцид Тянь-Шаня, Урала, Аппалачей. К формациям окраинных морей (микроокеанов) можно отнести, в частности, офиолитовые покровы группы Флер-де-Лис западного Ньюфаундленда, офиолитовые пластины платиноносного пояса Урала, Южно-Гиссарский офиолитовый пояс Средней Азии, раннемеловые комплексы Валлисской зоны Альп.

Рассмотрение геологической истории таких складчатых областей, как Альпийско-Средиземноморская или Тянь-Шаньская, заставляет полагать, что последовательные этапы тектонических движений, приводящих к накоплению слагающих эти области формаций, значительно более сложны, чем простое раскрытие и последующее замыкание океанических бассейнов, сопровождающееся скучиванием пластин океанической коры и шельфовых осадков. Среди главнейших этапов тектоно-магматического мегацикла, приводящего к образованию сложно построенной мозаичной складчатой области (см. рис. 11.6), андийский и западно-тихоокеанский (японский) рассматриваются как два последовательных этапа эволюции зон субдукции на границе континент — океан. Линейные орогены и мозаичные складчатые области, обычно противопоставляемые друг другу, также являются чаще всего последовательными этапами развития континентальной коры и усложнения ее структуры. Современное Средиземноморье находится на переходном этапе от системы линейных орогенов к мо-

заичной складчатой области; в этом регионе сложным образом сочетаются сдвиговые и ротационные движения тектонических блоков, процессы растяжения и рифтогенеза (в Балеарской и Центрально-Средиземноморской зонах) и процессы сжатия и всасывания (в Калабрийской и Критской дугах).

ПОЯСА АЛЬПИНОТИПНЫХ ОФИОЛИТОВ КАК ИНДИКАТОРЫ ЗОН СУБДУКЦИИ ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОШЛОГО

Чрезвычайно важную роль в строении складчатых поясов играют офиолитовые ассоциации горных пород: грубо стратифицированные комплексы гипербазитов, габбро, амфиболитов, параллельных диабазовых даек, спилитов и радиоляритов. Обычно наблюдаются тектонические блоки, чешуи и обрывки этих комплексов, почти всегда участвующие в строении эвгеосинклинальных зон складчатых областей. Удивительное сходство разрезов офиолитовых комплексов с разрезами океанической коры, изученными к настоящему времени по результатам драгирования, бурения и сейсмологии, дало основание многим петрологам и тектонистам рассматривать офиолиты в качестве тектонически перемещенных пластин и блоков океанической коры геологического прошлого. Это представление, обоснованное в работах Г. Хесса [70], А. В. Пейве [26, 27, 29], А. Л. Книшпера [16], Дж. Дьюи и Дж. Берда [62] и других исследователей, получило в настоящее время широкое признание.

Офиолитовые комплексы, как правило, ассоциируют в складчатых областях с зонами глаукофанового и зеленосланцевого метаморфизма. В большинстве случаев наблюдаются совмещенные офиолит-зеленосланцевые пояса, имеющие сложное тектоническое строение. Слагающие их формации, как показывают результаты детального геологического картирования, чаще всего находятся в аллохтонном залегании [5, 6, 28, 30, 31, 49, 53, 62], хотя нередко удается установить положение «корневых» зон, из которых эти формации выжаты. Правильнее поэтому говорить не об офиолит-глаукофановых поясах, а о пакетах тектонических пластин и покровов, в строении которых важнейшую роль играют офиолитовые ассоциации пород и сланцы зон высокого давления, часто глаукофаносодержащие. Глаукофановый метаморфизм связывается с определенными термодинамическими условиями [давление $(8 \div 10) \cdot 10^2$ МПа, температура 200—400° С], возникающими в зонах погружения (субдукции) литосферных плит [13, 63, 64, 83]. Поэтому можно с достаточно большой долей уверенности считать, что корневые зоны, из которых выжаты пакеты пластин с набором офиолитовых формаций и глаукофаносодержащих сланцев, маркируют положение приповерхностных участков зон субдукции

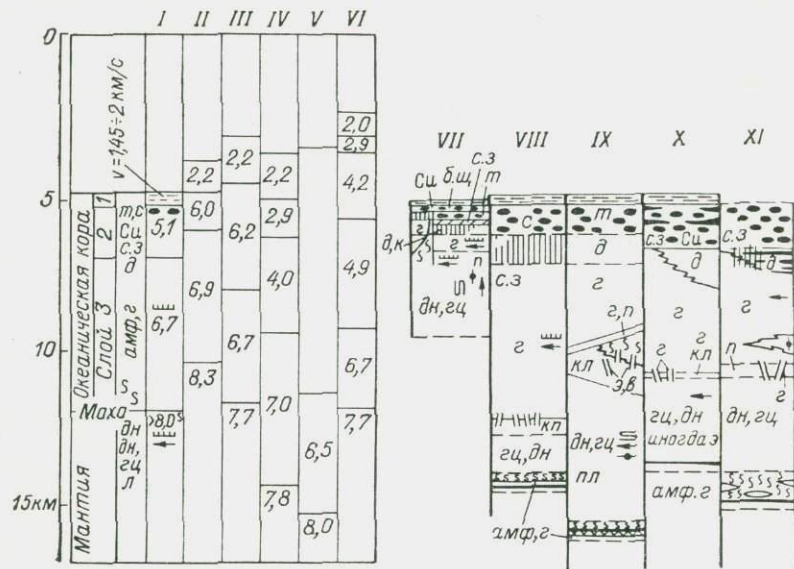
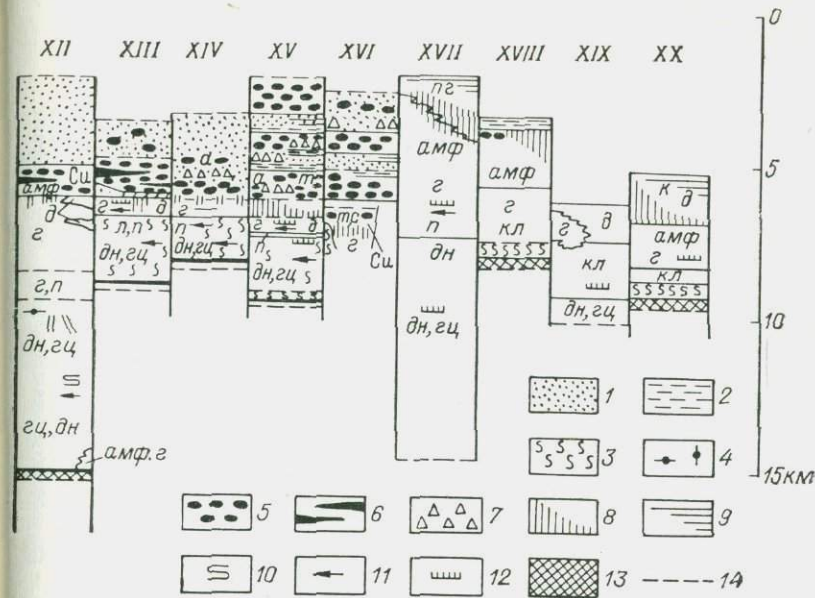


Рис. 11.7. Разрезы океанической коры и верхней мантии (I—VI) и разрезы офиолитовых комплексов (VII—XX) ([62], с уточнениями и дополнениями). I — типовой разрез океанической коры [4, 11, 12, 71, 91]; II — Южно-Фиджийский бассейн VI — Алеарский бассейн [68]; комплексы: VII — Трудос, Кипр [22], VIII — Семайл, утин, Орегон [95], XII — Бей-Айлендс, Ньюфаундленд [99], XIII — Бей-Берт [62], фаундленд [62]; XVII — Войкар-Сыннинский массив, Полярный Урал [30]; комплексы: Увайс [49], XX — ченгельдинский, Тамдытау ([34], с дополнениями). 1 — вулканогенный флиш и туфы; 2 — кремнистые сланцы, аргиллиты, известняки; 3 — 7 — андезиты-базальты; 8 — дайки; 9 — жилы; 10 — изоклиная складчатость; 11 — чешские контакты. а — андезиты; амф — амфиболиты; амф. г — амфиболиты гранатовые; б, ш — базальты риты, кварцевые диориты; дн — дуниты, с. з — сланцы зеленые; к — кварцевые кератогиограниты; с — спилиты; т — толеиты; э — энстатиты; Си — медное оруденение.

прошедших геологических эпох и являются рубцами на месте замкнувшихся океанических и микроокеанических бассейнов.

Сопоставление конкретных разрезов габбро-гипербазитовых и офиолитовых комплексов Урала, Тянь-Шаня, Альп, Аппалачей, Новой Гвинеи, Новой Каледонии и других регионов (рис. 11.7) позволяет воссоздать следующий сводный грубо стратифицированный разрез офиолитовых ассоциаций (снизу вверх): 1) гарцбургиты, в верхних частях с прослоями дунитов; 2) чередование слоев дунитов, перидотитов, пироксенитов с оливин-анортитовыми габбро и анортозитами, иногда широкое развитие клинопироксенитов; 3) пироксеновые габбро; 4) амфиболовые габбро, габбро-амфиболиты и амфиболиты; 5) «дайково-плагиогранитный комплекс» — милонитизированные кварцевые диориты, плагиограниты, альбититы, многочисленные дайки диабазов, спессартитов, кератофиоров; 6) зеленокаменно-измененные спилиты и диабазы с прослоями и линзами кремней, кварцитов и известняков.

Разрезы офиолитовых ассоциаций Урало-Монгольского пояса, Тетиса и Тихоокеанского пояса, имея большое сходство с раз-



резами океанической коры, отличаются от них, во-первых, присутствием дунитов и клинопироксенитов (в срединно-океанических хребтах эти породы отсутствуют или развиты чрезвычайно слабо [12]) и, во-вторых, значительно более широким распространением дайково-плагиогранитных комплексов, приуроченных к верхним частям офиолитовых разрезов. Это показывает, что процессы выброса океанической коры на континент или засасывания ее под континент сопровождаются дальнейшей дифференциацией вещества океанической коры и верхней мантии. Сопоставляя разрезы офиолитовых пластин, можно наблюдать разные стадии этого процесса, в частности стадии зарождения вещества плагиогранитных магм внутри офиолитовых разрезов. Характерно широкое развитие диоритов и плагиогранитов в разрезах офиолитов Греции и Новой Гвинеи, Ньюфаундленда, Урала и Тянь-Шаня (см. рис. 11.7, разрезы IX—XX).

Строение офиолитовых аллохтонов и слагаемых ими структур можно проследить на примере Кызылкумо-Алайских варисцид (рис. 11.8).

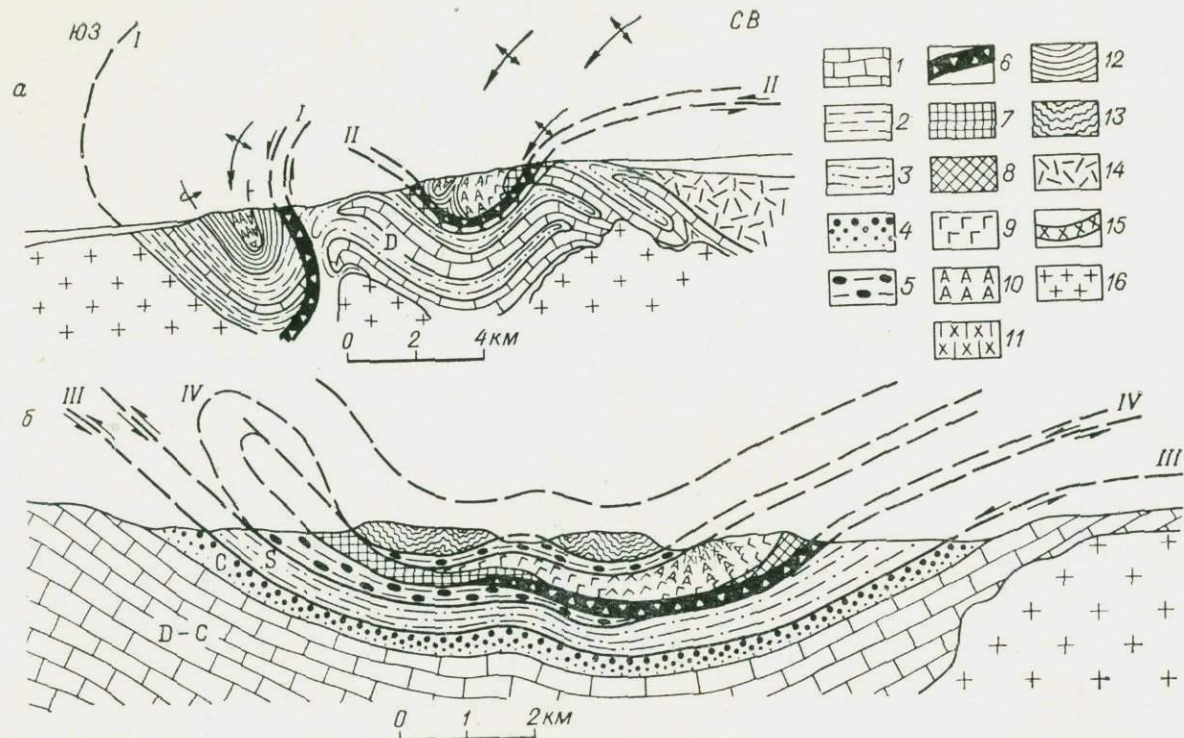


Рис. 11.8. Разрезы офиолитовых аллохтонов хр. Султан-Увайс (а) и Тамдынского горного массива (б).

I — Султан-Увайский; II — Каратауский; III — Кызыргерский; IV — Балпантауский.
 1 — известняки; 2 — известковистые сланцы и фтаниты; 3 — флишоидные комплексы; 4 — флиш и олистрома; 5 — олистрома с офиолитами; 6 — меланж; 7 — апоперидотитовые серпентиниты; 8 — клиношироксениты; 9 — пироксеновые габбро; 10 — амфиболиты; 11 — дайковые комплексы; 12 — кварциты; 13 — глаукофансодержащие сланцы; 14 — андезиты; 15 — альбититы, плагиогранит-порфиры; 16 — гранитоиды.

Разрез хр. Султан-Увайс (Султануиздаг) в его восточной части (долина Султанбобосая)

В основании видимого геологического разреза хребта залегают смятые в сложную систему изоклинальных лежачих складок девонские мраморы и огнейсованные сланцы казансайской свиты. На них надвинуты Султан-Увайская I и Каратауская II аллохтонные тектонические пластины.

Султан-Увайский аллохтон сложен толщей амфиболитов, амфиболлизированных спилитов, слюдистых кварцитов, фтанитов и карбонатно-терригенными образованиями; все эти породы образуют крупную опрокпнутую складку с амфиболитами в ядре. В основании аллохтона залегают полоса оталькованного серпентинитового меланжа, включающего блоки гипербазитов, габброидов, лиственитизированных габбро, родингитов, амфиболитов, кварцитов и гнейсов.

Каратауский аллохтон слагает ядро крупнейшей синклинальной структуры хребта — Менажатской синформной складки. К подошве аллохтона приурочена полоса серпентинитового меланжа и выходы альбититов и платиогранит-порфиров, активно взаимодействующих как с офиолитами, так и с нижележащими карбонатно-терригенными толщами. Аллохтон образован сложно дислоцированным грубо стратифицированным разрезом океанической коры: сосюртитизированными габбро и габбро-амфиболитами, эпидот-цоизитовыми амфиболитами и апофтанитовыми слюдистыми кварцитами с прослоями зеленокаменно-измененных эффузивов. Габброиды, амфиболиты и кварциты смяты в перевернутые антиклинальные складки, косо срезанные подошвой аллохтона.

Разрез Тамдынского горного массива в его центральной части (район Тескудуксаея)

На разрезе хорошо видна пологая синформная складка, крылья которой сложены девонскими и каменноугольными мелководными шельфовыми известняками, согласно перекрытыми среднекаменноугольным флишем, переходящим вверх по разрезу в олистострому. Ядерную часть складки заполняют аллохтонные покровы: Кыргырский III, сложенный силурийскими песчаниками и сланцами, и Балпантауский IV, включающий ченгельдинский офиолитовый комплекс, олистострому с глыбами офиолитов, кремней, кембрийских эффузивов и известняков и учкудуктауский комплекс динамометаморфических глаукофансодержащих зеленых сланцев.

Структурное положение офиолитовых ассоциаций в складчатых областях неоднозначно. Можно, по-видимому, различать два главных типа первичных соотношений: засасывание океанической коры под континентальную (собственно всасывание, субдукция) и выбрасывание океанической коры на активный край континента, которое Р. Коулман [58] предложил называть обдукцией. При обдукции на глубину затягивается континентальная кора. При этом на край континента нередко выбрасывается несколько пакетов офиолитовых аллохтонов, нижние из которых, наименее тектонически переработанные, соответствуют океанической коре окраинного морского бассейна (микроокеана); средние — формациям островных дуг; верхние — океанической коре главного океанического бассейна (см. рис. 11.6, V). В большинстве линейных складчатых поясов (Альпы, Урал) офиолитовые аллохтоны обычно обдукционированы, выброшены на край континента и перекрывают миогеосинклинальные аллохтоны континентального шельфа.

В процессе орогенеза, линейной складчатости, сдвиговых и блоковых движений структурное положение офиолитовых аллохтонов

усложняется. В сформировавшихся структурах линейных складчатых областей альпинотипные офиолиты могут слагать: 1) наклонно уходящие на глубину тектонические пластины и блоки, которые нередко являются корневыми зонами офиолитовых покровов; 2) бескорневые останцы офиолитовых пластин или пакетов пластин (см. рис. 11.8); 3) изолированные глыбы, чешуи, протрузии среди зеленосланцевых глаукофансодержащих ассоциаций или крупные и мелкие олистолиты в олистостромах. Иногда серпентинитовый меланж, включающий глыбы и блоки различных пород офиолитовой ассоциации, маркирует поверхности шарьяжей, швы между тектоническими пластинами и блоками; здесь он играет роль смазки, облегчающей взаимное движение аллохтонов и тектонических блоков (см. рис. 11.8, а).

Внутреннее строение офиолитовых аллохтонов отличается большой сложностью и особым, чрезвычайно характерным для них «глубинным» стилем тектоники. Этому стилю свойственны опрокинутые и перевернутые складки (см. рис. 11.8), иногда перекрывающие одна другую наподобие рыбьей чешуи, сложные изгибы слоев, структуры течения. Глаукофансодержащие зеленые сланцы, формирующие, как правило, самостоятельные тектонические пластины, подстилают офиолитовые аллохтоны или перекрывают их.

Еще более усложняется строение офиолитовых ассоциаций в процессе ротационных смещений, изгибов и поворотов тектонических блоков и их сложных взаимодействий при столкновении и дроблении массивов континентальной коры на границах сходящихся литосферных плит (см. рис. 11.6, VI). Линейные складчатые пояса при этом сложно изгибаются и деформируются; образуются складчатые области мозаичного типа, характерным примером которых может служить Центральнокзахстанская складчатая область.

Изучение офиолитовых поясов в пределах таких областей помогает «развернуть» сложно скрученные полосы линейных орогенов, выявить крупнейшие сдвиги и ротационные дислокации, деформировавшие их первоначальную структуру. Большую помощь при «развертке» оказывают палеомагнитные данные, широко используемые при палинспастических реконструкциях [18, 41, 43, 46, 60, 66].

Таким образом, выявление первичного тектонического положения офиолитовых ассоциаций в структуре складчатой области и изучение их позднейших дислокаций дает богатейший материал для палеогеографического и палеотектонического анализа, позволяет проследить историю формирования и развития океанических и микроокеанических бассейнов геологического прошлого и определить время их замыкания.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЗЕМЛИ

Космические съемки Земли позволили геологам впервые увидеть реальный облик поверхности нашей планеты и сравнить его с теми моделями, которые были построены по данным наземных исследований, т. е. с топографическими, геологическими, тектоническими, геоморфологическими картами. На космических снимках с удивительной отчетливостью и резкостью выявились генеральные черты структуры материков Земли: трансконтинентальные линейменты, концентрические структуры диаметром в десятки и сотни километров, обобщенный рисунок сети региональных и планетарных [48] разломов и трещин, рифтовые зоны, области молодого и новейшего вулканизма, контролируемые разрывными нарушениями. Сквозь малоомощный платформенный чехол по космическим снимкам оказалось возможным проследить структуры и разрывы фундамента. Важным индикатором строения приповерхностных участков литосферы, и в частности разрывных нарушений, является растительный покров, состояние которого дает возможность маркировать на космических снимках линейменты, сдвиги и крупные разрывы.

Результаты космических съемок служат богатейшим материалом для тектонического анализа. Они позволяют классифицировать структуры по размерам и морфологии, выявлять положение локальных и региональных структур в глобальной планетарной структуре литосферы Земли, однозначно определять ориентировку напряжений и сил, формирующих или формировавших в прошлом структурные формы и рельеф поверхности Земли, находить взаимозависимость между ориентировкой линейментов и трещин, измеряемой в обнажениях, и направлениями векторов напряжения сжатия в земной коре, измеряемых в скважинах по методу Хаста [45].

Уже предварительный анализ материалов космических съемок в значительной мере изменил наши представления о строении земной коры. В частности, выявилось широкое развитие на всех земных материках концентрических структур различных размеров, в том числе крупных, диаметром многие десятки и сотни километров [51, 55]; большинство этих структур были неизвестны геологам, лишь некоторые были выявлены и изучены ранее, главным образом геоморфологическими методами [37]. Закономерная ориентировка центров структур, их связь с прослеживающимися на снимках линейментами свидетельствуют об эндогенном происхождении большинства концентрических образований. Многие концентрические структуры являются последовательно растущими молодыми очень пологими куполообразными поднятиями. По всей вероятности, они представляют собой структуры изостатической компенсации над скоплениями масс вещества пониженной плотности в нижних частях коры и в верхах мантии.

Образование таких «пузырей» разуплотненного вещества является, по-видимому, неотъемлемой частью процесса формирования континентальной коры над зонами субдукции.

Другой важной задачей тектонического анализа, для решения которой космические снимки дают прекрасный материал, является изучение линеаментов и разрывных нарушений. Обычно в пределах каждого региона отчетливо прослеживается несколько систем таких разрывов, каждая из которых имеет достаточно выдержанное и устойчивое простирание. Иногда параллельные крупные разрывные нарушения располагаются на определенных, приблизительно одинаковых расстояниях одно от другого; это особенно характерно для систем трансформных разломов, секущих под прямым углом рифтовые зоны и участки литосферы, расположенные над сейсмофокальными зонами субдукции.

С разрывами такого типа во многих случаях связаны месторождения полезных ископаемых (медь, золото, полиметаллы, серебро, молибден, олово). Трансформные разломы за последние годы привлекли пристальное внимание тектонистов и металлогенистов и стали объектом детального изучения. Многими исследователями отмечаются повторяющиеся устойчивые интервалы между параллельными рудоконтролирующими разломами, так называемый «шаг разломов» [8, 77], и устойчивая их ориентировка. Например, большинство трансформных разрывов в Америке имеет выдержанную широтную ориентировку, что дает основание некоторым исследователям рассматривать их как составные элементы длительно существующей устойчивой планетарной сети разрывов и трещин [42].

Во многих случаях разрывные нарушения и линеаменты, дешифрируемые на космических снимках, представляют собой системы молодых сдвигов, по которым закономерно смещены долины рек, берега озер, контуры морских побережий, линейные складчатые и разрывные структуры, границы вулканических полей и плутонических комплексов. Такие системы сдвигов разных амплитуд (от десятков метров до десятков и даже сотен километров) прослеживаются едва ли не на большей части территории континентов Земли. Использование материалов высотных и космических съемок значительно расширяет возможности изучения сдвиговой тектоники, значение которой для понимания общей структуры континентов показано в работах Дж. Муди и М. Хилла [84], А. В. Пейве [10, 28], Н. Павони [87], М. Абдел-Гавада [56] и других исследователей.

Системы сдвигов можно разделить на линейные зоны и площадные (мозаичные) области, хотя между этими двумя группами нет четкой границы: узкие сдвиговые зоны «утыкаются» в обширные области мозаичных дислокаций или расходятся из этих областей ориентированными пучками. Площадные области нарушений, разбитые сетками сдвигов на ряд крупных и мелких блоков, напоминают сложную мозаику, где каждый блок смещен и по-

вернут: в одних регионах по часовой стрелке, в других — против, в третьих отмечается кулисообразное смещение блоков в определенном направлении. В первом случае наблюдаются системы левых сдвигов самой различной ориентировки, во втором — системы правых сдвигов, в третьем — сочетание лево- и правосторонних смещений по разрывам разного простирания. В некоторых случаях можно наблюдать наложение разнонаправленных систем сдвигов.

Расположение молодых систем сдвигов, четко дешифрируемых на космических снимках, не хаотично и не случайно, а подчинено определенным закономерностям. В северном полушарии наиболее крупные системы сдвигов обрамляют по флангам движущиеся в северном направлении литосферные плиты и блоки: Тихоокеанскую плиту, Аравийский, Индийский и Малазийский блоки [54]. На левых (западных) флангах этих движущихся блоков развиваются системы левых сдвигов, а на правых (восточных) — системы правых сдвигов (рис. 11.9). Иногда литосферные блоки испытывают еще и слабое вращательное движение против часовой стрелки, кроме того, они бывают развернуты в северо-западном направлении (особенно во фронтальных частях).

Если по флангам движущихся литосферных блоков наблюдаются преимущественно линейные системы сдвигов, то на их фронтальных частях отмечается интенсивное скучивание масс, сопровождающееся крупными шарьяжными перекрытиями. Одновременно с образованием покровных структур на обширных площадях взаимодействующих блоков литосферы, прилегающих к зоне столкновения, происходит формирование и развитие сложных мозаичных систем сдвиговых дислокаций. Такие системы характерны, например, для восточной части Средней Азии, Центрального и Восточного Казахстана. На фронтах движения литосферных блоков, а иногда и на их флангах можно наблюдать взаимные переходы между узкими линейными зонами сдвигов и областями площадного распространения сдвиговых нарушений. Такие переходы наблюдаются, в частности, в пределах системы левых сдвигов субмеридионального простирания, которая протягивается через Западный Пакистан и Восточный Афганистан и ограничивает с запада Памир.

Изучение систем молодых сдвиговых нарушений по материалам космических съемок дает ценную информацию о направленности и интенсивности тектонических движений новейшего времени. Повсеместная распространенность сдвигов свидетельствует о значительно большей мобильности континентальной коры, чем это предполагалось раньше. Даже при относительно малых амплитудах смещений по отдельным сдвигам множественность и направленность этих смещений приводит к очень большим суммарным деформациям континентальной коры. Системы сдвигов, по-видимому, отражают в жестких поверхностных участках коры материков глубинные направленные движения вещества мантии Земли



Рис. 11.9. Глобальный космический фотоснимок Земли с автоматической межпланетной станции «Зонд-7» (а) и схема его дешифрирования (б).
Литосферные блоки, движущиеся в северном и северо-западном направлении: I — Адриати-
Главнейшие линементы (направления смещений показаны по работам [7, 56, 84, 87] и
Сдвиги и системы сдвигов: 1 — Северо-Анатолийская, 2 — Акабо-Иорданская (Мертвого мо
6 — Восточно-Памирская, 7 — Памиро-Каракорумский, 8 — Тянь-Шань-Куньлуньский,
аменты, природа которых не выяснена: 13 — Хиджаз-Искендеронский, 14 — Йемен-Ту
18 — Багдад-Тургайский, 19 — Кухрудский, 20 — Мекран-Кызыларватский, 21 — Устюрт-
25 — Транспакистанский.
1 — простирание главнейших элементов рельефа; 2 — границы рыхлого осадочного



межпланетной станции «Зонд-7» (а) и схема его дешифрирования (б).

ческий, II — Малазийский, III — Аравийский, IV — Индийский, данным дешифрирования).
ря), 3 — Тавро-Загросская (Армянская), 4 — Макран-Кветтская, 5 — Памиро-Афганская,
9 — Джалаиро-Найманский, 10 — Актасский, 11 — Атасуйский, 12 — Чингизский; лине-
вский, 15 — Тавро-Тартарский, 16 — Кувейт-Джафурский, 17 — Резайе-Загросский,
Успенский, 22 — Красноводско-Термезский, 23 — Копетдагский, 24 — Оман-Балхашский,
покрова.

и, возможно, нижних, более мобильных, горизонтов коры. Напряжения, возникающие в поверхностных участках коры под воздействием этих движений, смещают и поворачивают блоки коры по плоскостям закономерно ориентированных трещин и линеаментов, которые являются составляющими общей сети планетарной трещиноватости.

12

УСТАНОВЛЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАЗНОТИПНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В ГЕОФИЗИКЕ

Интерпретация геофизических данных связана с выявлением и использованием эмпирических соотношений; обращению к сложной формализованной дедукции обычно предшествуют индуктивные заключения. Можно предположить, что интересующие исследователя соотношения целесообразно вывести заранее, обратившись к методам математической физики и средствам современной вычислительной техники; затем, имея набор теоретических решений, можно разыскивать проявление в природе установленных соотношений и использовать их для прикладных целей. Однако при таком подходе возникает масса проблем, так как следует оценить необходимую сложность модели, роль помех, единственность причины наблюдаемых особенностей физических полей и т. п. Поэтому построению модели обычно предшествует обращение к эмпирическим связям и соотношениям.

Поиск эмпирических связей предполагает, что уже имеются какие-то предварительные соображения о зависимостях, которые следует проверить в первую очередь. Далеко не тривиальный вопрос: что и с чем сопоставлять, какие именно характеристики либо отображения (функции) характеристик? Бездумное сопоставление «в лоб» совершенно разных элементов, признаков, показателей позволяет иногда обнаружить рациональное зерно в хаосе соотношений. Однако как система такой подход неудовлетворителен, ибо разнообразие, опосредованность и непостоянство природных связей на пути между отдаленными характеристиками различных явлений не всегда позволяют уверенно интерпретировать математически установленную корреляцию (для установления и оценки силы связей используется хорошо разработанный аппарат линейной, ранговой, парной, частной, множественной корреляции). В сопоставлении показателей и выявлении эмпирических связей можно выделить несколько последовательно усложняющихся случаев.

1. Наиболее просто объяснить результаты сопоставления нескольких характеристик одного и того же объекта, измеренных в одних и тех же точках его поверхности или объема. Примеры такого сравнения особенностей химического и минералогического состава горных пород, их физических свойств, а также характеристик соответствующих физических полей, изученных в зоне отбора образцов, настолько хорошо известны, что нет необходимости их приводить.

Образец горной породы — это вполне конкретная часть геологического тела. Измеренные и сопоставляемые свойства при-
сущи именно этому образцу. Физическое поле, измеренное на обнажении, связано не только со свойствами тех горных пород, которые располагаются непосредственно под прибором, но и с особенностями состава и строения пород в более значительном объеме, хотя практически эффект локализации может быть разным, иногда весьма сильным. Вместе с тем, если совокупность образцов горной породы, отобранных по определенной системе, не характеризует состава среды в некоторых (иногда весьма удаленных) окрестностях точек отбора, то утрачивается ценность анализа свойств и состава. Таким образом, уже в этом простом примере появляется задача: вычленив из вариаций сопоставляемых переменных разные компоненты изменчивости. Эта задача в равной степени актуальна и для геофизики, и для геохимии, и для геологии в целом.

2. Условия сопоставления усложняются, если измеряемые характеристики относятся в принципе к одному объекту, но сам объект настолько велик и колебания его свойств настолько сильны, что возможно существенное изменение смысла связей между его сопоставляемыми характеристиками. В этой сложной ситуации нет уверенности даже в том, что частичная (может быть, полная) подмена содержания связей была монотонной, а не скачкообразной.

В качестве примера укажем на сопоставление глубины залегания границы Мохо H_M с аномалиями Буге Δg и средней высотой поверхности Земли над уровнем моря. Такого рода сопоставления уже стали традиционными, выведены десятки формул, рассчитанных на глобальное и региональное применение. С помощью этих зависимостей сделано немало полезных выводов (чему, к сожалению, сопутствует неоправданный оптимизм относительно универсальности и точности формул). Чтобы пояснить вопросы, возникающие при выявлении и использовании эмпирических связей между величинами H_M и Δg , проанализируем средние значения аномалий Буге, абсолютных отметок h рельефа дна и толщины земной коры $H = H_M - h$ на 16 участках акватории Карибского моря, примыкающей к провинции Орьенте (Куба).

h , км	H , км	Δg , мгал	h , км	H , км	Δg , мгал
4,4	9,0	230	5,6	5,5	240
1,7	18,6	80	5,9	5,2	240
1,0	18,2	60	4,7	10,0	190
5,0	6,8	250	3,0	7,6	220
5,0	5,1	280	4,0	17,5	130
5,3	8,4	210	3,0	11,5	180
5,5	6,4	230	2,0	21,8	90
5,8	4,1	250	2,5	18,3	120

Морские гравиметрические наблюдения в районе желоба Кайман выполнил Р. Чайн; измерения на о. Гаити даны по К. Бовину, результаты сейсмических исследований — по Дж. Юингу и др., учтена также сводка Р. Мак-Коннела и Г. Мак-Таггарта [4, 5]. Гравиметрические данные из разных источников приведены к условиям единой плотности промежуточного слоя 2,67 г/см³.

Обработка числовых данных по методу наименьших квадратов приводит к уравнению

$$H \approx 26,4 - 0,0765 \Delta g - 0,281h \pm 1,6; \quad (12.1)$$

величины H и h выражены в километрах, Δg — в миллигалах.

Еще один способ определения искомой зависимости $H = f(\Delta g, h)$ можно найти, используя свойства случайного вектора. Вектор наблюдений $H, h, \Delta g$ имеет существенные связи между компонентами. Матрица оценок коэффициентов парной корреляции r имеет вид

H	h	Δg
1	-0,862	-0,957
	1	0,875
		1

Средние значения и стандартные отклонения переменных таковы: $H = 11,06 \pm 5,70$ км; $h = 4,025 \pm 1,551$ км; $\Delta g = 187,5 \pm 67,2$ мгал.

Центрируя и нормируя переменные, получаем вектор, компоненты которого $\check{H}, \check{h}, \check{\Delta g}$ в среднем равны нулю и имеют дисперсии, равные единице. От этого вектора переходим к другому, компоненты которого x, y, z не имеют между собой линейной корреляции. Обозначим $x = \check{\Delta g}$ и выразим компоненты y и z через линейную комбинацию $\check{\Delta g}, \check{h}, \check{H}$:

$$y = \check{h} - r_{gh} \check{\Delta g}; \quad (12.2)$$

$$z = \check{H} - \frac{r_{hH} - r_{gh} r_{gH}}{1 - r_{gh}^2} y - r_{gH} \check{\Delta g}. \quad (12.3)$$

Компонента y — это та небольшая часть исходной переменной h , которая не коррелирована с аномалией силы тяжести. Соответственно z — это та часть исходной переменной H , которая не коррелирована ни с Δg , ни с h . По сути, z есть ошибка приближения переменной H по Δg и h . После подстановки средних значений, дисперсий и коэффициентов корреляции в уравнения (12.2) и (12.3) получаем

$$H \approx 26,4 - 0,0733 \Delta g - 0,386h. \quad (12.4)$$

Коэффициенты формул (12.1) и (12.4) достаточно близки, что показывает известную устойчивость их определения.

Сомнения возникают при практическом использовании формул для оценки толщины земной коры на территории самой провинции Орьенте. В гравиметрическом отношении эта область резко отличается от остальной части острова и представляет собой один из наиболее уникальных районов мира, так как при наличии

горных массивов характеризуется положительными аномалиями Буге до 150—200 мгал [4]. Некоторую близость к провинции Орьенте в гравиметрическом отношении имеют Новая Каледония, Кипр и юго-восточная часть Новой Гвинеи. Подстановка в формулы (12.1) и (12.4) значений переменных приводит к выводу, что в тех частях провинции, где аномалия силы тяжести $\Delta g \geq 150$ мгал, а высота над уровнем моря около 0,5 км, толщина земной коры не превышает 14—16 км. Если бы приведенная оценка была надежной, можно было считать, что провинция Орьенте представляет собой удобное место для сверхглубокого бурения, рассчитанного на вскрытие поверхности Мохо.

Однако правдоподобие такой оценки остается спорным. Для провинции Орьенте характерно развитие крупных массивов ультраосновных пород, продукты выветривания которых образуют значительные месторождения никеля. Гипербазиты типичны также для Новой Каледонии, Кипра и других районов мира с необычно высокими аномалиями силы тяжести. Массовое проникновение мантийных продуктов в толщу пород земной коры может служить косвенным подтверждением близости поверхности Мохо. Вместе с тем широкое развитие гипербазитов повышает среднюю плотность пород, расположенных выше границы Мохо, поэтому интенсивные аномалии силы тяжести могут отмечать не только и не столько общий подъем поверхности Мохо, сколько близкое положение больших масс мантийного материала вне связи с поверхностью Мохо. Получившая в последнее время распространение точка зрения, согласно которой гипербазитовые массивы представляют собой участки мантии, непосредственно выходящие на поверхность Земли, не противоречит тому, что поверхность Мохо как планетарная граница раздела сред с разной сейсмической скоростью, отождествляемая с верхней границей мантии, не совпадает с поверхностью самих массивов, а находится значительно глубже. Отсутствие противоречия объясняется тем, что оценки глубины относятся к элементам разной степени общности.

Если бы нас интересовал не один указанный конкретный район, а группа районов, равномерно распределенных между участками сейсмических исследований, то, опираясь на те же исходные данные, можно было бы оценить глубину поверхности Мохо с приемлемой погрешностью для значительной части площади даже при сохранении некоторой вероятности весьма грубых уклонений в отдельных местах. Эти единичные грубые несовпадения играли бы роль «локальных ожогов», не влекущих за собой летального исхода заключения в целом.

Наличие устойчивой статистической связи между сопоставляемыми переменными приводит к необходимости содержательно интерпретировать эту связь. Часто интерпретация бывает весьма очевидной. Так, приведенное выше соотношение величин H , h и Δg ясно с позиций изостатического равновесия по схемам Эйри и Венинг-Мейнеса. В тех случаях, когда сопоставляемая пара

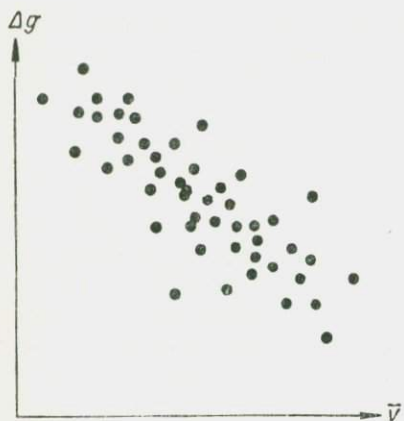


Рис. 12.1. Связь аномалий Буге со средней скоростью распространения продольных сейсмических волн в земной коре (при непостоянстве других характеристик, от которых зависит интенсивность аномалий).

выводу, что при прочих равных условиях уплотнение земной коры сопровождается уменьшением силы тяжести (повышение скорости \bar{v} означает в общем случае, т. е. при постоянстве средней относительной атомной массы пород, увеличение плотности). Чтобы разъяснить недоразумение, составим список причин, априори влияющих на величины Δg и \bar{v} .

переменных имеет сильные связи со множеством других переменных, может быть полезной и специальная редукция — такая обработка данных, которая фиксирует влияние всех прочих переменных. Без рассмотрения и учета дополнительных связей интерпретация соотношения сопоставляемых величин окажется неверной.

Обратимся к рис. 12.1, который показывает уменьшение силы тяжести Δg с увеличением средней скорости \bar{v} продольных волн в толще земной коры. Рассматривая эту зависимость изолированно от всех других сведений относительно корреляций сейсмических и гравиметрических характеристик земной коры, можно прийти к неверному

Переменная	Причины изменения	Знак производной по соответствующему параметру
Аномалия силы тяжести Δg	Земная кора:	
	средняя плотность	+
	мощность	-
	другие особенности	?
	Мантия:	
	средняя плотность	+
	другие особенности	?
Средняя скорость \bar{v} продольных волн в земной коре	Земная кора:	
	средняя плотность	+
	мощность	+
	другие особенности	?

Очевидно, что вариации характеристик Δg и \bar{v} соответствуют областям распределения масс, не тождественным по своему объему и геологическому содержанию. При этом одна из возможных причин вариаций (средняя плотность) вызывает согласованное изменение величин Δg и \bar{v} , тогда как другая причина (мощность)

влияет на Δg и \bar{v} противоположным образом. Характер связи Δg и \bar{v} на рис. 12.1 отражает в первую очередь то обстоятельство, что увеличенная средняя скорость типична для районов с мощной земной корой, а погружение границы Мохо сопровождается уменьшением аномалий силы тяжести. Разделение эффекта мощности и эффекта средней скорости привело бы к иному виду связи между Δg и \bar{v} ; точнее, из совместных изменений мощности земной коры, средней скорости и аномалии силы тяжести следовало бы выделить такие изменения силы тяжести, которые соответствуют изменению мощности, сопровождаемому нормальным изменением средней скорости; остаточные аномалии силы тяжести имело бы смысл сравнить с вариациями средней скорости, не учтенными ростом коры.

3. Некоторые исследователи видят специфику сопоставления геофизических полей (и величин, полученных в результате их интерпретации) с геологическими и геохимическими характеристиками в том, что при этом часто имеет место значительная разномасштабность явлений. Имеется в виду, что вариации разных характеристик связаны с неодинаковыми сочетаниями причин, стоящих за этими характеристиками. Исследовать и уточнить местоположение источников вариаций переменных — сама эта задача представляет собой большую научную проблему. Приведем обобщенное, схематизированное представление, насколько совпадают и не совпадают группы причин, определяющих вариации переменных; при этом обозначим связи: отчетливые для многих характеристик и при широком круге условий (++), для некоторых конкретных характеристик при широком круге условий (+), для отдельных характеристик в ограниченных условиях (+-); сомнительные или отсутствуют (?).

Местоположение источников наблюдаемых вариаций

Показатели	Верхняя часть земной коры	Глубинные зоны коры и мантии	Космос
Геофизические	++	++	+—
Геологические	++	+—	?
Геохимические	++	+	?

Группы причин, различающиеся по своему суммарному проявлению, генерируют разные спектры компонент изменчивости. С некоторой долей условности можно говорить о вариациях сопоставляемых характеристик, которые отвечают уровню отдельных кристаллических агрегатов (микроуровню) и далее локальному, региональному и глобальному уровням.

Компоненты изменчивости	Характеристики			
	Геофизические (физические поля)		Геологические	Геохимические
Микроуровня	?	++	++	++
Локальная	++	++	++	++
Региональная	++	+	+	+
Глобальная	++	?	+	+

Одним из условий, обеспечивающих возможность интерпретации соотношений между разнородными показателями, является достаточно однотипное выделение объектов сопоставления. В этом случае объекты оказываются сходными в целом ряде отношений, между переменными величинами стоит меньшее число природных связей и они более стабильны. С методической точки зрения важно преодолеть разномасштабность показателей, сделать более значительной общую часть изменчивости. Для этого прибегают к процедурам подчеркивания или исключения тренда и к некоторым другим.

Возможности, возникающие при обоснованном сопоставлении характеристик, иллюстрирует рис. 12.2, где представлены разнородные переменные, описывающие особенности глубинной структуры земной коры и состава ее верхней зоны. Специфику глубинных зон отражают углы наклона (модули значений) границ Мохо (α_M) и Конрада (α_K). Изменения состава горных пород в самой верхней части земной коры представлены вариациями средней плотности ρ , распространенности калиевого полевого шпата (микроклина) M_k и микроконцентраций свинца Pb (соответственно физический, минералогический и геохимический показатели).

Фактические данные относятся к 39 участкам, которые расположены вдоль двух профилей ГСЗ, пересекающих основные структурно-фациальные зоны Северной Карелии. Образцы с каждого участка изучены петрофизическими, петрохимическими, минералогическими и геохимическими методами. Результаты по каждому участку статистически обработаны и сопоставлены с данными сейсморазведки ГСЗ. Как видно, изгибами границ Мохо и Конрада фиксируются зоны повышенной трещиноватости в жесткой коре докембрийского щита. Эти зоны, благоприятные для проникновения гидротермальных растворов, проявляются в пониженной плотности пород и в повышенной концентрации свинца, бария и ряда других элементов. В этом примере сопоставляемые данные формально относятся к разным областям земной коры, отражают разные ее особенности, которые могут быть разделены по вертикали интервалами в несколько десятков километров. Однако обширные зоны тектонических нарушений служат каналами связи между разными этапами земной коры, фактически объединяют их. Наличие тектонических нарушений отчетливо поясняет корреляцию разнотипных показателей.

Средний угол наклона глубинных сейсмических границ — новый для интерпретации параметр. Приведенный выше пример показывает, что деформация глубинных частей земной коры, выраженная оценкой угла наклона границы Мохо, имеет определенный геологический смысл. Разумеется, небезразлично, по каким данным, с какой точностью определяется параметр, включенный в сопоставление. Специалисты по ГСЗ и сейсмологии основное внимание обращают на глубину залегания планетарных и региональных границ раздела и на характеристику разреза по скорости распространения волн и поглощения сейсмических колебаний. Поскольку типичные сейсмические разрезы земной коры и верхней мантии показывают почти горизонтальное залегание глубинных границ, с углами наклона порядка первых градусов (исключение составляют зоны раздела крупных блоков литосферы, где углы существенно возрастают), то вполне понятно, что именно перечисленные геометрические и физические параметры представляли наибольший интерес [3].

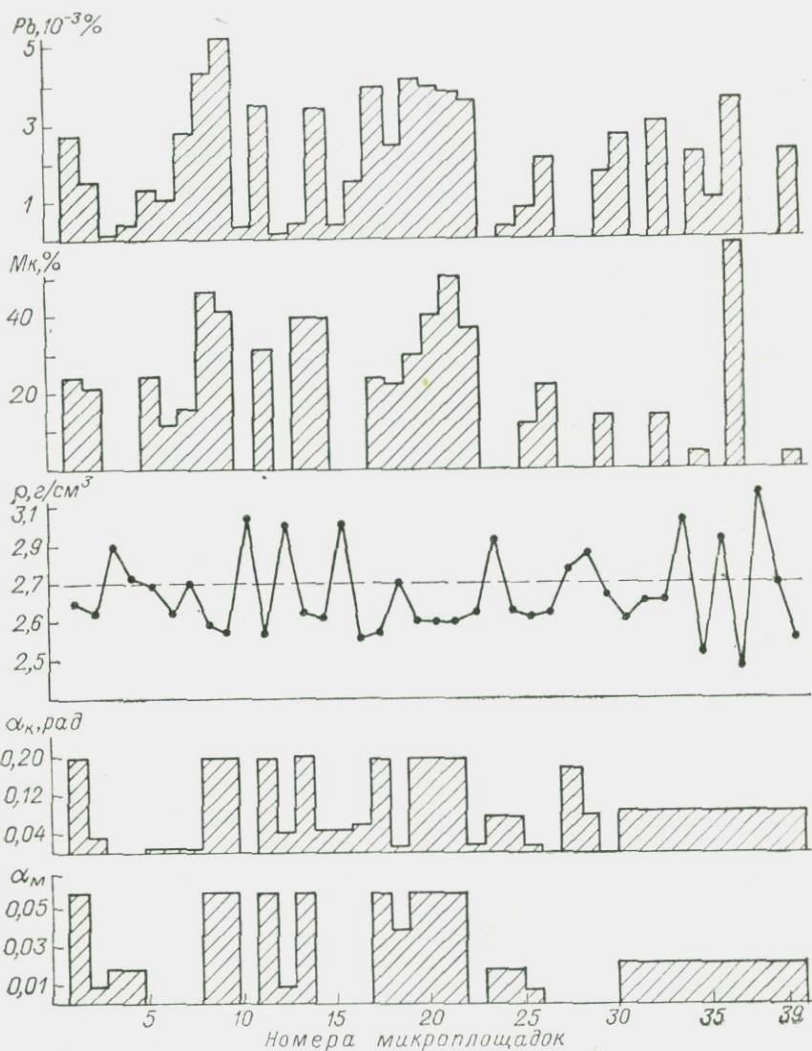


Рис. 12.2. Сопоставление некоторых физических, минералогических и геохимических характеристик метаморфических пород с интенсивностью деформации глубинных сейсмических границ (по Г. В. Гернику, И. Г. Клушину, Л. А. Ривошу).

О природе субгоризонтальных сейсмических границ в земной коре и мантии существуют различные мнения. Есть основания считать, что эти границы не являются структурными в обычной геологической трактовке, хотя они и отражают многие важнейшие особенности строения литосферы. Вместе с тем изображаемая на разрезах форма границ определяется не только их геологической природой, но и способами изучения и построения, что

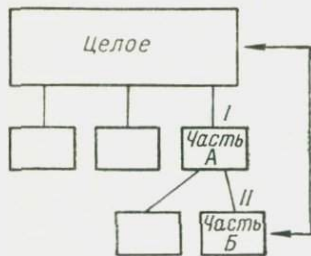


Рис. 12.3. Схема сопоставления генерализованных данных геофизики о земной коре с петрохимическими сведениями о составе отдельных элементов коры.

ординаты приводит к тому, что разрезы оказываются искусственно сглаженными. Между тем информация о наклоне, изгибе границ может быть не менее полезной, чем об их средней глубине.

Описанный выше пример сопоставления углов наклона поверхности Мохо с вещественным составом горных пород относится к древним метаморфическим образованиям конкретного геологического региона. При глобальном рассмотрении выявляются иные соотношения. В зонах глубинных деформаций, выраженных большими углами наклона поверхности Мохо, метаморфизованные образования (амфиболиты) чаще встречаются в ассоциации с ультрабазитами; характеристика физических условий по минералам-индикаторам указывает на более широкий диапазон изменения давления, намечается тенденция к изменению окисленности железа.

4. С наиболее сложным случаем сопоставления геофизических, геологических и геохимических показателей мы встречаемся при попытке выявить общие компоненты изменчивости у разномасштабных характеристик разнотипных объектов. Один из возможных вариантов — сопоставление генерализированных данных о земной коре в целом со специфическими данными об особенностях выбранных элементов. Схема, изображенная на рис. 12.3 и отвечающая такому сложному случаю, реализована при сопоставлении геофизических характеристик земной коры (глубина H_M залегания поверхности Мохо, средняя скорость \bar{v} распространения продольных волн в земной коре) с химизмом габброидов, принимающих участие в строении сложных габбро-гранитовых интрузивных комплексов.

Сопоставление проведено для 70 комплексов раннегеосинклинальных гранитоидов, сформировавшихся в течение фанерозоя на территории Евразии и Северной Америки. Подробное изложение методики исследований и некоторых результатов содержит работа [1]; табл. 12.1, дополняющая приведенные ранее материа-

в свою очередь связано с пониманием точности и ее оценкой [2, 3]. Многие интерпретаторы, строящие сейсмические разрезы коры, рассматривают точность своих построений как понятие, тождественное точности определения глубины соответствующих границ, т. е. учитывают погрешность только вертикальной координаты элементов разреза и не обращают внимания на ошибки горизонтальной координаты и угла наклона границ. Хотя указанные ошибки и связаны между собой, но они не тождественны и имеют разное значение при геологическом объяснении материалов.

Учет ошибок только вертикальной координаты приводит к тому, что разрезы оказываются искусственно сглаженными. Между тем информация о наклоне, изгибе границ может быть не менее полезной, чем об их средней глубине.

лы, иллюстрирует связь между распространенностью габброидов и концентрацией в них окислов магния и алюминия, с одной стороны, и изменением параметров земной коры — с другой. Как видно, приближение границы Мохо к земной поверхности и общее увеличение базифицированности земной коры, выраженное ростом средней скорости \bar{v} , существенно влияют на повышение концентрации окиси магния при сокращении концентрации окиси алюминия в породах с одинаковым содержанием кремнекислоты.

ТАБЛИЦА 12.1

Соотношение характеристик габброидов, входящих в состав интрузивных комплексов, и параметров земной коры

Параметры коры		Характеристики габброидов		
H_M , км	\bar{v} , км/с	Распространенность, %	Al_2O_3 , %	MgO, %
30—38	6,3—6,5	25	14,2	7,7
	6,0—6,2	19	17,5	6,8
39—50	6,3—6,5	24	16,7	6,2
	6,0—6,2	22	17,8	5,6

Примечания. 1. Концентрации Al_2O_3 и MgO приведены для постоянного значения SiO_2 . 2. Наблюдаемые различия средних значений с вероятностью $0,8 \leq P \leq 0,9$.

Схема, показанная на рис. 12.3, дает некоторое представление о том, что стоит между сопоставляемыми геофизическими и геохимическими величинами. Список звеньев включает: 1) свойства целого; 2) долю части *A* в целом; 3) соотношение *I* между частью *A* и целым; 4) свойства части *A*; 5) долю части *B* в части *A*; 6) соотношение *II* между частями *B* и *A*; 7) свойства части *B*. Таким образом, между свойством целого (мощность земной коры) и свойством части *B* (содержание окиси магния в габброидах) располагается длинная цепочка. Чтобы эта цепочка более определенно отражала искомые соотношения, вычленение частей необходимо осуществлять стандартизованным способом, тогда вариации связей *I* и *II* окажутся менее значительными и не приведут к искажению результатов.

Методические вопросы сопоставления разнотипных характеристик геологических объектов требуют дальнейшего совершенствования и развития. Важное место занимают математические методы выявления общих компонент изменчивости у переменных, участвующих в нескольких сложных соотношениях. Однако и при использовании простого математического аппарата можно получить полезные результаты. Устанавливаемые и контролируемые эмпирические соотношения, имеющие удовлетворительную содержательную интерпретацию, представляют значительную ценность для построения более сложных моделей, особенно при изучении глубинной геологии.

РАЗНООБРАЗИЕ ПРИРОДНЫХ СИТУАЦИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ГЕОФИЗИКИ

Конструирование и применение моделей геологической интерпретации геофизических данных основано на использовании стабильных соотношений между характеристиками физических полей и геологического строения. Метод установления соотношений определяет свойства соответствующих моделей, однако гарантированная стабильность связей зависит не только от метода, но и от условий его применения. Постоянство соотношений обычно соблюдается для однородных (в рассматриваемом аспекте) геологических условий. Расширение области применения моделей, рост разнообразия геологических условий влекут за собой необходимость либо значительно повышать сложность моделей, либо систематически и тщательно адаптировать модели к отдельным областям общего диапазона условий [9]. В процессе создания и последующего приспособления моделей важное значение имеют такие их особенности, как степень общности, полнота обоснования и способ описания природных ситуаций.

МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНОГО, РЕГИОНАЛЬНОГО И ГЛОБАЛЬНОГО УРОВНЕЙ

Наличие различных компонент изменчивости в исходных данных существенно влияет на специфику моделей, так как при их построении необходимо решить, чем можно пренебречь, а что важно сохранить и подчеркнуть. В соответствии с подразделением компонент изменчивости (и с той же степенью условности) можно говорить о моделях локального, регионального и глобального уровней. Наиболее часто используются модели, предназначенные для решения локальных и региональных геологических задач.

При достигнутой точности исходных данных переход от локальных моделей к региональным часто, но не всегда сопровождается принципиальным усложнением. В локальных моделях необходимо учитывать местную гетерогенность физических свойств горных пород (параметров среды), которой для моделей регионального уровня практически можно пренебречь. В связи с этим локальные модели часто отличаются большим числом параметров и, как следствие, сложностью технической реализации.

Повышенная принципиальная сложность региональных моделей связана с четырьмя обстоятельствами.

1. Переход от локального уровня к региональному сопровождается существенным усложнением представления о «норме» — идеальной модели, по отношению к которой оцениваются аномальные эффекты.

«Норма» локального уровня может быть разной в разных частях региона, региональная же модель не может игнорировать различия локальных норм. Обратимся к рис. 13.1, на котором показано положение

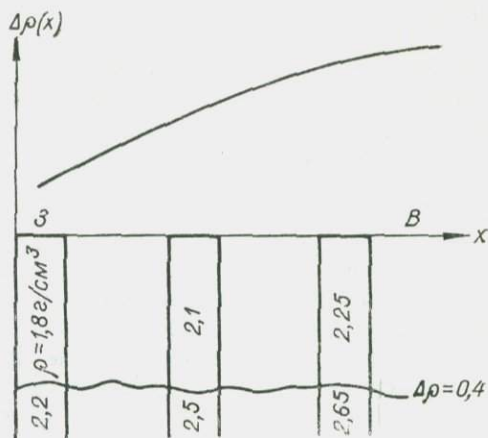


Рис. 13.1. Различие моделей распределения избыточной плотности для трех локальных участков и профиля в целом.

границы раздела двух сред (верхней и нижней), различающихся своей плотностью. Необходимо найти модель среды, пригодную для вычисления теоретических аномалий силы тяжести и для последующего сопоставления с наблюдаемыми аномалиями. Для каждого из трех локальных участков профиля, ограниченных на рисунке вертикальными линиями, модель среды оказывается элементарной: имеется всего одна контактная поверхность, на которой перепад плотности $\Delta\rho = +0,4 \text{ г/см}^3$. Соответственно вариации аномалий силы тяжести надо связывать только с колебаниями глубины границы.

Если рассматривать распределение плотности по всей длине профиля, включающего три участка, неизбежно придется признать, что главное значение имеют не умеренные по амплитуде вариации глубины контактной поверхности, а увеличение плотности всей толщи пород в направлении с запада на восток. Это общее нарастание подчиняется нелинейному закону и распространяется на верхний и нижний комплексы пород. Вторым по значению является эффект рельефа контактной поверхности с избыточной плотностью $0,4 \text{ г/см}^3$.

2. Сложность региональных моделей проявляется в том, что на значительной площади приходится учитывать различную природу главных источников геофизических аномалий. Источники аномалий могут различаться не только по своей глубине и специфике создаваемых аномалий, т. е. по таким особенностям, которые еще можно объяснить в рамках одного физического процесса, но и по своей физической природе. Последнее обстоятельство резко усложняет используемый математический аппарат.

Так, при оценке температуры горных пород на уровне поверхности Мохо в районах Восточной Сибири можно считать, что значительная доля теплового потока связана с концентрацией радио-

активных элементов в верхней части земной коры. Одновременно можно упростить задачу, приняв лишь стационарное во времени распределение тепла. Если же оценка температуры на поверхности Мохо должна быть получена не только в Восточной Сибири, но и на Дальнем Востоке, в пределах Камчатки, следует обязательно учесть еще один способ переноса тепла — конвекцию масс, и еще один механизм генерации тепла — трение литосферной плиты, подсасываемой под континент. В этом случае имеет место нестационарный процесс распределения тепла.

3. Сложность региональных моделей зависит не только от увеличения числа физических процессов и явлений, которые порознь могли присутствовать в локальных моделях, но и от необходимости учитывать такие явления, которые для локальных моделей в принципе несущественны. Наиболее очевидный и простой пример — изостазия. Роль изостатического фактора на расстояниях порядка единиц и десятков километров сравнительно мала. С переходом на интервалы порядка сотен и тысяч километров значение изостатических сил и перемещений масс становится существенным, хотя и не во всех случаях решающим.

4. Региональные модели часто отличаются от локальных тем, что вместо фиксированных величин приходится оперировать функциями пространственных, временных и других координат.

На больших площадях и интервалах становится шире общий диапазон вариаций геологических условий (включая число тектоно-магматических циклов и отдельных фаз, разнообразие магматических формаций, пределы мощности толщ), сильнее изменяются физические характеристики горных пород, свойства и природа отдельных границ и т. д. Насколько важно учитывать зональность характеристик пород земной коры в региональных моделях, показывает следующая приближенная оценка. При средней толщине земной коры около 40 км с изменением ее средней плотности лишь на $0,05-0,08$ г/см³ можно связывать аномалию силы тяжести до 80—130 мгал. Такую же аномалию дает погружение поверхности Мохо на 7—10 км. Когда существующая зональность физических свойств земной коры не учитывается при интерпретации, понижается достоверность геологических заключений даже о наиболее крупных особенностях глубинного геологического строения [8].

При переходе от региональных моделей к глобальным тенденция к усложнению нередко сохраняется. Прежде всего, при решении ряда проблем приходится принимать во внимание кривизну поверхности Земли. Этот фактор оказывает существенное влияние, когда расстояние по горизонтали между источниками аномалий и точкой наблюдений составляет многие сотни километров. Теория сейсмологии с начала зарождения этой дисциплины строилась с учетом кривизны поверхности Земли и тех концентрических поверхностей, которые разделяют внутренние зоны планеты. Кривизна поверхности Земли учитывается при построении транс-

континентальных разрезов коры и мантии по данным ГСЗ. Для задач, к решению которых привлекаются аномалии гравитационного и магнитного поля, эта проблема сравнительно нова [7, 14].

Для многих глобальных моделей интерпретации эффект кривизны несуществен, ибо такие модели учитывают глобальность совсем в ином аспекте — по широте учета особенностей, типичных для Земли в целом, а не только для отдельных регионов и даже континентов. Каждый конкретный ареал, входящий в выборку геологических объектов, предназначенную для выявления глобальных закономерностей, может включать данные об аномалиях, интерпретация которых справедлива даже в рамках локальных моделей.

Главное отличие глобальных моделей от региональных заключается в том, что первые учитывают наиболее широкий диапазон вариаций всех переменных. Переход к глобальному уровню моделей сопровождается не просто резким, а еще и неравномерным возрастанием диапазона для разных переменных. Поэтому может происходить перераспределение роли отдельных факторов, вносящих свою долю в общую изменчивость анализируемых переменных. Размеры выборок, обрабатываемых на основе глобальных моделей, нередко составляют значительную часть генеральной совокупности.

Различие региональных и глобальных моделей поясним на примере соотношения между плотностью ρ горных пород и скоростью v_p распространения в них продольных сейсмических волн. Это соотношение представляет значительный интерес для многих проблем геологии и геофизики. Весьма существенную роль оно играет в совместной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных при изучении глубинного строения регионов. Исследованию связи $v_p = f(\rho)$ посвящено много работ теоретического и экспериментального плана [5, 15—18].

Лабораторные эксперименты с группой минералов, включающей α -кварц, микроклин, олигоклаз, турмалин, топаз, форстерит, шпинель, стишовит и ряд других, установили практически линейную зависимость скорости v_p от плотности ρ при $2,5 \leq \rho \leq 4,5$ г/см³, так что

$$dv_p/d\rho = 3,8 \div 3,85. \quad (13.1)$$

При постоянстве средней относительной атомной массы \bar{m} используется эмпирическое соотношение

$$v_p \approx 1,42\rho^{1,5}, \quad (13.2)$$

из которого следует слабая зависимость производной от значений сопоставляемых переменных:

$$dv_p/d\rho \approx 2\sqrt{\rho}. \quad (13.3)$$

Совместный учет скорости продольных v_P и поперечных v_S волн имеет место в сейсмическом уравнении состояния (в терминологии Д. Андерсона):

$$\rho = q\bar{m}\Phi^n, \quad (13.4)$$

где q и n — некоторые константы;

$$\Phi = v_P^2 - (4/3)v_S^2. \quad (13.5)$$

Для минералов и горных пород в условиях низких и умеренных давлений

$$\rho/\bar{m} \approx 0,048\Phi^{0,323} \pm 0,12, \quad (13.6)$$

а для глубинных зон Земли

$$\rho/\bar{m} \approx 0,0565\Phi^{0,28}. \quad (13.7)$$

В практике совместной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных на региональном уровне обычно принимается постоянство средней атомной массы горных пород, расположенных в нижней части земной коры и в верхней мантии. Это предположение позволяет с помощью простой пропорции перейти от вариаций средней скорости продольных волн к вариациям средней плотности. В определенной степени такое предположение обоснованно, так как расчеты средней плотности отдельных комплексов земной коры, основанные на гравитационных аномалиях и данных ГСЗ, показали удовлетворительную сходимость с соотношениями (13.4) и (13.3), которые учитывают экспериментальные определения параметров ρ и v в лабораторных условиях. Следует подчеркнуть, что соответствующие материалы относятся к регионам с одинаковым или близким возрастом складчатости [5].

Средняя атомная масса ультраосновных и основных пород — продуктов мантийных магм — существенно зависит от содержания в них железа и магния. Поэтому значительные вариации отношения Fe/Mg оказывают влияние на связь параметров ρ и v_P . Весьма интересны в этом отношении результаты, которые опубликовал Д. Чанг [16]. В зависимости от пропорции форстерита Fo и фаялита Fa в оливинах между изменениями ρ и v_P может иметь место не только прямая, но и обратная зависимость. Ниже приведены результаты измерений.

Состав, %	ρ , г/см ³	v_P , км/с	Пористость, %
100 Fo	3,16	8,46	1,6
90 Fo 10 Fa	3,27	8,22	1,9
80 Fo 20 Fa	3,36	8,02	2,2
50 Fo 50 Fa	3,71	7,45	1,8
100 Fa	4,29	6,50	2,4

В случае широких вариаций железистости мантийных пород можно ожидать значительных отклонений от простой пропорции

между изменениями параметров ρ и v_p . Более того, при изменении отношения Fe/Mg должны иметь место соответствующие изменения связи между ρ и v_p .

Вариации железистости в продуктах мантийных магм зависят от ряда причин, в том числе и от pT -условий дифференциации магматических расплавов. Исследование химического состава альпинотипных гипербазитов Европы, Азии, Северной Америки, Австралии и Африки [10] показало, что существует генеральная зависимость железистости дунитов, серпентинитов и гарцбургитов от возраста пород и, следовательно, от длительности геологического развития регионов. Для исследования эволюции состава гипербазитов учтено свыше 2000 полных химических анализов, которые характеризуют существенную часть известных гипербазитовых поясов в пределах континентов. Поэтому есть основание считать, что соотношение между плотностью вещества в глубинных зонах коры и мантии Земли и скоростью распространения в них сейсмических волн, которое остается приблизительно постоянным на региональном уровне, на глобальном не сохраняется и варьирует от региона к региону как функция сложности их геологического развития.

Систематизация данных о составе продуктов мантийных магм открывает дополнительные возможности для более углубленной интерпретации гравитационных аномалий и сейсмических разрезов на основе глобальных моделей. Возможно, такая систематизация окажется полезной и для построения региональных моделей, если наблюдаются значительные и закономерные изменения величины $Fe/(Fe + Mg)$ на сравнительно небольших интервалах (сотни километров). В частности, заметные вариации железистости гипербазитов типичны для некоторых регионов, тяготеющих к западному побережью Тихого океана.

ПОЛНОТА ОБОСНОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Для оценки обоснованности модели важно знать, какой объем знаний, имеющих отношение к проблеме, она концентрирует в себе, т. е. какие учитывает законы (с какой подробностью, в какой форме), конкретные факты и ограничения на переменные. Может показаться, что достаточно взять те соотношения, которые для данной предметной области являются фундаментальными; например, для расчетов и интерпретации аномалий силы тяжести учесть закон Ньютона и его следствия в виде общих теорем теории потенциала, для расчетов и интерпретации сейсмических данных обратиться к принципу Ферма и связанным с ним положениям геометрической сейсмологии и т. д.

При такой постановке совершенно отпадают сомнения в правильности теоретической базы модели. Появляются, однако,

серьезные опасения за конструктивность модели, которая учитывает лишь самые главные, самые общие соотношения. Специализация модели, ее ориентация на исследование некоторой частной, но представительной группы случаев, примеров, задач требуют включения дополнительных ограничений. Эти ограничения могут выступать в виде физических, химических, геологических законов, которые необходимо учитывать наряду с основным физическим законом. Ограничения типа конкретных фактов, статистических связей между переменными, входящими в структуру модели, могут быть настолько разнообразными, что с точки зрения сложности системы переменных основной закон окажется перемещенным на второй план. Ясно, что ограничения должны быть ранжированы по степени их существенности, важности для конкретного круга вопросов. От того, как составлен список ограничений и как упорядочены элементы списка, зависит степень обоснованности модели.

Модель может быть правильной в том смысле, что она корректно учитывает некоторый физический закон, и вместе с тем слабо обоснованной, так как не вся совокупность сложно согласованных изменений переменных описывается этим законом (имеют место и некоторые другие явления, процессы). Модель с неполным обоснованием может потерять свою роль познавательной конструкции при увеличении разнообразия условий, если она учитывает роль отдельных ограничений (в том числе представленных в виде закона) при нестрогом обосновании их места в списке либо при условии, что сам список не отвечает принципу полной группы, т. е. в него не включены элементы, которые в определенных обстоятельствах «ответственны» за отдельные стороны и особенности рассматриваемой картины.

В свою очередь это означает, что модели с неполным обоснованием плохо адаптируются при изменении условий. Будучи правильными для некоторой части общего диапазона условий, они перестают отвечать требованиям в других условиях. Выход из оптимальной части диапазона не всегда может быть проконтролирован исследователем, ибо, если бы это обстоятельство было хорошо известно, его можно было бы учесть и даже включить непосредственно в модель. Поэтому с общих позиций модель с неполным обоснованием обеспечивает не очень надежные результаты, которые могут иметь лишь вспомогательное значение наряду с другими признаками, показателями, характеристиками исследуемого объекта или явления.

В качестве примера конструирования модели с неполным обоснованием рассмотрим построение интерпретационной схемы для сравнения геотермических условий в нижней зоне земной коры по характеристике изменения сейсмической скорости. Информацию об этой зоне, сложенной магматическими и метаморфическими породами преимущественно основного состава и ограниченной сейсмическими границами Конрада и Мохо, получают с помощью

глубинных сейсмических зондирований и обменных волн землетрясений. По сейсмическим данным определяют глубину h_0 поверхности базальтового слоя, его толщину Δh , положение промежуточных границ и дифференциацию с глубиной h скорости $v_p = v$ распространения продольных упругих колебаний. При аномально низких значениях скорости v в базальтовом слое и в верхней мантии предполагают повышенный разогрев вещества. Такие зоны составляют небольшую часть изученных регионов.

Для ориентировочной и сравнительной оценки геотермических условий в нижней части земной коры попытаемся использовать данные об изменении функции $v(h)$ в толще пород базальтового слоя. Дифференциация пород по скорости, так же как и пониженное значение скорости v , в общем случае отражает проявление нескольких причин. Наряду с дифференциацией вещества по составу в условиях переменного давления и температуры график $v(h)$ может зависеть от времени проявления процесса диффузии, от близости внутреннего состояния вещества базальтового слоя к состоянию термодинамического равновесия. Однако если сопоставляемые регионы сходны по своей геологической истории (время, интенсивность и направление тектонических движений, характер магматизма и т. д.), то число неодинаково действующих факторов существенно уменьшается. В связи с этим открывается принципиальная возможность сравнения регионов по их глубинным геотермическим условиям.

Поведение функции $v(h)$ в толще пород нижней части земной коры рассматриваем как отражение изменения давления p , температуры T и вещественного состава S , причем давление создается весом вышележащих пород, а вещественный состав изменяется вследствие увеличения с глубиной концентрации плотных минералов (аналогично тому, как в лабораторных экспериментах по кристаллизации базальта кристаллы оливина и пироксена концентрируются в нижних частях трубок, даже если температура меньше, чем температура образования силикатного ликвида).

Формальная постановка задачи такова:

$$\text{причем} \quad v(h) = f(p, T, S), \quad (13.8)$$

$$p = p(h, S); \quad (13.9)$$

$$S = S(p, T, S_0), \quad (13.10)$$

где f — некоторая функция; S_0 — «вклад» в величину S , определяемый особенностями формирования и историей развития земной коры, который по условию задачи одинаков для сопоставляемых районов.

Отсюда

$$v(h) = f(h, S_0, T). \quad (13.11)$$

Фиксируя различия глубин h , можно путем сравнения функций $v(h)$ подойти к оценке разницы температур T .

Для сравнительной оценки температуры используем уравнение дифференциации твердого раствора в поле силы тяжести. Полагаем, что имеются две компоненты раствора: более плотная A и менее плотная B . В составе вещества нижней части земной коры может быть и большее число компонент. В этом случае величины A и B представляют некоторые группы компонент с их усредненными характеристиками.

Исходное уравнение имеет вид [4]

$$RT d \ln \xi = \left[V_A \frac{\xi M_A + (1-\xi) M_B}{\xi V_A + (1-\xi) V_B} - M_A \right] (-g dh), \quad (13.12)$$

где R — газовая постоянная; ξ — концентрация плотной компоненты A (в мольных долях); V_A, V_B — мольные объемы компонент A и B ; M_A, M_B — мольные массы компонент A и B ; g — ускорение свободного падения (силы тяжести).

Уравнение (13.12) преобразуем к виду

$$RT \frac{d \ln \xi}{dh} = g \frac{(1-\xi) V_A V_B (M_A/V_A - M_B/V_B)}{\xi V_A + (1-\xi) V_B}, \quad (13.13)$$

откуда

$$T = gR^{-1} \left(\frac{d \ln \xi}{dh} \right)^{-1} \frac{V_A V_B (1-\xi) \Delta \rho}{\xi V_A + (1-\xi) V_B}, \quad (13.14)$$

где $\Delta \rho = M_A/V_A - M_B/V_B$.

Вычислим отношение правых и левых частей уравнения (13.14) для двух районов, соответственно всем переменным присваиваем индексы 1 и 2:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{(d \ln \xi/dh)_2 \Delta \rho_1 V_{A1} V_{B1} (1-\xi_1) [\xi_2 V_{A2} + (1-\xi_2) V_{B2}]}{(d \ln \xi/dh)_1 \Delta \rho_2 V_{A2} V_{B2} (1-\xi_2) [\xi_1 V_{A1} + (1-\xi_1) V_{B1}]}. \quad (13.15)$$

Учитывая, что

$$\frac{\xi_2 V_{A2} + (1-\xi_2) V_{B2}}{\xi_1 V_{A1} + (1-\xi_1) V_{B1}} = \frac{V_{B2} (1-\xi_2) \{1 + \xi_2 V_{A2}/[(1-\xi_2) V_{B2}]\}}{V_{B1} (1-\xi_1) \{1 + \xi_1 V_{A1}/[(1-\xi_1) V_{B1}]\}},$$

получаем

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{(d \ln \xi/dh)_2 \Delta \rho_1 V_{A1}}{(d \ln \xi/dh)_1 \Delta \rho_2 V_{A2}} \left\{ \frac{1 + \xi_2 V_{A2}/[(1-\xi_2) V_{B2}]}{1 + \xi_1 V_{A1}/[(1-\xi_1) V_{B1}]} \right\}. \quad (13.16)$$

Дробь, заключенную в фигурные скобки, обозначим y , ее значение близко к единице. С учетом этого

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{y \Delta \rho_1 V_{A1} (d \ln \xi/dh)_2}{\Delta \rho_2 V_{A2} (d \ln \xi/dh)_1}. \quad (13.17)$$

Принимая во внимание, что

$$\frac{d \ln x}{dh} = \frac{d \ln x}{dx} \cdot \frac{dx}{dh} = \frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{dh},$$

и переходя от бесконечно малых приращений к конечным разностям, получаем

$$d \ln \xi / dh \approx \Delta \xi / (\xi \Delta h). \quad (13.18)$$

Соответственно для неодинаковых в общем случае приращений по h имеем

$$\frac{(d \ln \xi / d \ln h)_2}{(d \ln \xi / d \ln h)_1} \approx \frac{(\Delta \xi_2 / \xi_2) \Delta h_1}{(\Delta \xi_1 / \xi_1) \Delta h_2}. \quad (13.19)$$

Отсюда

$$\frac{T_1}{T_2} \approx y \frac{\Delta \rho_1 V_{A1} \Delta h_1}{\Delta \rho_2 V_{A2} \Delta h_2} \cdot \frac{\Delta \xi_2 / \xi_2}{\Delta \xi_1 / \xi_1}. \quad (13.20)$$

При малых относительных изменениях концентраций плотной компоненты с достаточным приближением можно принять

$$\frac{\Delta \xi_2 / \xi_2}{\Delta \xi_1 / \xi_1} = \frac{\Delta v_2 / v_2}{\Delta v_1 / v_1}.$$

Окончательно получаем

$$\frac{T_1}{T_2} \approx K \frac{(\Delta v_2 / v_2) \Delta h_1}{(\Delta v_1 / v_1) \Delta h_2}. \quad (13.21)$$

Множитель K близок к единице:

$$K = y \frac{\Delta \rho_1 V_{A1}}{\Delta \rho_2 V_{A2}}. \quad (13.22)$$

В числителе и знаменателе дроби стоят близкие величины. Задаваясь некоторым диапазоном вариаций y , $\Delta \rho_1 / \Delta \rho_2$ и V_{A1} / V_{A2} , можно оценить случайные вариации множителя K . При независимых вариациях и равномерном распределении этих трех величин в интервале от 0,95 до 1,05 критические значения K для вероятности 0,9 равны 0,92 и 1,11.

Обратимся к практическому примеру. В табл. 13.4 представлены сводные данные о разрезах земной коры Ферганской межгорной впадины и Предкокетдагского краевого прогиба [4]. Эти сведения используем для сравнения температур T_1 и T_2 .

Подстановка значений, относящихся ко всему базальтовому слою, дает

$$\frac{T_2}{T_1} \approx \frac{32.5}{32.2} \cdot \frac{0.103}{0.075} \approx 1.37 > 1.11.$$

Соответственно для нижней части базальтового слоя получаем

$$\frac{T_2}{T_1} \approx \frac{19.0}{16.1} \cdot \frac{0.049}{0.036} \approx 1.6 > 1.11.$$

ТАБЛИЦА 13.1

Исходные данные для сравнения глубинных геотермических условий

Характеристика сейсмического разреза земной коры	Предкопетдагский прогиб	Ферганская впадина
Мощность, км		
земной коры в целом	51	52
осадочного слоя	8	9
базальтового слоя	32,5	32,2
нижней части базальтового слоя	19,0	16,1
Скорость распространения продольных волн, км/с		
на верхней границе базальтового слоя (v_0)	6,7	6,8
на промежуточной границе (v'_0)	Скачок от 6,7 до 7,2	Скачок от 6,8 до 7,5
то же, при замене скачкообразного изменения монотонным	$(6,7 + 7,2) : 2 = 6,95$	$(6,8 + 7,5) : 2 = 7,15$
на нижней границе базальтового слоя	7,2	7,5
Относительное изменение скорости v/v_0		
приращение в базальтовом слое	$7,2/6,7 = 1,075$	$7,5/6,8 = 1,103$
приращение в нижней части базальтового слоя	0,075	0,103
приращение в базальтовом слое	$7,2/6,95 = 1,036$	$7,5/7,15 = 1,049$
приращение в нижней части базальтового слоя	0,036	0,049

Таким образом, дифференциация сейсмической скорости с глубиной показывает, что нижняя часть земной коры Предкопетдагского прогиба находится в более разогретом и, видимо, менее устойчивом состоянии. С этим заключением согласуются данные о наличии термальной линии Копетдага и о повышенной сейсмичности этого региона.

Итак, выведено приближенное уравнение, его применение к практическим разрезам земной коры дало правдоподобный результат. Какие сомнения возникают при рассмотрении этой модели, в чем проявляется неполнота ее обоснования?

1. Модель рассчитана на сравнение изменений скорости. Однако скачкообразный, а не монотонный характер изменения скорости v допускает существование дополнительных причин физического и химического происхождения кроме рассматриваемой дифференциации твердого раствора в поле силы тяжести.

2. Модель не предусматривает наличия зон уменьшения скорости — сейсмических волноводов.

3. Модель имела бы существенно более сильное обоснование, если бы удалось индуктивно подтвердить намеченную связь дифференциации скорости с действительным изменением температуры.

Выполнение последнего пункта требует в свою очередь привлечения нескольких десятков сейсмических разрезов земной коры, имеющих оценку изменения температуры как функции от глубины. Такая оценка нуждается в точном измерении теплового потока, тщательном обосновании тепловыделения, соответствующего раз-

ным горизонтам земной коры; кроме того, нужны сведения об изменении теплопроводности и теплоемкости горных пород в зависимости от их состава и температуры. Для численного определения температуры с помощью традиционных алгоритмов потребовалось бы предварительно обосновать стационарность теплового режима. Наконец, надо показать значимость связи между изменениями температуры и соответствующими изменениями скорости. Если бы все это было выполнено и была показана значимость связи $(v/v_0)_1/(v/v_0)_2 = f(T_1/T_2)$, видимо, мы имели бы некоторую новую модель, которая включала бы приведенную выше лишь как существенный, но далеко не единственный элемент.

Модели с неполным обоснованием используются, к сожалению, слишком часто, сюда относятся: интерпретация магнитных аномалий с учетом лишь одной компоненты намагниченности (индуцированной современным магнитным полем) без анализа влияния остаточной намагниченности; интерпретация сейсмических данных о строении блоков сложной синклинальной структуры, выполненной эффузивно-осадочными образованиями, без учета преломления сейсмических лучей на промежуточных границах; интерпретация результатов детальной гравиразведки без учета переменной плотности и мощности рыхлых отложений. Список таких примеров легко продолжить.

Путь построения модели с достаточно полным обоснованием покажем на примере сейсмической модели, предназначенной для изучения структур осадочных пород в сложных сейсмогеологических условиях [11]. Фактическую основу для построения модели составили три группы данных.

1. Результаты геологических и геофизических исследований разрезов скважин.

2. Сведения о природе, стратиграфической привязке и основных особенностях сейсмических волн, полученные при их экспериментальном изучении в скважинах и вблизи скважин с помощью вертикального сейсмического профилирования.

3. Материалы позиционных (полевых) сейсмических исследований в районах, примыкающих к скважинам.

Как видим, исходные данные обеспечивают монотонный переход от объекта изучения (геологический разрез) к его физическому отображению (поля сейсмических волн).

Построение модели было начато с совместного рассмотрения данных по всем трем группам и имело своей целью аппроксимацию распределения скорости v по геологическому разрезу. С учетом материалов каротажа, вертикального сейсмического профилирования и полевых сейсмических работ построена кусочно-линейная зависимость $v(h)$, учитывающая наличие нескольких десятков слоев. Каждый слой и каждая граница между слоями проверены по их проявлению в волновых полях. Сохранены те реперы, с которыми можно связывать наблюдаемые отраженные волны. Осуществлены стратиграфическая привязка отраженных

волн, отождествление и кинематическое согласование всей системы отраженных и кратных волн. По материалам вертикального профилирования изучена форма импульса прямой волны.

Результаты первой аппроксимации использованы для решения прямых задач (случай горизонтально-слоистой среды, включающей 35 слоев). Вычислены поля отраженных и кратных волн, причем только для расчета трехкратных волн, связанных с одним из интервалов геологического разреза, учтено 60 семейств суммарных волн, или 217 млн. элементарных волн.

Для уточнения параметров модели при второй аппроксимации за основу взяты результаты вертикального сейсмического профилирования (вторая группа исходных данных), включающие годографы прямой и отраженной волн, их амплитудные кривые и коэффициенты отражения. При сопоставлении теоретических и экспериментальных полей и введении корректур в модель достигнуто согласие коэффициентов отражения.

Третья аппроксимация модели учитывала в качестве основы материалы полевых наблюдений (третья группа исходных данных). Приняты к сведению экспериментальные данные об амплитудах волн и еще раз внесены коррективы в перепады скорости на границах слоев и в коэффициенты отражения.

Таким образом, при каждой аппроксимации обращались к экспериментальным материалам определенной группы, последовательно уточняя все более тонкие детали. Вместе с тем окончательная адаптация модели осуществлена на основе сведений того же типа, что и данные, подлежащие интерпретации с помощью модели.

ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЙ И СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ

В зависимости от используемого математического описания модели интерпретации геофизических данных подразделяются на детерминистические и стохастические. Несомненно, что описание отдельных звеньев и элементов модели в свою очередь может быть различным. В связи с этим целесообразно разделить описание собственно модели (ее главной части) и разного рода помех. Описание собственно модели характеризует геологическую среду и физический процесс (явление).

Формальное решение задачи интерпретации в большинстве случаев представляется в виде некоторых оценок параметров. Вектор параметров определяется с погрешностью и в этом смысле является случайным. В зависимости от специфики задач, уровня разработки теории и других обстоятельств могут иметь место приведенные ниже сочетания математических описаний геологической среды, физического процесса (явления), сопутствующих помех и решения задачи.

Описание главной части модели	Описание помех	Описание решения
Детерминистическое	Отсутствует	Детерминистическое
Детерминистическое	Стохастическое (не раз- вернутое)	Стохастическое
Детерминистическое	Стохастическое (подроб- ное)	Стохастическое
Стохастическое	Стохастическое (не раз- вернутое)	Стохастическое
Детерминистическое для одной части, стохастическое для другой	Стохастическое (подроб- ное)	Стохастическое

Многие годы теория интерпретации данных геофизики развивалась на основе классического детерминистического подхода. Фундаментальное предположение этого подхода заключается в том, что результаты измерений физического поля можно отождествить с одним из вариантов теоретически вычисленного поля и тем самым оценить значение соответствующих геометрических и физических параметров. Для специалистов-геофизиков с самого начала применения теории, основанной на детерминистическом подходе, было ясно, что такое отождествление возможно лишь с определенной погрешностью. Кроме того, исследования теории потенциальных полей показали, что в ряде моделей не удастся избежать проявления принципа эквивалентности (в общем случае — конвергентности) даже при наличии весьма точных или абсолютно точных данных. Поэтому при использовании детерминистических моделей интерпретации следует сохранять определенную ясность в отношении присутствующих им сильных и слабых сторон.

Потребность учесть при интерпретации влияние ошибок измерения и разнообразных помех в более широком смысле слова стимулировала развитие теоретических исследований, в которых наряду с детерминистическим описанием главной части модели учитываются стохастические характеристики помех. По существу, это означает отказ от детерминистической модели и переход к модели стохастической. В развитие и обоснование такой постановки задачи интерпретации большой вклад внесли Ф. М. Гольцман, С. В. Гольдин, Л. А. Халфин и другие исследователи [3, 12].

Требование включить описание помех непосредственно в модель интерпретации принципиально верно. Однако учитываемое слишком последовательно и абсолютизируемое, оно породило немало формальных трудностей. Вот один из примеров. Если гравитационное и магнитное аномальные поля обладают свойствами аналитических функций, а помехи такими свойствами не обладают, то, следовательно, ими не обладает и тот эмпирический материал, который подлежит обработке и интерпретации. В рамках обычного детерминистического подхода специалисты-геофизики получали определенные результаты, даже не зная подробно свойств помех, при условии, что точность измерений не была высокой. Теперь,

обладая более высокоточными материалами, геофизики лишены возможности использовать некоторые сильные стороны математического аппарата (теории аналитических функций), так как они знают, что само обращение к этому аппарату необоснованно.

Приведенное рассуждение является образцом того, как в логике научного знания незаслуженно большое место начинают занимать вопросы деонтической модальности. Конструкторам машин давно известно, насколько важно согласовать требования к качеству отдельных узлов, особенно сопряженных друг с другом. В равной мере и конструирование моделей интерпретации учитывает, что нельзя безупречную строгость одних положений сочетать с грубой приближенностью других, если последние относятся к той же стороне модели. Для обоснования моделей интерпретации важно многое, в том числе знание действительных, а не предполагаемых свойств помех. Изучение помех — очень большая проблема, не менее обширная, чем развитие теории, в которой помехи учитываются в общем виде.

Помехи, искажающие экспериментальные геофизические материалы и усложняющие интерпретацию, имеют различное происхождение. Часть из них прямо или косвенно зависит от исследователя: это помехи, связанные с аппаратурой, способами и качеством ее применения, с методикой наблюдений и обработкой данных. Самостоятельным классом помех представляется в экспериментальных данных сложность геологической среды (гетерогенность физических свойств, изменение геологической природы границ и др.). Наконец, различия экспериментальных и теоретических полей зависят и от теоретических положений. Бывает, что они не всегда точно описывают физические процессы: либо эти процессы недостаточно подробно изучены, либо (что гораздо чаще) процессы известны с необходимой полнотой, однако привлекается упрощенное их описание (отбрасываются некоторые эффекты, члены разложений и т. п.).

В связи с обсуждением проблемы помех, свойства которых учитываются некоторыми моделями интерпретации, полезно остановиться несколько подробнее на характеристике исходных данных, подразделив их по степени общности, завершенности и присутствию субъективного начала. При интерпретации используются как исходные, первичные, материалы, так и некоторые промежуточные результаты обобщения фактов (своего рода полуфабрикаты, удобные для обработки); кроме того, привлекаются такие данные, которые с определенных позиций можно рассматривать как вполне законченные результаты интерпретации, это итоги самостоятельных исследований, проведенных ранее в связи с решением каких-то других, может быть, более частных задач.

Первичные данные, т. е. значения скалярных и векторных величин, полученные в точках, на линиях и площадях наблюдений, приобретают некоторые черты общности и различий, что зависит от использованной аппаратуры, условий проведения

исследований, квалификации персонала, стабильности рабочих групп и от многого другого. Значения помех обычно не превосходят пределов, предусмотренных инструкциями, однако коррелированность помех может варьировать в широких пределах.

На уровне промежуточных обобщений приобретают значение такие факторы, как геологическая привязка геофизических горизонтов, общие или разные графики средних скоростей и т. п. При использовании результатов «чужой» интерпретации приходится учитывать авторское видение определенных проблем, приверженность к некоторым концепциям, желание и возможность применить определенные приемы обработки материалов, специфику самих приемов и многое другое. Поэтому при обращении к данным, которые поступают из разных источников, неизбежны встречи с неувязками и расхождениями, которые нередко бывают намного больше тех значений, которые можно ожидать, ориентируясь только на погрешности измерений.

Проблема увязки данных наиболее строго и полно решена для относительно простых вариантов наблюдений — для тех случаев, когда рассматривается скалярная величина (аномалия Δg) или вектор с небольшим числом компонент. Уже разработаны вопросы увязки векторных величин, которые в каждом пункте наблюдений характеризуются длинным списком компонент. Так, при сейсмических исследованиях различие материалов нескольких авторов может выражаться в наличии дополнительной системы границ, подчеркивании определенных углов наклона площадок, смещении опорных горизонтов и т. п. Помехи такого рода, выявляемые при «стыковке» съемок, теоретически не исследованы, не установлены законы их распределения, не всегда даже ясно, является ли помеха аддитивной или мультипликативной. Существенную помощь в понимании величины и специфики помех оказывает экспертная оценка.

Большинство используемых в интерпретации моделей по описанию своей главной части являются детерминистическими. По мере роста сложности модели (включение многих контактов, границ, пластов, блоков) и соответствующего увеличения числа параметров возможность эффективной оценки параметров уменьшается. Вместе с тем далеко не все параметры, влияющие на распределение аномалий физического поля, представляют первоочередной интерес для решения геологических задач. Как правило, внимание привлекают несколько важнейших параметров, в том числе такие, которые сохраняют постоянство для группы тел. В связи с этим возникает проблема перехода к стохастическому описанию главной части модели наряду со стохастическим описанием поля аддитивных помех. Свертка информации, заключенной в сложных кривых, сложных сейсмограммах, позволяет получить обобщенную оценку небольшого числа параметров.

Конструирование стохастических моделей может быть осуществлено различными путями [2, 3, 6, 11—13]. Сложные задачи

распространения волн в твердых и жидких средах со стохастическим распределением характеристик сред решаются с использованием стохастического уравнения Ито — Ланжевена. При определенных ограничениях делается переход к уравнению Эйнштейна — Фоккера — Планка — Колмогорова. Этот математический аппарат использовал Б. Я. Гельчинский при разработке L_{∞} -моделей в сейсморазведке [2].

Применительно к задачам гравirazведки и магниторазведки наиболее доступны два подхода. Первый сохраняет определенную близость с обычным детерминистическим подходом и заключается в использовании статистических совокупностей аномалиеобразующих тел, каждое из которых описывается детерминистически. Второй подход заключается в непосредственном обращении к автокорреляционным функциям физических параметров среды (плотности, намагниченности), этим функциям ставится в соответствие автокорреляционная функция физического поля.

Рассмотрим реализацию первого подхода для достаточно общего случая — двумерного распределения магнитных масс, которому соответствует сложная кривая напряженности геомагнитного поля ΔT .

Обозначим символом $\Delta T_k(x)$ магнитную аномалию, связанную с k -м телом произвольного сечения при совмещении горизонтальной координаты центра тела с началом прямоугольной системы координат (x, h) . Если тело смещено по горизонтали на расстояние x_k , соответственно имеем аномалию $\Delta T_k(x - x_k)$. Комплексный спектр, или Фурье-изображение, функции $\Delta T_k(x)$

$$S_{\Delta T_k}(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta T_k(x) e^{-i\alpha x} dx. \quad (13.23)$$

Для функции $\Delta T_k(x - x_k)$ спектр имеет вид $S_{\Delta T_k}(\alpha) e^{i\alpha x_k}$.

Чтобы вычислить с необходимой точностью спектр аномалии, обусловленной одним телом, достаточно взять большие, но конечные пределы интегрирования по оси x . Так, для аномалии $\Delta T_1(x - x_1)$ берем интервал $0, L_1$, для аномалии $\Delta T_k(x - x_k)$ — интервал $0, L_k$ и т. д. Суммарная аномалия $\Delta T(x)$ образована последовательностью N аномалиеобразующих тел:

$$\Delta T(x) = \sum_{k=1}^N \Delta T_k(x - x_k). \quad (13.24)$$

С учетом условия

$$\Delta T_k \neq 0 \text{ при } L_k \geq x \geq 0; \Delta T_k = 0 \text{ при } x < 0 \text{ и при } x > L_k,$$

вычисляем

$$S_{\Delta T}(\alpha) = \int_0^{L_N} \sum_{k=1}^N \Delta T_k(x - x_k) e^{-i\alpha x} dx = \sum_{k=1}^N e^{i\alpha x_k} S_{\Delta T_k}(\alpha). \quad (13.25)$$

Известно, что в общем случае имеет место представление

$$\Delta T_k(x) = \lambda_1 Z_{Bk}(x) + \lambda_2 H_{Bk}(x), \quad (13.26)$$

где Z_{Bk} и H_{Bk} — вертикальная и горизонтальная компоненты напряженности аномального геомагнитного поля при вертикальной намагниченности k -го тела; λ_1 и λ_2 — безразмерные множители, зависящие от геомагнитной широты, азимута профиля наблюдений и др. С учетом этой формулы

$$S_{\Delta T_k}(\alpha) = \lambda_1 \int_0^{L_k} Z_{Bk}(x) e^{-i\alpha x} dx + \lambda_2 \int_0^{L_k} H_{Bk}(x) e^{-i\alpha x} dx. \quad (13.27)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} \int_0^{L_k} Z_{Bk}(x) e^{-i\alpha x} dx &= S_{Z_k}(\alpha) = \operatorname{Re} [S_{Z_k}(\alpha)] - i \operatorname{Im} [S_{Z_k}(\alpha)] = \\ &= \operatorname{Re}_k - i \operatorname{Im}_k, \end{aligned} \quad (13.28)$$

и примем во внимание [9], что

$$\int_0^{L_k} H_{Bk}(x) e^{-i\alpha x} dx = i \operatorname{sgn} \alpha S_{Z_k}(\alpha). \quad (13.29)$$

При этом выражение $S_{\Delta T_k}(\alpha)$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} S_{\Delta T_k}(\alpha) &= \lambda_1 S_{Z_k}(\alpha) + \lambda_2 (i \operatorname{sgn} \alpha) S_{Z_k}(\alpha) = \\ &= (\lambda_1 + i \operatorname{sgn} \alpha \lambda_2) (\operatorname{Re}_k - i \operatorname{Im}_k) = (\lambda_1 \operatorname{Re}_k + \lambda_2 \operatorname{sgn} \alpha \operatorname{Im}_k) + \\ &+ i (\lambda_2 \operatorname{sgn} \alpha \operatorname{Re}_k - \lambda_1 \operatorname{Im}_k) = a_{k1}(\alpha) + ia_{k2}(\alpha). \end{aligned} \quad (13.30)$$

Отсюда получаем

$$\begin{aligned} S_{\Delta T_k}(\alpha) e^{i\alpha x_k} &= (\cos(\alpha x_k) + i \sin(\alpha x_k)) (a_{k1}(\alpha) + ia_{k2}(\alpha)) = \\ &= \cos(\alpha x_k) (a_{k1}(\alpha) + ia_{k2}(\alpha)) - \sin(\alpha x_k) (a_{k2}(\alpha) - ia_{k1}(\alpha)) = \\ &= \cos(\alpha x_k) A_{k1}(\alpha) - \sin(\alpha x_k) A_{k2}(\alpha). \end{aligned} \quad (13.31)$$

Суммируя спектры отдельных тел, находим

$$S_{\Delta T}(\alpha) = \sum_{k=1}^N (A_{k1}(\alpha) \cos(\alpha x_k) - A_{k2}(\alpha) \sin(\alpha x_k)); \quad (13.32)$$

$$S_{\Delta T}^*(\alpha) = \sum_{m=1}^N (A_{m1}^*(\alpha) \cos(\alpha x_m) - A_{m2}^*(\alpha) \sin(\alpha x_m)). \quad (13.33)$$

Индекс * придан комплексно сопряженным величинам.

Произведение $S_{\Delta T}(\alpha)S_{\Delta T}^*(\alpha)$ позволяет найти энергетический спектр $G_{\Delta T}(\alpha)$ аномалии $\Delta T(x)$ геомагнитного поля: -

$$\pi G_{\Delta T}(\alpha) = \lim_{L_N \rightarrow \infty} (1/L_N) S_{\Delta T}(\alpha) S_{\Delta T}^*(\alpha). \quad (13.34)$$

Раскрывая выражение

$$S_{\Delta T}(\alpha) S_{\Delta T}^*(\alpha) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N (A_{k1} \cos(\alpha x_k) - A_{k2} \sin(\alpha x_k)) \times \\ \times (A_{m1}^* \cos(\alpha x_m) - A_{m2}^* \sin(\alpha x_m))$$

и представляя вновь величины A_k через a_k и далее через Re_k и Im_k , получаем

$$S_{\Delta T}(\alpha) S_{\Delta T}^*(\alpha) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^N \{ (a_{k1}a_{m1} + a_{k2}a_{m2}) [\cos(\alpha(x_k - x_m)) + \\ + i \sin(\alpha(x_k - x_m))] + (a_{k1}a_{m2} - a_{k2}a_{m1}) [\sin(\alpha(x_k - x_m)) - \\ - i \cos(\alpha(x_k - x_m))] \} = \sum_{k=1}^N (a_{k1}^2 + a_{k2}^2) + \\ + 2 \sum_{k=1}^N \sum_{m=k+1}^N [(a_{k1}a_{m1} + a_{k2}a_{m2}) \cos(\alpha(x_k - x_m)) + \\ + (a_{k1}a_{m2} - a_{k2}a_{m1}) \sin(\alpha(x_k - x_m))] = (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \times \\ \times \sum_{k=1}^N (\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2) \left[1 + 2 \sum_{m=k+1}^N \frac{\text{Re}_k \text{Re}_m + \text{Im}_k \text{Im}_m}{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2} \cos(\alpha(x_k - x_m)) + \right. \\ \left. + 2 \sum_{m=k+1}^N \frac{\text{Im}_k \text{Re}_m - \text{Re}_k \text{Im}_m}{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2} \sin(\alpha(x_k - x_m)) \right]. \quad (13.35)$$

Для дальнейших выкладок учтем, что

$$L_N = N \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k+1} - x_k) \approx Nb; \quad (13.36)$$

$$\lim_{L_N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2) = M [\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2]; \quad (13.37)$$

$$\lim_{L_N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\text{Re}_k \text{Re}_m + \text{Im}_k \text{Im}_m}{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2} \cos(\alpha(x_k - x_m)) \approx \\ \approx r_{km} M [\cos(\alpha(x_k - x_m))]; \quad (13.38)$$

$$\lim_{L_N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\text{Im}_k \text{Re}_m - \text{Re}_k \text{Im}_m}{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2} \sin(\alpha(x_k - x_m)) \approx 0, \quad (13.39)$$

где r_{km} — нормированная функция автокорреляции (коэффициент корреляции) комплексного спектра при переходе от k -го тела к телу, находящемуся от него на расстоянии $(x_k - x_m)$; M — математическое ожидание.

С учетом выражений (13.34), (13.36)—(13.39) получаем уравнение, позволяющее вычислить автокорреляционную функцию $B(\tau)$ магнитного поля $\Delta T(x)$ для стохастической совокупности тел произвольного, но зафиксированного типа:

$$\begin{aligned}
 B(\tau) &= \lim_{L_N \rightarrow \infty} \frac{1}{L_N} \int_0^{L_N} \Delta T(x) \Delta T(x - \tau) dx = \\
 &= \int_0^\infty G_{\Delta T}(\alpha) \cos(\alpha\tau) d\alpha \approx (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \pi^{-1} b^{-1} \int_0^\infty \left\{ M(\operatorname{Re}_k^2(\alpha) + \right. \\
 &+ \operatorname{Im}_k^2(\alpha)) \{ 1 + 2r_{k, k+1} M[\cos(\alpha(x_{k+1} - x_k))] + 2r_{k, k+2} M[\cos(\alpha \times \\
 &\quad \times (x_{k+2} - x_k))] + \dots \} \cos(\alpha\tau) d\alpha. \quad (13.40)
 \end{aligned}$$

Приведенные выше формулы для функции $B(\tau)$ и энергетического спектра $G_{\Delta T}(\alpha)$ могут быть использованы для решения разнообразных задач, связанных с оптимальной фильтрацией аномалий разной геологической природы (например, разных этажей намагниченных тел). Полученные ранее решения для частных случаев [6] оказались полезными, поэтому есть основания ожидать, что рассмотренный общий случай найдет практическое применение.

Детерминистические и стохастические модели не следует противопоставлять друг другу, как это иногда делается; не меньшие различия могут быть обнаружены и внутри каждого из этих классов. Решающее значение имеет не способ описания, а степень адекватности описания природным ситуациям и конструктивность моделей. Предпочтительность того или иного способа зависит также и от многих других обстоятельств, учитываемых при рассмотрении триады цель — средства — результаты.

14

ВЕРИФИКАЦИЯ ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫХ СХЕМ ГЕОФИЗИКИ НА ЭМПИРИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

В развитии разнообразных подходов, методик, способов геологической интерпретации геофизических данных нередко удается проследить определенную последовательность. Начальный этап связан с зарождением и обоснованием идеи о возможной

связи некоторой геофизической характеристики с наличием искоемых геологических объектов или с вариациями изучаемых особенностей этих объектов. Эмпирическую проверку реальности идеи обычно осуществляют в специально выбранных и четко фиксированных геологических условиях, причем наряду с оценкой роли отдельных факторов создаются элементы теории, реализуемые в виде формул, номограмм, палеток, алгоритмов.

Далее идет этап широкого внедрения разработок, в том числе в условиях, оказывающихся последовательно все менее похожими на те, в которых проходило формирование и первоначальное опробование метода. Наконец, наступает этап верификации интерпретационной схемы на основе накопленных эмпирических данных. На этом этапе уточняют область применения интерпретационной схемы и получают новое знание о том, как различные геологические явления выражаются в рассматриваемой геофизической характеристике.

ПУТИ ВЕРИФИКАЦИИ ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫХ СХЕМ

Верификация интерпретационных схем может быть осуществлена по некоторым итоговым величинам, на основании которых судят о пригодности (качестве) схемы в целом, или путем последовательной проверки и оценки качества ее отдельных звеньев. Первый путь в определенных аспектах проще и короче, однако не всегда доступен. Второй удобен в том отношении, что позволяет получить более полное и ясное представление о разных сторонах исследуемой интерпретационной схемы (модели), при этом даже в мертворожденных схемах удается вычлнить здоровые части — работающие элементы.

Возможности и оптимальные способы верификации существенно зависят от уровня (локальный, региональный, глобальный); которому принадлежит проверяемая схема (модель). Специфика локальных моделей такова, что для них гораздо проще осуществить верификацию, опираясь на итоговые, интегральные, величины. Результаты, полученные на основе локальной модели (оценки глубин, представленные разрезами и структурными картами, объемы блоков, массы руды и др.), проверяются с помощью бурения и горных выработок. Эти данные позволяют оценить надежность интерпретации, выявить случайные и систематические ошибки решений и соответственно скорректировать модель.

Специально поставленные технические эксперименты в ряде случаев дают исчерпывающую информацию и обеспечивают возможность верификации интерпретационной схемы без обращения к горным и буровым работам. Примером может служить проверка качества приемов количественной интерпретации магнитных аномалий по результатам разновысотных аэромагнитных съемок в районах с обнаженным фундаментом. Контролируемая высота полета

определяет глубину залегания верхних кромок магнитных масс, наземное изучение обнаженного фундамента позволяет найти ошибки, с которыми вычисляются горизонтальные размеры намагниченных тел, значение и направление намагниченности пород.

При изучении глубинного строения земной коры проверка на глубину 7—10 км и более практически исключается, так как существуют или проектируются лишь отдельные скважины, которые смогли бы доставить соответствующую информацию. Уникальный случай проверки бурением данных сейсморазведки о строении блока кристаллической толщи земной коры, сложенного вулканогенными образованиями, показал, что при наличии гетерогенной среды, сложных границ и при использовании весьма упрощенных моделей ошибка определения пространственного положения структурных элементов может достигать 25—30%. Для сравнения отметим, что соответствующие интерпретационные модели, применяемые для изучения более однородных толщ осадочных пород и отличающиеся большей адекватностью геологической реальности, обеспечивают оценку положения структурных элементов с ошибкой, которая редко превышает 10%, обычно она составляет лишь 3—5%.

Оценка по итоговым величинам — это проверка интерпретационной схемы как функционирующего «черного ящика», без анализа работы его звеньев (частей). В том случае, когда требуется более подробно определить работоспособность отдельных элементов интерпретационной схемы, необходимое заключение можно получить, используя специальные тесты и эксперименты. Чтобы объективно судить, как отдельные переменные (аргументы) влияют на изучаемые отклики, т. е. на значения функции нескольких аргументов, необходимо использовать специально сбалансированные эксперименты, которые построены по планам, обладающим рядом свойств (ортогональность, ротатабельность и др.). Сбалансированные эксперименты не допускают, чтобы при сопоставлении эффекта и причины проявилось в замаскированном виде влияние других сопутствующих причин. Планы оптимальных экспериментов разработали и табулировали Дж. Кифер, Г. Бокс, К. Кацумаца и др. [13, 14]. Типичные планы включают десятки экспериментов с разными комбинациями условий. Практически такие планы можно использовать лишь при очень широком выборе экспериментальных данных (сами данные должны быть получены в соответствии с планом). Более доступны простые планы экспериментов, предусматривающие последующую обработку материалов с помощью дисперсионного анализа.

Проверку корректности интерпретационной модели с помощью дисперсионного анализа покажем на примере результатов индуктивной электропроводки, полученных в Карело-Кольском регионе [10]. При геологическом объяснении аномалий используют аналитические решения, соответствующие идеализированным условиям. Сравнительно удобные для расчетов соотноше-

ния получены для модели пласта пренебрежимо малой толщины — электрического проводника, который заключен в однородную среду с высоким электрическим сопротивлением. Рудные тела, обнаруженные на участках Парандово, Колосйюки, Аннама, имеют пластовую форму и мощность, варьирующую от 2—5 до 15—20 м. Вмещающие породы в целом обладают повышенным электрическим сопротивлением, значение которого зависит от основного типа пород (эффузивы, гнейсы).

Дисперсионный анализ результатов измерений (табл. 14.1), выполненных при разной частоте гармонических колебаний переменного магнитного поля и разных параметрах измерительной установки, показал, что в большинстве случаев существует надежная и практически линейная зависимость интенсивности аномалий от логарифма частоты и от разноса установки. Эти соотношения значимы с доверительной вероятностью 0,95—0,99, которая несколько варьирует в зависимости от условий, подтверждая правомерность принятой идеализированной модели (исключение составляют районы, где развиты толщи низкоомных филлитовидных сланцев).

ТАБЛИЦА 14.1

Результаты дисперсионного анализа интенсивности электромагнитных аномалий в зависимости от логарифма частоты и от разноса установки

Варируемые характеристики измерений	Участки электроразведочных работ			
	Парандово	Колосйюки	Северное Онки	Аннама
Частота, Гц: 312, 1250, 5000	$F = 2,6 >$ $> F_{0,75} = 1,5$		$F = 9,3 >$ $> F_{0,9} = 5,46$	
	$F_{\text{лин}} = 5,1 >$ $> F_{0,95} = 4,41$		$F_{\text{лин}} = 2,0 \approx$ $\approx F_{0,75} = 2,02$	
76, 312, 1250		$F = 5,2 >$ $> F_{0,95} = 5,14$		
		$F_{\text{лин}} = 10,1 >$ $> F_{0,95} = 5,99$		
375, 1125, 3375				$F = 5,25 >$ $> F_{0,99} = 5,2$
				$F_{\text{лин}} = 10,3 >$ $> F_{0,995} = 8,87$
Разнос, м: 20, 40, 60, 80	$F = 10,4 >$ $> F_{0,9995} = 7,39$		$F_{\text{лин}} = 16,9 >$ $> F_{0,95} = 10,1$	

Примечание. Величина F — дисперсионное отношение; сравнивается с теоретическим критическим значением, соответствующим заданной доверительной вероятности.

Применение дисперсионного анализа для верификации интерпретационной модели облегчается в тех случаях, когда исследователь может дискретно изменить значения переменных (аргу-

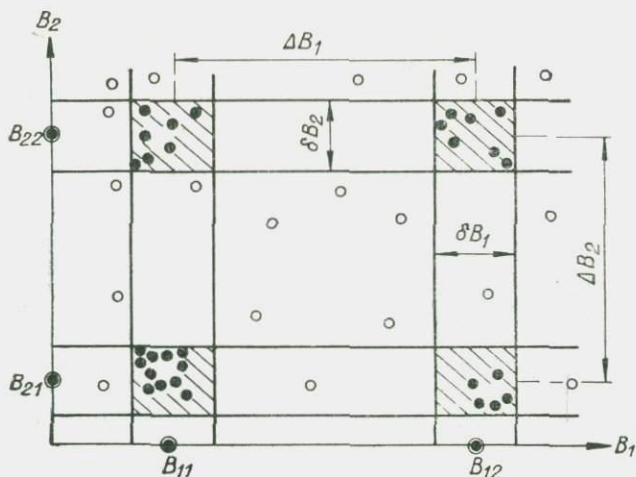


Рис. 14.1. Схема подбора результатов пассивных экспериментов для последующего дисперсионного анализа.

ментов). Такая возможность обеспечена в активных экспериментах, но не для всех без исключения переменных, а только для тех, которые характеризуют схему измерений и применяемую аппаратуру.

Специальную задачу представляет сведение результатов пассивных экспериментов (в которых исследователь не имеет возможности самостоятельно задавать необходимые значения аргументов) к результатам активных экспериментов. Каждый эксперимент рассматривается как некоторая точка в пространстве исследуемых параметров B_i , $i = 1, 2, 3, \dots$. Имея набор экспериментальных данных, которым соответствует множество точек B_1, B_2, B_3, \dots , надо отобрать такие данные, которые образуют узлы геометрически правильной многомерной решетки. Для этого вырезаются области, центры которых разделены заданными интервалами $\Delta B_i = \text{const}$. Поперечные размеры δB_i вырезанных областей должны быть значительно меньше, чем интервалы ΔB_i .

Сложность проблемы состоит в необходимости согласовать противоречивые требования. При малых размерах δB_i значительная часть исходных данных выпадает из дисперсионного анализа. При увеличении стороны δB_i возрастает дисперсия, с которой фиксируется положение центров вырезанных областей, ибо число точек, попадающих в эти области, неодинаково, расположение точек внутри каждой области индивидуально и соответственно центры тяжести совокупности точек внутри каждой области по-разному смещаются от геометрических центров узлов объемной решетки.

Поясним задачу на примере двумерной области (рис. 14.1). Множество точек на плоскости $B_1 B_2$ подразделяем на два подмно-

жества. Точки, попавшие в вырезанные (заштрихованные) зоны, используем для проведения дисперсионного анализа, остальные точки исключаем. Величины B_{11} , B_{12} , B_{21} , B_{22} , ΔB_1 , ΔB_2 , δB_1 , δB_2 надо выбрать таким образом, чтобы их значения обеспечили минимум функции

$$F = a_1 [n_2 / (n_1 + n_2)] + a_2 \sigma_T^2 + a_3 \sigma^2, \quad (14.1)$$

где n_1 — число используемых точек; n_2 — число исключаемых точек; σ_T — стандартное отклонение центра тяжести группы точек от геометрического центра соответствующей области; σ — стандартное отклонение величины σ_T от среднего значения по четырем областям; a_1 , a_2 , a_3 — коэффициенты линейной комбинации минимизируемых величин.

Задачу определения минимума функции F можно решать способом перебора или другими, более совершенными методами поиска экстремума.

МОДЕЛЬ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КОРЫ И МАНТИИ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ГРАВИМЕТРИИ

Изложенные выше соображения используем для верификации интерпретационной схемы, на основании которой вычисляются гравитационные аномалии, связанные со слоистым строением литосферы. Эта модель является основной для совместной интерпретации результатов гравиметрии, глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) и метода обменных волн землетрясений (МОВЗ). Сейсмические данные играют роль опорных для гравиметрических материалов. Сведения о распределении аномалий силы тяжести по площади используются для экстраполяции сейсмических оценок глубин, полученных на профилях наблюдений. Соответствующие расчеты базируются на следующих исходных положениях.

1. Изменение скорости v продольных волн в каком-либо слое и от слоя к слою сопровождается соответствующим изменением плотности ρ ($d\rho/dv = \text{const}$ — известная величина).

2. Гравитационная аномалия, отвечающая совокупности слоев, т. е. модели в целом, аддитивно учитывает гравитационные эффекты отдельных слоев.

Аналитическое выражение гравитационной аномалии Δg в случае горизонтального залегания двух слоев имеет вид

$$\Delta g = 2\pi f (d\rho/dv) [(v_1 - \bar{v}_n) h_1 + (v_2 - \bar{v}_n) (h_2 - h_1)], \quad (14.2)$$

где f — гравитационная постоянная; v_1 и v_2 — скорость продольных волн соответственно в верхнем и нижнем слое ($v_2 >$

$> v_1$); \bar{v}_s — средняя скорость продольных волн в литосфере; h_1 и h_2 — глубина подошвы соответственно верхнего слоя (верхняя граница находится на уровне моря) и нижнего слоя.

Аналитическое выражение существенно усложняется в случае криволинейных границ. Формула (14.2) сохраняет свою роль при условии, что учитываются лишь средние значения глубины и аномалии, определенные на интервалах, которые во много раз больше глубины.

Применительно к изучению земной коры и верхней мантии можно считать, что $h_1 = H_M$ — глубине поверхности Мохо, $v_1 = \bar{v}$ — средней скорости продольных волн в земной коре, $v_2 = v_M$ — граничной скорости сейсмических волн вдоль поверхности Мохо (для «толстых» слоев значения пластовой и граничной скорости совпадают). Равенство $v_2 = v_M$ справедливо для самой верхней части мантии, примерно до уровня 5—10 км глубже поверхности Мохо. Оценку скорости на большей глубине можно получить лишь при наличии дополнительной информации, которая не всегда есть. Величина h_2 точно не известна, но по условию задачи принимается постоянной. Глубже уровня h_2 аномальные массы отсутствуют, в противном случае выражение Δg должно содержать дополнительные члены.

Рассмотрим поведение величины Δg при изменении переменных h_1 , v_1 , v_2 . С этой целью вычислим производные

$$\partial(\Delta g)/\partial h_1 = -2\pi f(d\rho/dv)(v_2 - v_1); \quad (14.3)$$

$$\partial(\Delta g)/\partial v_1 = 2\pi f(d\rho/dv)h_1; \quad (14.4)$$

$$\partial(\Delta g)/\partial v_2 = 2\pi f(d\rho/dv)(h_2 - h_1). \quad (14.5)$$

Как видно, при $d\rho/dv = \text{const}$ производная $\partial(\Delta g)/\partial h_1$ отрицательна, прямо пропорциональна разности $(v_2 - v_1)$ и не зависит от глубины h_1 ; производная $\partial(\Delta g)/\partial v_1$ не зависит от скорости v_2 , а $\partial(\Delta g)/\partial v_2$ — от скорости v_1 .

Общее изменение аномалии силы тяжести представим в виде

$$d(\Delta g) = \frac{\partial(\Delta g)}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial(\Delta g)}{\partial v_1} dv_1 + \frac{\partial(\Delta g)}{\partial v_2} dv_2. \quad (14.6)$$

Аналогичное по структуре, но приближенное равенство получим, заменив бесконечно малые приращения переменных h_1 , v_1 , v_2 их конечными разностями. Равенство станет точным, если при изменении одной какой-либо переменной остальные останутся неизменными.

Эмпирическая проверка перечисленных соотношений представляется весьма важной. Если соотношения выполняются с достаточной точностью, то источники значительных гравитационных аномалий либо не располагаются глубже чем 5—10 км от поверхности Мохо, либо они находятся значительно глубже, однако о них можно судить по значению граничной скорости v_M на поверхности Мохо, т. е. величина v_M , физически определяемая для

самой верхней части мантии, в силу правомерности экстраполяции дает представление и о более глубоких зонах. Иными словами, при корректности модели данные глубинных сейсмических зондирований (в обычной модификации ГСЗ) вполне обеспечивают объяснение региональных аномалий Δg .

В любом случае (и при корректности модели, и при наличии существенных отклонений эмпирических соотношений от следствий модели) обобщенная для широкого круга условий количественная оценка роли разных причин в формировании аномалий Δg показывает их «нормальное», т. е. среднее для данного множества районов, площадей, влияние. Имея представление о нормальных пропорциях, можно более четко и объективно подчеркнуть специфику геологической природы аномалий в отдельных зонах, на отдельных региональных профилях.

Верификацию интерпретационной модели удобно провести на примере региональных аномалий силы тяжести в пределах океанов и морей.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ РАЗРЕЗЫ АКВАТОРИЙ — ЭМПИРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МОДЕЛИ

Интерпретация данных гравиметрической съемки морских и океанических акваторий привлекает внимание многих исследователей. Успехи в изучении большей части поверхности Земли, скрытой водами Мирового океана, а тем самым и в решении общегеологических проблем существенно зависят от корректности интерпретации обширной геофизической информации, включая данные гравиметрии. Задолго до того, как появились перспективы промышленного освоения полезных ископаемых шельфовых зон и дна океана, стали ясны возможности гравиметрии для исследования важнейших тектонических особенностей акваторий Земли [4]. Совместная интерпретация батиметрических, сейсмических, гравитационных и магнитных данных, измерений теплового потока, материалов петрологии и седиментологии является основным положением при изучении геологического строения акваторий. В рамках этого комплекса свое место занимают и вопросы верификации интерпретационных моделей.

Геологическая природа гравитационных аномалий, выявленных в пределах морей и океанов и имеющих интенсивность многие десятки — первые сотни миллигал, рассматривается в работах Е. Н. Люстиха, П. Н. Кропоткина, А. Г. Гайнанова, Е. Д. Корякина, Р. М. Деменицкой, Г. П. Вулларда, Г. В. Менарда, Дж. Л. Ворцеля и др. [5—8, 17, 27, 30—32]. Известно, что региональные аномалии Δg обуславливаются крупными плотностными неоднородностями, которые связаны с особенностями геологического строения коры и мантии Земли, причем аномалии Буге

коррелируются с рельефом дна морских бассейнов и рельефом границы Мохо. Выбор для анализа именно акваторий определяется поставленной задачей и доступностью фактов. Известны многочисленные публикации сейсмических разрезов земной коры и мантии акваторий. Разрезы освещают строение Атлантического, Индийского и Тихого океанов, включая их внутренние области, а также зоны, примыкающие к побережьям Европы, Азии, Австралии, Северной и Южной Америки. Наряду с этими разрезами мы использовали результаты глубинных сейсмических зондирований земной коры в пределах морей: Черного, Каспийского, Охотского, Японского, Карибского, Багда, Флорес, а также материалы изучения Мексиканского и Бискайского заливов.

Наиболее детально и равномерно изучена земная кора Атлантического океана. Информацию о ее глубинном строении дали многолетние исследования М. Юинга, Дж. Херси, К. Оффисера и др. [20, 29]. Подробные сводки разрезов и их интерпретация опубликованы в монографиях А. Г. Гайнанова и Е. Д. Корякина [5], Г. З. Гурария и И. А. Соловьевой [7]. Много сведений имеется о строении коры Карибского моря. Строение коры Тихого океана хорошо известно в отдельных областях этого бассейна. Подробно изучена зона перехода от Тихого океана к Азиатскому континенту, в частности Сахалино-Хоккайдо-Приморский сегмент [6]. Детальные исследования проведены вблизи Гавайских островов и в ряде других областей [28, 30, 31]. Менее изучен Индийский океан. Сведения об особенностях строения земной коры, установленных сейсмическими исследованиями, приводят Т. Френсис, Р. Рейтт [21], Ю. П. Непрочнов и др. Советские геофизики получили обширную информацию о глубинном геологическом строении Каспийского, Черного, Охотского морей и части Японского [1—3, 6, 7, 15], а также Северного Ледовитого океана [8]. Отдельные сейсмические разрезы характеризуют другие акватории. Сведения о гравитационном поле дают сводки каталогов и карты, опубликованные Дж. Л. Ворцелем [32], и некоторые другие источники.

Сейсмические профили и отдельные зондирования располагаются во внутренних зонах океанических платформ, периферийных частях океанических хребтов (Центральноатлантический, Восточно-Тихоокеанский и др.), во внешних океанических зонах островных дуг (Алеутская, Курило-Камчатская, Японская, Индонезийская, Тонга), вблизи глубоководного желоба Пуэрто-Рико, в районах базальтовых плато и вулканических островов (Гавайский и Азорский архипелаги), в зонах мощного осадконакопления (Черное море, Мексиканский залив). Таким образом, разнообразие и полнота геологических условий достаточны для решения поставленной задачи. В выборку не включены данные по строению непосредственно островных дуг, так как для этих геологических структур модель горизонтально-слоистой среды слишком груба.

Всего привлечено свыше 300 сейсмических разрезов, из которых отобрано для последующей обработки 162. Каждое сечение земной коры дает оценку скорости распространения сейсмических волн и положение границ на профиле длиной в несколько десятков километров. Глубина H_M поверхности Мохо определяется с ошибкой 0,3—0,6 км при неглубоком залегании этой планетарной границы и с ошибкой 1—2 км при ее погружении на 17—25 км. Средняя скорость продольных сейсмических волн в земной коре и граничная скорость их распространения вдоль поверхности Мохо оцениваются ошибкой, равной или несколько превышающей 0,1 км/с. Оценка аномалий Δg при редких траверзах и необходимости интерполяции выполняется с ошибкой 25 мгал [7, 32]. Для каждой комбинации параметров H_M , \bar{v} , v_M подбиралась группа из 10—30 разрезов, показывающих сходные особенности строения коры и верхней мантии, поэтому ошибки, которыми оцениваются средние значения этих параметров, лишь в малой степени зависят от инструментальных погрешностей и в основном определяются изменчивостью самих параметров внутри выборок.

ГРУППИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ И ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ

Аномальный эффект крупных особенностей геологического строения земной коры и верхней мантии можно представить как композицию, куда входят следующие причины [2, 3, 5, 7—9, 16, 18, 29—32]: 1) изменение глубины залегания поверхности Мохо; 2) региональная неоднородность земной коры, проявляющаяся в изменении средней плотности пород и соответственно средней скорости продольных волн; 3) региональная неоднородность верхней мантии, характеризуемая изменением граничной скорости сейсмических волн.

Гравитационные эффекты каждой из трех перечисленных причин оценим независимо друг от друга. Однако не только раздельное, но и взаимно согласованное влияние указанных причин может определять вариации поля силы тяжести. В терминологии, используемой при обработке экспериментальных данных, такое влияние называется взаимодействием факторов [19]. Взаимодействие также рассматриваем как группу подлежащих оценке источников аномалий. При трех основных переменных можно анализировать взаимодействие первой переменной со второй, первой с третьей, второй с третьей и, наконец, тройное. Кроме того, на изменение региональных аномалий силы тяжести оказывают влияние индивидуальные особенности геологического строения, проявляющиеся на сопоставляемых разрезах даже при неизменной глубине поверхности Мохо, одинаковой средней скорости

и т. д. В определенной степени здесь учитываются также ошибки экспериментальных данных.

Чтобы определить роль каждой из трех причин и их взаимодействий, подбираем эмпирические данные (сейсмические разрезы и аномалии) так, чтобы в пространстве параметров H_M , \bar{v} , v_M они сгруппировались в вершинах куба (изменение каждой переменной изображается в своем масштабе). Для первоначального определения групп были построены вариационные диаграммы, которые показали: $H_{M1} < 15 \text{ км} \leq H_{M2}$, $\bar{v}_1 < 5,6 \text{ км/с} \leq \bar{v}_2$, $v_{M1} < 8,1 \text{ км/с} \leq v_{M2}$. В значения средней скорости \bar{v} введена поправка за слой морской воды [7], что позволяет корректнее сопоставлять значения \bar{v} с аномалиями Буге, процедура вычисления которых предусматривает замену плотности морской воды средней плотностью горных пород $\rho = 2,67 \text{ г/см}^3$. Табл. 14.2 показывает распределение 164 разрезов коры по 8 группам. Расположение узлов объемной решетки соответствует следующим значениям параметров.

	H_M , км	\bar{v} , км/с	v_M , км/с
Уровни переменных	11,9	5,29	7,93
	18,3	5,85	8,30
Внешняя оценка расхождений	0,2	0,05	0,04
	0,3	0,04	0,01
Стандартные отклонения средних	0,35	0,05	0,03
	0,5	0,06	0,04
Разность уровней переменных	6,4	0,56	0,37

Каждой комбинации переменных H_M , \bar{v} , v_M соответствует от 12 до 36 значений Δg , которые отличаются друг от друга, отражая специфику местных геологических особенностей. Чтобы подчеркнуть основные эффекты, элиминировать местные условия и одновременно упростить вычисления, целесообразно осреднить значения Δg , оставив в каждой группе одинаковое число отсчетов. Двух значений Δg , найденных после осреднения внутри случайно сформированных подгрупп, в первом приближении достаточно, чтобы учесть внутреннюю изменчивость отклика при дискретных изменениях аргументов. После исключения из значений Δg постоянной составляющей и округления до десятков миллигал получена следующая матрица.

	$\bar{v}_1 = 5,29$		$\bar{v}_2 = 5,85$	
	$v_{M1} = 7,93$	$v_{M2} = 8,30$	$v_{M1} = 7,93$	$v_{M2} = 8,30$
$H_{M1} = 11,9$	+3	0	+5	+6
	+3	+1	+6	+7
$H_{M2} = 18,3$	-6	-5	-5	0
	-3	-4	-3	+1

Поскольку стандартные отклонения средних относительно малы (около 10%) по сравнению с разностью уровней переменных, можно воспользоваться приемами дисперсионного анализа для случая фиксированных, а не случайно заданных уровней факторов (переменных).

Характеристика групп сейсмических разрезов земной коры, использованных региональных гравитационных аномалий на акваториях

Группа	Акватория	Число разрезов	Оценки перемен	
			H_M , км	\bar{v} , км/с
1	Атлантический океан	15	$11,75 \pm 0,34$	$5,25 \pm 0,05$
	Индийский океан	1		
	Тихий океан	1		
	Карибское море	2		
	Охотское море	2		
2	Атлантический океан	8	$12,10 \pm 0,42$	$5,34 \pm 0,04$
	Тихий океан	2		
	Карибское море	2		
	Японское море	2		
	Мексиканский залив	1		
3	Атлантический океан	6	$11,78 \pm 0,27$	$5,81 \pm 0,04$
	Индийский океан	3		
	Тихий океан	12		
	Море Банда	1		
	Японское море	2		
	Бискайский залив	1		
4	Атлантический океан	10	$11,94 \pm 0,23$	$5,85 \pm 0,04$
	Индийский океан	8		
	Тихий океан	15		
	Карибское море	3		
5	Атлантический океан	4	$18,09 \pm 0,60$	$5,27 \pm 0,04$
	Индийский океан	1		
	Тихий океан	5		
	Карибское море	2		
	Черное море Море Флорес	2 1		
6	Атлантический океан	6	$18,05 \pm 0,54$	$5,27 \pm 0,08$
	Индийский океан	1		
	Карибское море	1		
	Черное море	2		
	Мексиканский залив	3		
7	Атлантический океан	1	$18,36 \pm 0,42$	$5,87 \pm 0,06$
	Индийский океан	2		

для верификации модели и количественной оценки причин

ных (по группам)		Источник сведений о сейсмических разрезах
v_M , км/с	Δg , мгал	
$7,89 \pm 0,03$	286; 291	П. Калои, 1958 г.; Дж. Юинг, М. Юинг, 1959 г.; С. Катц, М. Юинг, 1956 г.; Дж. Херси и др., 1959 г. Т. Френсис и др., 1965 г. П. С. Вейцман, 1964 г. К. Оффисер и др., 1959 г.; Дж. Юинг и др., 1960 г. Ю. В. Тулина и др., 1971 г.
$8,29 \pm 0,04$	262; 270	М. Хилл, А. Лаутон, 1954 г.; М. Юинг и др., 1954 г.; С. Катц, М. Юинг, 1956 г.; Дж. Херси и др., 1959 г. А. Фурумото и др., 1968 г.; Р. Рейтт, 1956 г. Дж. Юинг и др., 1960 г. И. Б. Андреева, Г. Б. Удинцев, 1958 г. Дж. Юинг и др., 1960 г.
$7,95 \pm 0,03$	310; 318	Дж. Юинг, М. Юинг, 1959 г.; К. Оффисер и др., 1959 г. Ю. П. Непрочнов, 1964 г.; Т. Френсис, Р. Рейтт, 1967 г. И. П. Косминская, 1964 г.; П. С. Вейцман, 1964 г.; А. Фурумото и др., 1968 г.; М. Тальвани и др., 1965 г. Р. Рейтт, 1966 г. И. Б. Андреева, Г. Б. Удинцев, 1958 г.; Ю. В. Тулина и др., 1971 г. Дж. Юинг, М. Юинг, 1959 г.
$8,31 \pm 0,03$	325; 328	М. Юинг, Дж. Ворцель, 1954 г.; М. Юинг, Дж. Юинг, 1959 г.; М. Юинг и др., 1954 г.; К. Оффисер и др., 1959 г. Р. Рейтт, 1966 г.; Т. Френсис, Р. Рейтт, 1967 г. Р. Рейтт, 1956 г.; И. П. Косминская, 1964 г.; А. Фурумото и др., 1968 г. К. Оффисер и др., 1959 г.; Дж. Юинг и др., 1960 г.
$7,95 \pm 0,04$	205; 226	К. Бентли, Дж. Ворцель, 1956 г.; К. Оффисер и др., 1957 г. Р. Рейтт, 1966 г. А. Гайнанов и др., 1968 г.; П. С. Вейцман, 1964 г.; А. Фурумото и др., 1968 г. Дж. Юинг и др., 1960 г. Ю. П. Непрочнов и др., 1959 г. Р. Рейтт, 1966 г.
$8,31 \pm 0,03$	215; 219	Дж. Юинг, М. Юинг, 1959 г.; К. Оффисер и др., 1959 г. Р. Рейтт, 1966 г. К. Оффисер и др., 1959 г. Ю. П. Непрочнов и др., 1959 г. Дж. Юинг и др., 1960 г.
$7,92 \pm 0,04$	216; 221	К. Оффисер и др., 1957 г. Р. Рейтт, 1966 г.

Группа	Акватория	Число разрезов	Оценки перемен	
			H_M , км	\bar{v} , км/с
	Тихий океан	6		
	Карибское море	8		
	Каспийское море	1		
	Охотское море	1		
	Японское море	1		
8	Атлантический океан	3	$18,57 \pm$	$5,89 \pm$
	Индийский океан	1	$\pm 0,55$	$\pm 0,04$
	Тихий океан	8		
	Карибское море	6		
	Японское море	1		

СТЕПЕНЬ СООТВЕТСТВИЯ МОДЕЛИ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ; НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРИЧИН РЕГИОНАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ НА АКВАТОРИЯХ

Результаты дисперсионного анализа данных об интенсивности региональных гравитационных аномалий показаны в табл. 14.3. Как видно из таблицы, на величину аномалий Буге наибольшее влияние оказывает глубина поверхности Мохо, а также изменение средней плотности коры. Эффект этих причин отмечается с самой высокой вероятностью ($P \geq 0,9995$). Следующий по значимости источник региональных аномалий — взаимодействие неоднородного распределения плотности масс в верхней мантии и в коре. Этот эффект проявляется с вероятностью близкой к 0,99.

Влияние положения поверхности Мохо на аномалии Буге в среднем характеризуется коэффициентом (109 ± 8) мгал/10 км. Это значение весьма близко к оценкам, приведенным в монографиях Р. М. Деменицкой [8], Г. З. Гурария и И. А. Соловьевой [7]. Вместе с тем возможность раздельного определения влияния каждой причины на изменение региональных аномалий Δg позволила обнаружить систематические отклонения от тех соотношений, которые предписывает дедуктивный подход, опирающийся на рассмотренную выше модель распределения масс. При условии, когда источники аномалий целиком заключены внутри земной коры и той части мантии, которую характеризует граничная скорость (т. е. в слое на 5—10 км ниже поверхности Мохо), следовало ожидать, что отклонения от среднего коэффициента (109 ± 8) мгал/10 км будут пропорциональны разности $v_M - \bar{v} = \Delta v$.

ных (по группам)		Источник сведений о сейсмических разрезах
v_M , км/с	Δg , мгал	
		С. М. Зверев и др., 1968 г.; Ю. В. Тулина и др., 1964 г.; А. Фурумото и др., 1968 г. К. Оффисер и др., 1959 г.; Дж. Юинг и др., 1960 г. А. А. Гагельянц и др., 1958 г. Ю. В. Тулина и др., 1971 г. Ю. В. Тулина и др., 1971 г.
$8,29 \pm 0,04$	261; 270	Дж. Херси и др., 1959 г., К. Оффисер и др., 1957 г. Р. Рейтт, 1966 г. Г. Шор, Р. Рейтт, 1958 г.; Р. Рейтт, 1956 г.; П. С. Вейцман и др., 1964 г.; А. Фурумото и др., 1968 г. Дж. Юинг и др., 1960 г.; К. Оффисер и др., 1957 г. Ю. В. Тулина и др., 1971 г.

Ниже приведены значения $\Delta g/\Delta H_M$, Δv и $\Delta \rho$, соответствующие каждой из четырех комбинаций (\bar{v}, v_M) . Изменение силы тяжести при изменении глубины поверхности Мохо получилось противоположным тому, которое можно было ожидать, если учитывать только значения Δv .

	$\bar{v}_1 = 5,29$ км/с			$\bar{v}_2 = 5,85$ км/с		
	$\Delta g/\Delta H_M$, мгал/10 км	Δv , км/с	$\Delta \rho$, г/см ³	$\Delta g/\Delta H_M$, мгал/10 км	Δv , км/с	$\Delta \rho$, г/см ³
$v_{M1} = 7,93$ км/с	117 ± 23	2,64	0,53	148 ± 23	2,08	0,42
$v_{M2} = 8,30$ км/с	78 ± 23	3,01	0,60	93 ± 23	2,45	0,49

Как видим, наибольшим перепадам Δv и $\Delta \rho$ соответствует наименьшее изменение силы тяжести, и наоборот, причем различия существенные. На первый взгляд этот результат кажется парадоксальным, однако он имеет объяснение. Отдельные факты, связанные с этим явлением, отмечались и раньше. Малые значения средней скорости \bar{v} показывают, что значительная часть разреза коры сложена неконсолированными осадками. Накопление большой толщии таких осадков возможно лишь при быстром погружении бассейна. Причиной погружения служит перераспределение вещества на глубине, в том числе уплотнение мантии. Гравитационным эффектом этого процесса в значительной степени компенсируется эффект погружения поверхности Мохо и накопления легких пород. Южная впадина Каспийского моря известна как яркий пример такого соотношения геологических процессов и гравитационных аномалий [3].

Г. В. Менард, рассматривая Алеутский, Юкатанский и некоторые другие малые океанические бассейны, отличающиеся большой мощностью легких осадочных пород, обратил внимание

ТАБЛИЦА 14.3

Дисперсионный анализ данных об источниках региональных гравитационных аномалий на морских и океанических акваториях

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Дисперсионное отношение		Ранг причины
			Эмпирическое	Теоретическое (критическое)	
Изменение глубины H_M границы Мохо	$2 - 1 = 1$	196,00	174	$31,6_{0,9995}$	1
Региональная неоднородность коры (изменение скорости \bar{v})	$2 - 1 = 1$	49,00	43,5	$31,6_{0,9995}$	2
Региональная неоднородность мантии (изменение скорости v_M)	$2 - 1 = 1$	2,25	2	$2,01_{0,8}$ $1,54_{0,75}$	
Взаимодействия:					
$H_M \times \bar{v}$	$1 \times 1 = 1$	2,25	2	} $7,57_{0,975}$ $11,3_{0,99}$	4 3
$H_M \times v_M$	$1 \times 1 = 1$	9,00	8		
$\bar{v} \times v_M$	$1 \times 1 = 1$	16,00	14,2		
$H_M \times \bar{v} \times v_M$	$1 \times 1 \times 1 = 1$	0,25	<1		
Зональная неоднородность литосферы и ошибки наблюдений	$(2 - 1) \times 8 = 8$	9,00			

на то, что аномалия силы тяжести здесь на 80—200 мгал выше, чем можно ожидать по обычным моделям [27]. Чтобы объяснить несоответствие, он предположил, что связь $\rho = f(v)$ для земной коры этих бассейнов систематически отличается от установленной для коры других геоблоков. Это равносильно допущению, что значительно изменяется отношение молекулярная масса/плотность. Наш результат, основанный на данных о многих акваториях Земли, в принципе не опровергает этого предположения и вместе с тем показывает, что существует общая закономерность, которая оставляет меньше места для объяснения, данного Г. В. Менардом. Систематические отклонения от простой модели свидетельствуют, что наблюдается тесная согласованность процессов в земной коре и в мантии, а не произвольная суперпозиция масс; соответственно источники гравитационных аномалий находятся не только вблизи и выше поверхности Мохо, но и существенно глубже этой границы.

Чтобы дополнительно охарактеризовать этот эффект, была исследована структура связей переменных H_M , \bar{v} , v_M , Δg в области, окружающей узлы объемной решетки. Для выявления и описания связей использован метод главных компонент (R -модификация факторного анализа). Кроме главной тенденции совместного изменения параметров земной коры и аномалий силы тяжести

существует дополнительная тенденция (вторая главная компонента). Ниже приведены оценки коэффициентов корреляции.

Параметры	Тенденция	
	Основная	Дополнительная
\bar{H}_M	+0,6	+0,5
\bar{v}	+0,4	-0,4
v_M	+0,2	+0,1
Δg	-0,7	+0,1
Доля суммарной дисперсии, %	42	25

В соответствии с главной тенденцией погружение поверхности Мохо сопровождается значительным увеличением средней скорости сейсмических волн в толще коры и слабым увеличением в породах мантии, одновременно сильно уменьшается аномалия Буге. Дополнительная тенденция проявляется в том, что погружению поверхности Мохо сопутствует уменьшение средней скорости волн в коре при неизменности других параметров.

Чтобы увязать численные оценки коэффициента $\Delta g/\Delta H_M$, необходимо принять, что уплотнение вещества мантии, сопровождающееся погружением границы Мохо и быстрым накоплением легких осадочных пород, охватывает слой толщиной не менее нескольких десятков километров. Вероятно, повышение плотности прямо или косвенно связано с изменением термического режима.

Для отдельных регионов Земли уже имеются сейсмические разрезы мантии до глубины 200—400 км [12, 22, 24—26 и др.], которые позволяют проверить правомерность приведенной выше интерпретации связей между переменными. Детально исследованный Мексиканский залив является характерным примером зоны мощного осадконакопления. Сравнение скоростного разреза мантии этого региона с аналогичным, но хуже изученным разрезом мантии Баренцева моря и с разрезами других регионов действительно подтверждает, что аккумуляция осадков ассоциирует с четко выраженным уплотнением глубинного вещества. Уплотнение проявляется в увеличении средней скорости сейсмических волн и подъеме соответствующих границ (рис. 14.2) [11, 25].

Изменение аномалий Δg в связи с изменением средней скорости волн в коре, т. е. с изменением плотности коры, является второй по значимости причиной вариаций. Как и следовало ожидать, более плотной земной коре отвечают повышенные значения скорости \bar{v} . Однако наблюдаемый перепад не вполне соответствует предполагаемому значению. При средней глубине границы Мохо $H_M = 15,4$ км и разности параметров $\bar{v}_2 - \bar{v}_1 = 5,85 - 5,29 = 0,56$ км/с, $\Delta \rho \approx 0,11$ г/см³ изменение аномалий должно соста-

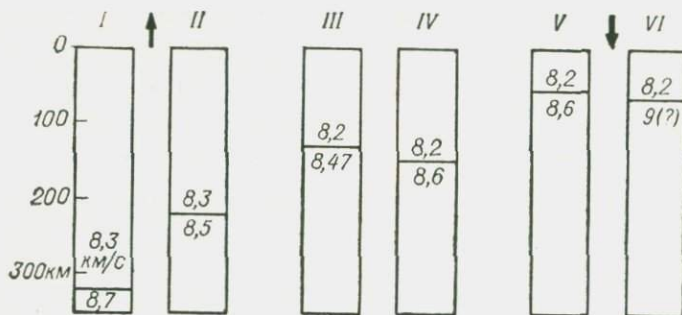


Рис. 14.2. Связь направления вертикальных тектонических движений и положения глубинной сейсмической границы в мантии Земли.

Зоны воздымания: I — Гималаи, II — Альпы; стабильные зоны: III — центральная часть Северной Америки, IV — центральная и северо-восточная часть Евразии; зоны погружения: V — Мексиканский залив, VI — Баренцево море.

вить 69 мгал, тогда как наблюдается 35 ± 6 мгал. Можно ожидать, что это объясняется неточностью переходного коэффициента $m \approx 0,2$ [9, 23]. Однако если обратиться к данным, характеризующим разные интервалы глубин H_M , предположение о единой систематической ошибке отпадает. При малой глубине ($H_{M1} = 11,9$ км) наблюдаемое изменение силы тяжести (42 ± 8 мгал) более или менее согласуется с вычисленным на основе простой модели (55 мгал). При большей глубине ($H_{M2} = 18,3$ км) наблюдаемое изменение силы тяжести (27 ± 8 мгал) составляет уже меньшую часть от расчетного (84 мгал). Таким образом, при увеличении мощности земной коры наблюдается отчетливая тенденция к повышению степени изостатической компенсации гравитационного эффекта, вызванного латеральными вариациями средней плотности, так что различия между отдаленными регионами по средней плотности коры лишь частично отражаются в аномалиях силы тяжести.

Неоднородность скорости v_M в самой верхней части мантии оказалась статистически незначимым фактором, не влияющим на величину региональных аномалий. Теоретический эффект подсчитать нельзя, так как неизвестна главная величина — толщина той зоны мантии, которую характеризует скорость v_M . При $v_{M2} - v_{M1} = \Delta v_M = 0,37$ км/с каждые 10 км мантии могут изменить уровень гравитационного поля на 31 мгал. Наблюдаемое изменение существенно меньше и практически не выходит за пределы ошибки. Возможно, латеральные изменения плотности в верхней части мантии изостатически компенсируются перераспределением масс в ее пластическом слое. Вместе с тем важно подчеркнуть, что эффект взаимодействия неоднородностей мантии и коры значителен (см. табл. 14.3).

В целом результаты верификации интерпретационной модели и оценка источников региональных гравитационных аномалий свидетельствуют о значительной роли согласованно проявляющихся геологических процессов в коре и мантии Земли и о четко выраженной тенденции к изостатической уравниваемости масс. Представляет интерес аналогичный анализ гравитационных аномалий, вычисленных в изостатической редукции и редукции Фая. В равной мере заслуживает внимания верификация моделей интерпретации, используемых при изучении горных складчатых областей. Применение здесь простых моделей не всегда дает удовлетворительные результаты, даже оценки мощности коры нередко различаются на 10—15 км (например, для Памира, Тянь-Шаня, Тибета, Гималаев).

1. Белоусов В. В. О современном состоянии теоретической геологии. — «Природа», 1953, № 2, с. 15—22.
2. Боровиков А. М. Математизация геологии — ее методик или методологии? — В кн.: Пути познания Земли. М., «Наука», 1970, с. 118—131.
3. Боровиков А. М. К постановке задачи создания системы теоретической общей геологии. Новосибирск, 1975. 38 с. (ВЦ СО АН СССР).
4. Воронин Ю. А. Теоретическая геология и научно-организационная основа ее построения. Новосибирск, 1975. 40 с. (ВЦ СО АН СССР).
5. Геологический словарь. Т. 2. М., «Недра», 1973. 456 с.
6. Геология и математика. Новосибирск, «Наука», 1967. 254 с.
7. Жуков Р. А., Груза В. В., Ткачев Ю. Р. Проблема выделения объектов исследования в геологии. — В кн.: Мат. методы в геологии. Л., 1975, с. 14—27. (Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер., т. 223, вып. 3).
8. Косыгин Ю. А. О положении геологии среди других наук и об основных проблемах современной геологии. — «Геология и геофизика», 1963, № 8, с. 3—12.
9. Косыгин Ю. А. Основы тектоники. М., «Недра», 1974. 215 с.
10. Назаров И. В. Методологические аспекты современного положения геологии и ее будущего. Новосибирск, 1975. 17 с. (ВЦ СО АН СССР).
11. Оноприенко В. И. Схема методологического анализа геологической теории. Новосибирск, 1975. 17 с. (ВЦ СО АН СССР).
12. Пейве А. В., Страхов Н. М., Яншин А. Л. Некоторые важнейшие задачи в области теоретической геологии. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1961, № 10, с. 13—20.
13. Перельман А. И. Очерки философии наук о Земле. М., «Знание», 1972. 48 с.
14. Салин Ю. С. Некоторые методологические аспекты «математизации» геологии. — В кн.: Применение мат. методов и ЭВМ при поиске полезн. ископаемых. Новосибирск, 1973, с. 63—70. (ВЦ СО АН СССР).
15. Симкин С. М. Об идеализации геологических процессов. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1964, № 11, с. 103—110.
16. Смирнов В. И. Состояние и задачи теоретической геологии. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 7, с. 5—20.
17. Стратиграфия и математика. Хабаровск. Хабар. кн. изд-во, 1974. 208 с.
18. Тихомиров В. В. Научно-техническая революция и геология. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1972, № 12, с. 30—45.
19. Трофимов Н. А., Карпов Ю. П. Предметы наук о Земле как функция методов познания. — В кн.: Филос. вопр. геологии. Свердловск, 1970, с. 3—15. (Труды Свердл. горн. ин-та, вып. 77 (2)).
20. Шарапов И. П. Методологические проблемы геологии (о метагеологии). — «Геология и геофизика», 1972, № 11, с. 124—128.
21. Шарапов И. П. Проблема научной революции в геологии. — В кн.: Применение мат. методов и ЭВМ при поиске полезн. ископаемых. Новосибирск, 1973, с. 40—62. (ВЦ СО АН СССР).

22. Шаранов И. П. Проблемы метанауки и их отражение в геологии. — В кн.: Филос. вопр. геологии. Свердловск, 1974, с. 117—129. (Труды Свердл. горн. ин-та, вып. 115 (4)).

23. Шаранов И. П. Роль логики и математики в современной геологии. Новосибирск, 1975. 17 с. (ВЦ СО АН СССР).

2

1. Акоф Р. Л. Общая теория систем и исследование систем как противоположные концепции науки о системах. — В кн.: Общ. теория систем. М., 1966, с. 66—80.

2. Акоф Р. Л., Эмери Ф. Е. О целеустремленных системах. М., 1974. 270 с.

3. Алтухов Е. Н. О новой разновидности эпикратонных геосинклиналей. — «Геология и геофизика», 1973, № 3, с. 122—126.

4. Анохин П. К. Методологическое значение кибернетических закономерностей. — В кн.: Материалист. диалектика и методы естеств. наук. М., 1968, с. 547—587.

5. Арманд Д. Л. Объективное и субъективное в природном районировании. — «Изв. АН СССР. Сер. геогр.», 1970, № 1, с. 115—129.

6. Ацев Б. Н., Жемковцев Б. А., Никоногова Л. Р. Структурные условия локализации свинцово-цинкового оруденения в песчано-глинистых отложениях (на примере Какадур-Ханикомского месторождения). — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 11, с. 89—98.

7. Белоусов В. В. О путях развития геологической науки. — «Сов. геология», 1963, № 1, с. 11—28.

8. Бернал Дж. Наука в истории общества. М., 1965. 735 с.

9. Бир Ст. Кибернетика и управление производством. М., 1965. 392 с.

10. Богданов А. А. Всеобщая организационная наука (тектология). Л.—М., ч. 1, 1925. 300 с.; ч. 2, 1927. 268 с.; ч. 3, 1929. 222 с.

11. Боровиков А. М. О фактическом состоянии тектонической терминологии. — «Геотектоника», 1968, № 1, с. 3—7.

12. Боровиков А. М. Математизация геологии — ее методик или методологии? — В кн.: Пути познания Земли. М., 1970, с. 118—131.

13. Боровиков А. М. Типы поперечных сочленений линейных тектонических элементов. 1971. 104 с. (Труды ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, вып. 122).

14. Бреслер С. Е. Физика и биология. — «Успехи физ. наук», 1975, т. 115, вып. 1, с. 121—143.

15. Бузаец А. Н., Дуденко Л. Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Л., 1976. 270 с.

16. Бунге М. Философия физики. М., 1975. 350 с.

17. Васильев В. И., Драгунов В. И., Плющев Е. В. Прогностическое значение систематики парагенераций и формаций. — В кн.: Основы науч. прогноза месторождений руд и нерудн. полезн. ископаемых. Л., 1971, с. 24—27.

18. Васильев В. И., Драгунов В. И., Рунджаист Д. В. «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образований различных уровней организации. — «Зап. Всесоюз. минерал. о-ва», 1972, вып. 3, с. 281—289.

19. Васильченко С. Ф. Философские аспекты формализации геологических понятий. — «Геология и геофизика», 1968, № 3, с. 139—143.

20. Введение в техническую диагностику. М., 1968. 224 с. Авт.: Г. Ф. Верзаков, Н. В. Киншт, В. И. Рабинович, Л. С. Тимонен.

21. Вистелиус А. Б. Теоретические предпосылки стохастических моделей и их проверка в конкретных геологических условиях. — В кн.: Докл. сов. геологов на Междунар. геол. конгрессе, XXIII сессия. Мат. методы в геологии. Проблема 13-б. М., 1968, с. 7—14.

22. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. Фации и формации. Парагенезис. 1972. 119 с. (Труды Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, вып. 146).

23. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. Методологические вопросы применения математических методов в геологии. Новосибирск, 1974. 86 с.

24. *Воронин Ю. А., Еганова И. А., Еганов Э. А.* Анализ концепций уровней организации в теоретической геологии. Новосибирск, 1975. 21 с. (ВЦ СО АН СССР).
25. *Геология и математика.* Новосибирск, 1967. 254 с. Авт.: Ю. А. Воронин, Б. К. Алабин, С. В. Гольдин и др.
26. *Герасимов И. Г.* Математическая идеализация и математический аппарат в количественных методах анализа. — «Труды Моск. ин-та инж. ж.-д. транспорта», 1965, вып. 223, с. 26—37.
27. *Головкинский Н. А.* О пермской формации в центральной части Камско-Волжского бассейна. — В кн.: Материалы для геологии России. Спб., 1869, с. 248—418.
28. *Горский Д. П.* О процессе идеализации и его значении в научном познании. — «Вопр. философии», 1963, № 2, с. 50—60.
29. *Грневский Г.* Кибернетика без математики. М., 1964. 182 с.
30. *Джордж Ф.* Мозг как вычислительная машина. М., 1963. 278 с.
31. *Драгунов В. И.* Геология и изучение элементов, структуры и уровней организации вещества. — В кн.: Материалы совещ. «Общ. закономерности геол. явлений». Вып. 1. Л., 1965, с. 55—67.
32. *Драгунов В. И.* Геологические формации. Л., 1973. 23 с.
33. *Еганов Э. А.* О выделении объектов исследования в геологии. — В кн.: Пути познания Земли. М., 1971, с. 263—273.
34. *Жуков Р. А.* Системно-кибернетический подход как главная предпосылка математизации геологии. — «Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер.», 1973, т. 180, с. 170—176.
35. *Жуков Р. А.* К проблеме кибернетизации геологии. — Там же, с. 177—193.
36. *Жуков Р. А., Ткачев Ю. Р.* Ключевые вопросы проблемы математизации геологии. — В кн.: Применение ЭВМ в геологии и горн. деле. Л., 1971, с. 95—110.
37. *Жуков Р. А., Груза В. В., Ткачев Ю. Р.* Проблема выделения объектов исследования в геологии. — «Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер.», 1975, т. 223, с. 14—27.
38. *Земан И.* Познание и информация. М., 1966. 254 с.
39. *Иванкин П. Ф.* О системном подходе в геологических исследованиях. — «Сов. геология», 1973, № 8, с. 3—13.
40. *Касьяков Н. Н.* Теоретико-множественное определение понятия системы. — В кн.: Системн. исследования. М., 1972, с. 79—92.
41. *Кен А. Н.* О зональности, возрасте и генезисе колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. — В кн.: Проблемы регион. металлогении и эндоген. рудообразования. Л., 1968, с. 155—159.
42. *Кен А. Н.* Геометрические и геологические закономерности размещения месторождений полезных ископаемых как основа качественного и количественного прогноза. — В кн.: Основы науч. прогноза месторождений руд и нерудн. полезн. ископаемых. Л., 1971, с. 43—46. (ВСЕГЕИ).
43. *Клаус Г.* Кибернетика и философия. М., 1963. 531 с.
44. *Клаус Г.* Философские аспекты теории игр. — «Вопр. философии», 1968, № 8, с. 24—34.
45. *Клир И.* Абстрактное понятие системы как методологическое средство. — В кн.: Исследования по общ. теории систем. М., 1969, с. 287—319.
46. *Кондаков Н. И.* Логический словарь-справочник. Изд. 2-е. М., 1975. 717 с.
47. *Косыгин Ю. А.* О положении геологии среди других наук и об основных проблемах современной геологии. — «Геология и геофизика», 1963, № 8, с. 3—12.
48. *Косыгин Ю. А.* Методологические вопросы системных исследований в геологии. — «Геотектоника», 1970, № 2, с. 20—29.
49. *Косыгин Ю. А.* Основы тектоники. М., 1974. 215 с.
50. *Косыгин Ю. А., Воронин Ю. А.* Некоторые фундаментальные понятия структурной геологии. — «Геотектоника», 1965, № 1, с. 51—60.
51. *Косыгин Ю. А., Кулиндышев В. А.* Структурно-системные исследо-

вания в геологии и проблема математизации. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 6, с. 14—21.

52. *Косыгин Ю. А., Соловьев В. А.* Статические, динамические и ретро-спективные системы в геологических исследованиях. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1969, № 6, с. 9—17.

53. *Круть И. В.* Исследование оснований теоретической геологии. М., 1973. 205 с.

54. *Кузнецов И. В.* Структура научной теории и структура объекта. — «Вопр. философии», 1968, № 5, с. 72—83.

55. *Кулаков Ю. И.* Структура и единая физическая картина мира. — «Вопр. философии», 1975, № 2, с. 15—26.

56. *Лебедев В. И.* Основы энергетического анализа геохимических процессов. Л., 1957. 342 с.

57. *Ляпунов А. А.* О фундаменте и стиле современной математики. — «Мат. просвещение», 1960, № 5, с. 113—118.

58. *Ляпунов А. А.* В чем состоит системный подход к изучению реальных объектов сложной природы. — В кн.: Системн. исследования. М., 1972, с. 5—17.

59. *Маркушев А. А.* Ответ на замечания С. М. Симкина. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 1, с. 150—153.

60. *Месарович М.* Основания общей теории систем. — В кн.: Общ. теория систем. М., 1966, с. 15—48.

61. *Мочалов И. И. В. И. Вернадский о логике и методологии научного творчества.* — «Вопр. философии», 1963, № 5, с. 106—117.

62. *Новик И. Б.* О моделировании сложных систем. М., 1965. 335 с.

63. *Платт Д.* Метод строгих выводов. — «Вопр. философии», 1965, № 9, с. 68—78.

64. *Рапопорт А.* Математические аспекты абстрактного анализа систем. — В кн.: Исследования по общ. теории систем. М., 1969, с. 83—105.

65. *Романовский С. И.* Стохастическое моделирование процессов слое-накопления как теоретическая основа анализа мощностей при формационном анализе. — «Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер.», 1972, т. 176, с. 212—220.

66. *Рундквист Д. В.* Об одной общей закономерности геологического развития. — В кн.: Материалы совещ. «Общ. закономерности геол. явлений», Вып. 1. Л., 1965, с. 79—90.

67. *Сагатовский В. Н.* Методологические проблемы современной меди-цины. — «Вопр. философии», 1968, № 1, с. 78—86.

68. *Сетров М. И.* Об общих элементах тектологии А. Богданова, кибер-нетики и теории систем. — «Учен. зап. кафедр обществ. наук вузов г. Ленин-града. Философия», 1967, вып. 8, с. 37—49.

69. *Симкин С. М.* Два замечания по поводу статьи А. А. Маркушева. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 1, с. 144—150.

70. *Смирнов В. И.* Состояние и задачи теоретической геологии. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 7, с. 5—20.

71. *Соловьев В. А.* Формализация понятий — необходимое условие при-менения математики в тектонике. — «Сов. геология», 1968, № 1, с. 152—156.

72. *Тахтаджян А. Л.* Тектология: история и проблемы. — В кн.: Системн. исследования. М., 1972, с. 200—271.

73. *Трофимов Н. А., Карпов Ю. П.* Предметы наук о Земле как функ-ция методов познания. — «Труды Свердл. горн. ин-та», 1970, вып. 77 (2), с. 3—15.

74. *Фор П., Кофман А., Дени-Папен М.* Современная математика. М., 1966. 272 с.

75. *Хаин В. Е.* О некоторых спорных вопросах и трудностях форма-ционного анализа. — В кн.: Проблемы магмат. геологии. Новосибирск, 1973, с. 5—18.

76. *Халфин Л. Л.* Принцип Никитина — Чернышева — теоретическая основа стратиграфической классификации. — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1969, вып. 94, с. 7—42.

77. Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М., 1974. 318 с.
78. Харвей Д. Научное объяснение в географии. М., 1974. 502 с.
79. Цацковский З. Проблемы, вопросы и общие принципы их постановки. — «Вопр. философии», 1968, № 1, с. 34—42.
80. Цовф Г. (мл.). Отношение и контекст. — В кн.: Принципы самоорганизации. М., 1966, с. 399—427.
81. Четвериков Л. И. Роль геологического анализа при применении математики в геологии. — В кн.: Философия и естествознание. Воронеж, 1965, с. 151—167.
82. Шанцер Е. В. К методологии историко-геологического исследования. — «Геотектоника», 1970, № 2, с. 7—19.
83. Шарапов И. П. Проблема научной революции в геологии. — В кн.: Труды III Всесоюз. совещ. по применению мат. методов и ЭВМ при поиске полезных ископаемых. Новосибирск, 1973, с. 40—62.
84. Щедровицкий Г. П. Проблемы методологии системного исследования. М., 1964. 48 с.
85. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М., 1959. 432 с.
86. Эшби У. Р. Конструкция мозга. М., 1964. 411 с.
87. Эшби У. Р. Системы и информация. — «Вопр. философии», 1964, № 3, с. 78—85.
88. Эшби У. Р. Принципы самоорганизации. — В кн.: Принципы самоорганизации. М., 1966, с. 314—343.
89. Эшби У. Р. Общая теория систем как новая научная дисциплина. — В кн.: Исследования по общ. теории систем. М., 1969, с. 125—142.
90. Эшби У. Р. Теоретико-множественный подход к механизму и гомеостазису. — Там же, с. 398—441.
91. Юдин Б. Г. Становление и характер системной ориентации. — В кн.: Системн. исследования. М., 1972, с. 18—34.

3

1. Афанасьев Б. Л., Белкин В. И. Проблемы геологии кайнозоя Большеземельской тундры. — В кн.: Кайнозойск. покров Большеземельск. тундры. М., 1963, с. 4—9.
2. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. О процедурах сопоставления сложных геологических тел на основе их аналитического описания. — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1968, вып. 79, с. 36—48.
3. Геология и математика. Новосибирск, «Наука», 1967. 253 с. Авт.: Ю. А. Воронин, Б. К. Алабин, С. В. Гольдин и др.
4. Груза В. В., Романовский С. И. Принцип актуализма и логика познания геологического прошлого. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 2, с. 125—134.
5. Гурари Ф. Г. О правилах стратиграфической классификации. — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1969, вып. 94, с. 66—78.
6. Жамойда А. И., Меннер В. В. Две основные тенденции разработки стратиграфической классификации. — В кн.: Проблемы геологии и полезн. ископаемых на 24 сессии Междунар. геол. конгресса. М., 1974, с. 144—151.
7. Жамойда А. И., Ковалевский О. П., Моисеева А. И. Обзор зарубежных стратиграфических кодексов. Труды Междвезд. стратигр. ком. СССР. Т. 1. 1969. 101 с.
8. Зотов А. Ф. Понятие объективности знания в современной науке. — «Природа», 1974, № 12, с. 35—41.
9. Зубаков В. А. Дискуссионные вопросы стратиграфической классификации и терминологии (принцип дополнительности — фундаментальная идея стратиграфической систематики). — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1969, вып. 94, с. 43—65.
10. Изучение пространственно-временных соотношений. — «Труды

ВСЕГЕИ», 1974, т. 171, с. 222—299. Авт.: В. А. Зубаков, Д. В. Рундквист, В. В. Соловьев и др.

11. *Конторович А. Э.* Опыт формального анализа структуры геологических генетических теорий. — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1968, вып. 79, с. 9—20.

12. *Косыгин Ю. А.* Основы тектоники. М., «Недра», 1974. 211 с.

13. *Косыгин Ю. А., Воронин Ю. А.* Геологическое пространство как основа структурных построений. — «Геология и геофизика», 1965, № 9, с. 3—10.

14. *Косыгин Ю. А., Салин Ю. А., Соловьев В. А.* Философские проблемы геологического времени. — «Вопр. философии», 1974, № 2, с. 96—104.

15. *Красилов В. А.* Палеозоосистемы. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1970, № 4, с. 144—150.

16. *Красилов В. А.* Палеоэкологический метод корреляции континентальных толщ. — «Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол.», 1973, т. 48, вып. 4, с. 37—51.

17. *Круть И. В.* К построению стратиграфической теории. Ст. 1. Принципы стратиграфии. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 7, с. 38—44.

18. *Круть И. В.* К построению стратиграфической теории. Ст. 2. Палеобиогеоэценотическая организация и стратиграфические построения. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 8, с. 26—37.

19. *Леонов Г. П.* Основы стратиграфии. Т. 1. 1973. 527 с. Т. 2. 1974. 486 с.

20. *Медников Б. М.* О реальности высших систематических категорий позвоночных животных. — «Журн. общ. биологии», 1974, т. 35, № 5, с. 659—666.

21. *Мейен С. В.* Введение в теорию стратиграфии. М., 1974. 185 с. (ВИНИТИ).

22. *Мейен С. В.* Спорные вопросы теории стратиграфии. — «Природа», 1974, № 12, с. 16—22.

23. *Меннер В. В.* Биостратиграфические основы сопоставления морских, лагунных и континентальных толщ. 1961. 373 с. (Труды Геол. ин-та АН СССР, вып. 65).

24. *Методологические* вопросы научных исследований в геологии. Программа и методическое пособие к семинару «Применение математических методов и ЭВМ при поисках полезных ископаемых». Вып. 1. Алма-Ата, 1974. 101 с. Авт.: А. М. Боровиков, Ю. А. Воронин, В. И. Губаков и др.

25. *О границах* некоторых систем палеозоя и мезозоя. — «Труды ВСЕГЕИ», 1972, т. 178, с. 28—37. Авт.: В. Н. Верещагин, Л. Д. Кипарисова, О. П. Ковалевский и др.

26. *О совершенствовании* теоретических построений стратиграфии с помощью моделирования на ЭВМ. — В кн.: Применение мат. методов и ЭВМ при поисках полезных ископаемых. Новосибирск, 1972, с. 25—38.

27. *Салоп Л. И.* Общая стратиграфическая шкала докембрия. Л., «Недра», 1973. 309 с.

28. *Симаков К. В.* Время в стратиграфии. — В кн.: Методол. вопр. геол. науки. Киев, 1974, с. 81—106.

29. *Соколов Б. С.* Биохронология и стратиграфические границы. — В кн.: Проблемы общ. и регион. геологии. Новосибирск, «Наука», 1971, с. 155—178.

30. *Сомов В. Д.* Олигоценные отложения Северного Кавказа и их аналоги в сопредельных провинциях. — «Сов. геология», 1969, № 8, с. 134—139.

31. *Степанов Д. Л.* Принципы и методы биостратиграфических исследований. 180 с. (Труды ВНИГРИ, вып. 113).

32. *Степанов Д. Л.* Об основных принципах стратиграфии. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1967, № 10, с. 103—114.

33. *Стратиграфическая* классификация, терминология и номенклатура. Л., «Недра», 1965. 70 с.

34. *Стратиграфия и математика*. Хабаровск, 1974. 207 с. Авт.: А. М. Боровиков, Ю. А. Воронин, Н. Г. Горелова и др.
35. *Тимофеев-Ресовский Н. В., Воронцов Н. Н., Яблоков А. В.* Краткий очерк теории эволюции. М., «Наука», 1969. 404 с.
36. *Тихомиров С. В.* О главных вопросах стратиграфии. — «Геология и разведка», 1968, № 5, с. 3—28.
37. *Халфин Л. Л.* Принципы Никитина — Чернышева — теоретическая основа стратиграфической классификации. — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1968, вып. 94, с. 7—42.
38. *Code of stratigraphic nomenclature*. Amer. Comiss. Stratigr. Nomenclature. — «Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol.», 1961, v. 45, № 5, p. 645—665.
39. *Dollo L.* La paleontologie ethologique. — «Bull. Soc. Belge. Geol. Paleontol., Hydrol.», 1909, t. 23, p. 377—421.
40. *Hedberg H. D.* Chronostratigraphy and biostratigraphy. — «Geol. Mag.», 1965, v. 102, № 5, p. 451—461.
41. *Hedberg H.* (ed.). Introduction to an International Guide to stratigraphic classification, terminology and usage. — «Lethaia», 1972, v. 5, p. 283—295.
42. *Oppel A.* Die Juraformation Englands, Frankreich und des Südwestliche Deutschlands. Stuttgart, 1858. 858 S.
43. *Schenck H. G., Muller S. W.* Stratigraphic terminology. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1941, v. 52, p. 1419—1426.
44. *Schindewolf O. H.* Stratigraphie und Stratotypus. — «Akad. Wiss. u. Liter. Abh. Math.-Naturwiss. Klasse», 1970, № 2, S. 134.
45. *Weller J.* Stratigraphic principles and practic. New York, 1960. 725 p.

4

1. *Адаменко Ю. В., Романовский С. И.* Вычисление вероятности сохранения в разрезе слоя конечной мощности. — В кн.: Применение ЭВМ в геологии и в горн. деле. Л., 1971, с. 36—42.
2. *Адаменко Ю. В., Романовский С. И.* Стохастическое моделирование процессов слоенакопления — теоретическая основа анализа мощностей. — «Труды ВСЕГЕИ», 1973, т. 180, с. 5—38.
3. *Айнемер А. И., Шванов В. Н.* О фациальной значимости гранулометрического состава песчаных золотых отложений. — «Труды ВСЕГЕИ», 1968, т. 150, с. 98—103.
4. *Белоусов В. В.* Мощность отложений как выражение режима колебательных движений земной коры. — «Сов. геология», 1940, № 2—3, с. 34—46.
5. *Белоусов В. В.* Основные вопросы геотектоники. М., Гостеолтехиздат, 1962. 608 с.
6. *Бобров В. А., Романовский С. И.* Факторы, контролирующие формирование флиша. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1970, № 7, с. 108—114.
7. *Вассоевич Н. Б.* Слоистость в свете учения об осадочной дифференциации. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1950, № 5, с. 96—115.
8. *Вистелиус А. Б.* Фазовая дифференциация палеозойских отложений Среднего Поволжья и Заволжья. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963. 203 с.
9. *Вистелиус А. Б.* Красноцветные отложения полуострова Челекен. М., «Наука», 1966. 304 с.
10. *Григорьев С. Н.* Карты относительной мощности. — «Геология и геофизика», 1968, № 7, с. 146—150.
11. *Гроссгейм В. А., Романовский С. И.* К вопросу о стабильности процессов флишеобразования. — «Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол.», 1970, т. 45, № 5, с. 112—117.
12. *Дербинов И. В., Бенько Е. И.* Тектогенез мезо-кайнозойских осадков в свете вариационного анализа мощностей. — «Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья», 1960, вып. 11, с. 108—117.
13. *Дуб Дж.* Вероятностные процессы. М., ИЛ., 1956. 638 с.

14. *Животовская А. И.* К анализу мощностей. — В кн.: Очерки по физ. седиментологии. Л., «Недра», 1964, с. 12—21.
15. *Кноринг Л. Д., Деч В. Н.* Изучение колебательных движений методами выявления скрытых периодичностей. — «Сов. геология», 1972, № 5, с. 81—93.
16. *Колесникова И. С.* Генетическая интерпретация гранулометрических анализов методом Пассега на материалах верхнего палеозоя хр. Малого Каратау. — «Изв. АН КазССР. Сер. геол.», 1966, № 2, с. 112—115.
17. *Колмогоров А. Н.* О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. — «Докл. АН СССР», 1941, т. 31, № 2, с. 99—101.
18. *Колмогоров А. Н.* Решение одной задачи из теории вероятностей, связанной с вопросом о механизме слоеобразования. — «Докл. АН СССР», 1949, т. 65, № 6, с. 693—696.
19. *Костин С. И.* Колебания климата на Русской долине в историческую эпоху. — «Труды Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова», 1965, вып. 181, с. 19—24.
20. *Метод* обзора числовых совокупностей для изучения строения разрезов осадочных толщ. — «Труды ВСЕГЕИ», 1968, т. 150, с. 123—132. Авт.: И. Г. Ханович, Г. Г. Яновский и др.
21. *Миддлтон Г. В.* Возникновение логнормального распределения частот в осадках. — В кн.: Вопр. мат. геологии. Л., «Наука», 1968, с. 37—45.
22. *Предтеченский П. П.* Очерки позднеледниковой и послеледниковой истории климата СССР. — «Труды Лаб. озероведения АН СССР», 1957, т. 5, с. 4—11.
23. *Приходько Ю. Н.* Наблюдения над усадкой углей и песчано-глинистых пород на Интинском каменноугольном месторождении. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1963, № 2, с. 99—105.
24. *Прозоров Ю. В., Розанов Ю. А.* Теория вероятностей. М., «Наука», 1967. 495 с.
25. *Рожков Г. Ф., Трофимова З. М.* Способ статистической обработки гранулометрических данных на электронной вычислительной машине. — «Литология и полезн. ископаемые», 1968, № 2, с. 142—147.
26. *Романовский С. И.* Применение теории информации для решения некоторых задач литологии. — «Труды ВСЕГЕИ», 1968, т. 150, с. 75—92.
27. *Романовский С. И.* Тектонический анализ мощностей на основе стохастического моделирования процессов слоенакопления. — В кн.: Применение мат. методов в геологии. 1968, с. 378—382. (АН КазССР).
28. *Романовский С. И.* Зависимость меры стабильности слоенакопления от функции распределения вероятностей мощностей слоев. — «Геология и геофизика», 1971, № 12, с. 102—107.
29. *Романовский С. И.* О путях решения проблемы образования флиша. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1971, № 1, с. 110—120.
30. *Романовский С. И.* Состояние и перспективы изучения процессов слоенакопления. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1972, № 2, с. 39—46.
31. *Романовский С. И.* О содержательной нагрузке задач фациального анализа. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1973, № 11, с. 104—109.
32. *Рухин Л. Б.* Гранулометрический метод изучения песков. Л., 1947. 143 с. (Ленингр. ун-т).
33. *Серебрянников М. Г., Первовазванский А. А.* Выявление скрытых периодичностей. М., «Наука», 1965. 244 с.
34. *Соловьев А. Д.* Одно комбинаторное тождество и его применение к задаче о первом наступлении редкого события. — «Теория вероятностей и ее приложения», 1966, т. 11, № 2, с. 313—320.
35. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. М., «Мир», 1969. 498 с.
36. *Физуровский Н. А.* Седиментометрический анализ. М., Изд-во АН СССР, 1948. 220 с.
37. *Хабаков А. В.* Динамическая палеогеография, ее задачи и возможности. — «Литол. сб.», 1948, вып. 1, с. 64—82.

38. Хаин В. Е. Геотектонические основы поисков нефти. Баку, Азнефтеиздат, 1954. 692 с.
39. Хворова И. В. Задачи и некоторые результаты изучения литологии формаций. — «Труды геол. ин-та АН СССР», 1963, вып. 81, с. 7—29.
40. Чистяков В. Г. О природе дефицитов размерных фракций терригенных пород. — «Вестн. Ленингр. ун-та», 1970, № 24, с. 136—141.
41. Шванов В. Н. Песчаные породы и методы их изучения. Л., «Недра», 1969. 247 с.
42. Шершук В. В. Графический метод обработки материалов при тектоническом анализе мощностей. — «Геология и разведка», 1971, № 4, с. 19—22.
43. Шнитников А. В. Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария. — «Зап. Геогр. о-ва СССР», 1957, т. 16, с. 3—7.
44. Яншин А. Л., Гарецкий Р. Г. Тектонический анализ мощностей. — В кн.: Методы изучения тектон. структур. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 115—333.
45. Allen G. P., Castaing P., Klingebiel A. Distinction of elementary sand populations in the Gironde estuary (France) by R-mode factor analysis of grain size data. — «Sedimentology», 1972, v. 19, N 1—2, p. 21—35.
46. Anderson R. Y. Sclolar terrestrial climatic patterns in varved sediments. — «Ann. N. Y. Acad. Sci.», 1961, v. 95, N 1, p. 17—36.
47. Bennett J. G. Broken coal. — «J. Inst. Full.», 1936, v. 10, p. 22—39.
48. Brezina J. Kapteyn's transformation of drain size distribution. — «J. Sediment. Petrology», 1963, v. 33, N 4, p. 931—937.
49. Doeglas D. J. Grain-size indices, classification and environment. — «Sedimentology», 1968, v. 10, N 2, p. 83—100.
50. Friedman G. M. Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics. — «J. Sediment. Petrology», 1961, v. 31, N 4, p. 514—529.
51. Friedman G. M. On sorting, sorting coefficients and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones. — «J. Geology», 1962, v. 70, N 6, p. 737—753.
52. Friedman G. M. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. — «J. Sediment. Petrology», 1967, v. 37, N 2, p. 327—354.
53. Greenwood B. Sediment parameters and environment diserimination: an application of multivariate statistics. — «Canad. J. Earth Sci.», 1969, v. 6, N 6, p. 1347—1358.
54. Kittleman L. R. Jr. Application of Rosin's distribution in size-frequency analysis of clastic rocks. — «J. Sediment. Petrology», 1964, v. 34, N 3, p. 483—502.
55. Klein G. Diverse origins of graded bedding. — «Geol. Soc. Amer. Spec. Paper», 1965, N 82, p. 109.
56. Koldijk W. S. On environment sensitive grain-size parameters. — «Sedimentology», 1968, v. 10, N 1, p. 57—69.
57. Krumbein W. C. Fortran IV computer program for simulation of transgression and regression with continuous-time Markov models. Comput. Contrib. State Geol. Surv. Univ. Kans., 1968, N 26. 38 p.
58. Mason C. C., Folk R. L. Differentiation of beach, dune and eolian flat environments by size analysis. — «J. Sediment. Petrology», 1958, v. 28, N 2, p. 211—226.
59. Passega R. Texture as characteristic of clastic deposition. — «Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.», 1957, v. 41, N 9, p. 1952—1984.
60. Passega R., Byramjee R. Grain-size image of clastic deposits. — «Sedimentology», 1969, v. 13, N 3—4, p. 233—252.
61. Pettijohn F. J. Sedimentary rocks. N. Y., 1957. 736 p.
62. Rogers J. J. W., Schubert C. Size distributions of sedimentary populations. — «Science», 1963, v. 141, N 3583, p. 801—802.
63. Royle Ch. F. Jr. Recognition of fluvial environments by particle-size characteristics. — «J. Sediment. Petrology», 1968, v. 38, N 4, p. 1171—1178.

64. Sahu B. K. Depositional mechanisms from size analysis of clastic sediments. — «J. Sediment. Petrology», 1964, v. 34, N 1, p. 73—83.
65. Shepard F. P., Young R. Distinguishing between beach and dune sands. — «J. Sediment. Petrology», 1961, v. 31, N 2, p. 196—214.
66. Skoček O. P. Carboniferous sediments of central Bohemia, their grain-size distribution and possibilities of the sedimentary processes reconstruction. — «Cas. Miner. a. geol.», 1971, v. 16, N 2, p. 99—112.
67. Solohub J. T., Klován J. E. Evaluation of grain-size parameters in lacustrine environments. — «J. Sediment. Petrology», 1970, v. 40, N 1, p. 81—101.
68. Walker G. P. L. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. — «J. Geology», 1971, v. 79, N 6, p. 696—714.
69. Zeller E. Y. Cycles and psychology. — «Bull. State Geol. Surv. Kans.», 1964, N 169/2, p. 631—636.

5

1. Боровиков Л. И., Бурков Ю. К. Корреляционный анализ закономерностей распределения малых элементов для решения вопросов седиментогенеза. — В кн.: Докл. сов. геологов на XXIII сессии Междунар. геол. конгресса. Проблема № 8. М., «Наука», 1968, с. 127—135.
2. Бурков Ю. К. Ассоциации химических элементов и ряды их подвижности. — В кн.: Опорн. разрез силура и нижн. девона Подолии. Л., «Наука», 1972, с. 199—210.
3. Бурков Ю. К. Определение условий формирования метаморфизованных осадочных образований путем изучения ассоциаций и рядов подвижности химических элементов. — В кн.: Метод. указания по геол. съемке м-ба 1 : 50 000. Вып. 4. Л., «Недра», 1972, с. 148—150.
4. Бурков Ю. К. Малые элементы глинистых пород. — В кн.: Фациальн. типы глинист. пород. Л., «Недра», 1973, с. 133—146.
5. Бурков Ю. К., Дюфур М. С. Применение геохимических критериев для решения вопроса об исходном составе и возрасте пород музкольского метаморфического комплекса (Центральный Памир). — «Докл. АН СССР», 1973, т. 242, № 3, с. 683—686.
6. Бурков Ю. К., Озол А. А. К вопросу об условиях выветривания на Уральских водосборах в кунгурский век. — «Докл. АН СССР», 1971, т. 199, № 2, с. 441—443.
7. Бурков Ю. К., Каплан М. Е., Олейников А. Н. Ассоциации химических элементов и ряды их подвижности в триасовых отложениях Южного Приморья. — «Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер.», 1973, т. 180, с. 53—60.
8. Вещественный состав медно-никелевых руд Талнахского и Октябрьского месторождений и закономерности его изменения. — В кн.: Геология и полезн. ископаемые Норильского р-на. Норильск, 1971, с. 182—185. Авт.: Д. А. Додин, Л. А. Байкова, Б. Н. Батуев и др.
9. Гурская Л. И., Ляхницкая И. В., Бурков Ю. К. Использование корреляционного анализа для перспективной количественной оценки рудоносности гипербазитовых массивов Печенгского района. — В кн.: Основы науч. прогноза месторождений рудн. и нерудн. полезн. ископаемых. Л., 1971, с. 239—240.
10. Миллер Р., Кан Дж. Статистический анализ в геологических науках. М., «Мир», 1965. 484 с.
11. Пустовалов Л. В. Геохимические фации и их значение в общей и прикладной геологии. — «Проблемы сов. геологии», 1933, № 1, с. 57—78.
12. Страгов Н. М. Основы теории литогенеза. Т. 1. М., 1960. 212 с.
13. Туганова Е. В., Бурков Ю. К. Возможности оценки никеленосности траппов Сибирской платформы методом многократной корреляции. — «Сов. геология», 1972, № 10, с. 144—147.
14. Ферсман А. Е. Избранные труды. Т. 2. М., 1953. 768 с. (АН СССР).

1. *Абрамович И. И., Клушин И. Г.* Вариации состава раннегеосинклинальных гранитоидных комплексов и особенности глубинного строения земной коры. — «Сов. геология», 1974, № 12, с. 34—47.
2. *Абрамович И. И., Клушин И. Г.* Математическая модель эволюции альпийотипных гипербазитов. — «Труды ВСЕГЕИ», 1975, т. 223, с. 62—78.
3. *Артёмьев М. Е.* Изостазия территории СССР. М., «Наука», 1975. 214 с.
4. *Белоусов А. Ф.* Связь состава и массивности вулканизма с тектоническими факторами. — В кн.: Проблемы магмат. геологии. Новосибирск, «Наука», 1973, с. 262—278.
5. *Белоусов В. В.* Основы геотектоники. М., «Недра», 1975. 260 с.
6. *Борисов А. А.* Глубинная структура территории СССР по геофизическим данным. М., 1967. 302 с.
7. *Влодавец В. И.* Вулканическая деятельность в цифрах и некоторые выводы. — В кн.: Геодинамика, магнезиальное образование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974, с. 134—180.
8. *Гордиенко В. В.* Тепловые аномалии геосинклиналей. Киев, «Наукова думка», 1975. 141 с.
9. *Ицксон М. И.* Связь металлогенических провинций с вулканогенными поясами, крупными геотектоническими элементами и типами земной коры (на примере Тихоокеанского кольца). — «Труды ВСЕГЕИ», 1973, т. 191, с. 102—120.
10. *К вопросу о природе основных слоев земной коры океанического типа.* — В кн.: Исследования по проблеме рифт. зон Мирового океана. М., «Наука», 1972, с. 216—236. Авт.: Л. В. Дмитриев, Г. Б. Удинцев, А. Я. Шараевкин, О. Г. Сорохтин.
11. *Каула У. М.* Тектоника и гравитационное поле Земли. — В кн.: Природа твердой Земли. М., «Мир», 1975, с. 210—222.
12. *Клушин И. Г., Абрамович И. И.* Об эволюции состава альпийотипных гипербазитов. — «Докл. АН СССР», 1975, т. 221, № 2, с. 451—453.
13. *Кузнецов Ю. А.* Основные типы магнезиально контролируемых структур и магматические формации. — «Геология и геофизика», 1970, № 9, с. 3—24.
14. *Люстих Е. Н.* Неомобилизм и конвекция в мантии Земли. Ст. 1. — «Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол.», 1965, т. 40, № 1, с. 5—27.
15. *Магницкий В. А.* Основы физики Земли. М., Геодиздат, 1963. 290 с.
16. *Материков М. П.* Оловоносные ветви Тихоокеанского рудного пояса в глубине Азиатского континента. — В кн.: Рудоносн. провинции и генет. типы месторождений олова и вольфрама. Новосибирск, «Наука», 1975, с. 58—70.
17. *Милановский Е. Е.* Рифтовые зоны геологического прошлого и связанные с ними образования. Ст. 2. — «Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол.», 1975, т. 50, вып. 5, с. 57—84.
18. *Моисеев У. И., Соловьева З. А., Кутюлин В. А.* Теплопроводность гранита при высокой температуре. — «Докл. АН СССР», т. 165, № 3, с. 670—671.
19. *Мясников В. П., Ушаков С. А., Федьинский В. В.* О механизме внутреннего развития Земли в свете геофизических данных. — «Вестн. Моск. ун-та», 1971, № 3, с. 9—26.
20. *Опыт частотного зондирования Земли по результатам сферического анализа вариаций геомагнитного поля.* — «Геомагнетизм и аэронавигация», 1970, т. 10, № 2, с. 374—377. Авт.: М. Н. Бердичевский, Л. Л. Ваньян, Л. П. Латугин и др.
21. *Палеозоиды Евразии и некоторые вопросы эволюции геосинклинального процесса.* — «Сов. геология», 1972, № 12, с. 7—25. Авт.: А. В. Пейве, Н. А. Штрейтс, А. А. Моссаковский и др.
22. *Ритман А.* Вулканы и их деятельность. М., «Мир», 1964. 437 с.
23. *Смирнов С. С.* О Тихоокеанском рудном поясе. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1946, № 2, с. 13—28.

24. *Сорохтин О. Г.* Плотностная конвекция в мантии Земли и возможная природа тектонических циклов. — «Физика Земли», 1974, № 5, с. 29—42.
25. *Ушаков С. А.* Строение и развитие Земли. М., «Наука», 1974. 269 с.
26. *Файф У.* Несколько мыслей о гранитных магмах. — В кн.: Механизм интрузий магмы. М. «Мир», 1972, с. 173—187.
27. *Хаин В. Е.* Учение о геосинклиналях на новом этапе развития геологической науки. — «Вестн. Моск. ун-та», 1974, № 2, с. 3—21.
28. *Чехович В. Д., Зоненшайн Л. П., Волкова Л. П.* О некоторых особенностях развития мезозойских и кайнозойских структур южных и центральных Анд. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1975, № 12, с. 62—74.
29. *Шейнманн Ю. М.* Новая глобальная тектоника и действительность. Ст. 2. — «Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол.», 1974, т. 49, вып. 1, с. 5—26.
30. *Эберт Г.* Краткий справочник по физике. М., 1963. 552 с.
31. *Элдер Дж.* Количественное лабораторное изучение динамических моделей магматических интрузий. — В кн.: Механизм интрузий магмы. М., «Мир», 1972, с. 213—229.
32. *Эрлих Э. Н.* Современная структура и четвертичный вулканизм западной части Тихоокеанского кольца. Новосибирск, «Наука», 1973. 244 с.
33. *Anderson D. L.* Accelerated plate tectonics. — «Science», 1975, v. 187, N 4181, p. 1077—1079.
34. *Avdeiko G. P.* Evolution of geosynclines on Kamchatka. — «Pac. Geol.», 1971, v. 3, p. 1—14.
35. *Bass M. N.* Variable abyssal basalt populations and their relation to sea-floor spreading rates. — «Earth. a. Planet. Sci. Lett.», 1974, v. 11, N 1, p. 18—22.
36. *Bemmelen R. W., van.* Geodynamic models. An evaluation and synthesis. Amsterdam, «Elsevier», 1972. 267 p.
37. *Berg E., Sutton G. H.* Dynamic interaction of seismic and volcanic activity of the Nazca Plate edges. — «Phys. Earth a. Planet. Interiors», 1974, v. 9, N 3, p. 175—182.
38. *Bott M. H. P.* The mantle transition zone as possible source of global gravity anomalies. — «Earth a. Planet. Sci. Lett.», 1971, v. 11, N 1, p. 28—34.
39. *Bullen K. E.* Compression in the Earth. — «Geophys. J. Roy. Astr. Soc.», 1968, v. 16, N 1, p. 31—36.
40. *Chung D. H.* Effects of Iron/Magnesium Ratio on P-and S-wave velocities in olivine. — «J. Geophys. Res.», 1970, v. 75, N 35, p. 7353—7361.
41. *Coleman P. J.* (ed.). The western Pacific Island arcs, marginal seas, geochemistry. Perth, 1973. 675 p.
42. *Coleman R. G.* Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. — «J. Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 5, p. 1212—1222.
43. *Crustal evolution and global tectonics: a petrogenic view.* — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1974, v. 85, N 6, p. 843—858. Aut.: A. E. Engel, S. P. Itson, C. G. Engel a. o.
44. *Dickinson W. R.* Evidence for plate-tectonic regimes in the rock record. — «Amer. J. Sci.», 1972, v. 272, N 7, p. 551—576.
45. *Dickinson W. R.* Widths of modern arc-trench gap proportional to past duration of igneous activity in associated magmatic arcs. — «J. Geophys. Res.», 1973, v. 78, N 17, p. 3376—3389.
46. *Dietz R. S.* Passive continents, spreading sea-floors and collapsing continental rises. — «Amer. J. Sci.», 1966, v. 264, N 3, p. 177—193.
47. *Ding Yun-yu.* SP' phases and the crustal thickness of China. — «Acta Geophys. Sinica», 1965, v. 4, N 3, p. 168—172.
48. *Dymond J.* K-Ar ages of Tahiti and Moorea, Society Islands and implications for the hot spot model. — «Geology», 1975, v. 3, N 5, p. 236—240.
49. *Dynamics of the down-going lithosphere.* — «Tectonophysics», 1973, v. 19, N 2, p. 133—147. Aut.: J. Oliver, B. Isacks, I. M. Barazangi, W. Mitronovas.
50. *Faure-Muret A., Choubert G.* Proposition d'un nouveau modèle tectonique pour la Méditerranée occidentale. — «C. R. Acad. Sci.», 1975, D 280, N 17, p. 1947—1950.

51. Fisher I. An astrogeodetic world datum from geoidal heights based on the flattening $f = 1/298,3$. — «J. Geophys. Res.», 1960, v. 65, p. 2067—2107.
52. Froidevaux C., Brouss R., Bellon H. Hot spot in France. — «Nature», 1974, v. 248, N 5451, p. 749—751.
53. Gaposchkin E. M., Lambeck K. Earth's gravity field to the sixteenth degree and station coordinates from satellite and terrestrial data. — «J. Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 20, p. 4855—4891.
54. Gilluly J. Steady plate motion and episodic orogeny and magmatism. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1973, v. 84, N 2, p. 499—514.
55. Girdler R. W. Earth satellites, terrestrial heat-flow, mantle convection and the location of extensional and compressional features on the Earth's surface. — «Proc. Geol. Assoc. Colchester», 1967, v. 78, part 1, p. 165—178.
56. Green D. H. Contrasted melting relations in a pyrolyte upper mantle under midoceanic ridge, stable crust and island arc environments. — «Tectonophysics», 1973, v. 17, N 3, p. 285—297.
57. Green D. H. Genesis of archean peridotitic magmas and constraints on archean geothermal gradients and tectonics. — «Geology», 1975, v. 3, N 1, p. 15—18.
58. Guier W. H., Newton R. R. The Earth's gravity field as deduced from Doppler tracking of five satellites. — «J. Geophys. Res.», 1965, v. 70, N 18, p. 4613—4626.
59. Gupta H. K., Narain H. Crustal structure in the Himalayan and Tibet Plateau region from surface wave dispersion. — «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1967, v. 57, N 2, p. 235—248.
60. Gupta H. K., Sato Y. Regional characteristics of Love wave group velocity dispersion in Eurasia. — «Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.», 1968, v. 46, N 1, p. 41—52.
61. Gupta H. K., Santo T. Worldwide investigation of the Mantle Rayleigh-wave group velocities. 1. Dispersion data for thirty-one new great-circle path. — «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1973, v. 63, N 1, p. 271—281.
62. Hasebe K., Fujii N., Uyeda S. Thermal processes under island arcs. — «Tectonophysics», 1970, v. 10, N 1—3, p. 335—355.
63. Hess H. H. History of ocean basins. In.: Petrol. studies. A vol. in honor of A. F. Buddington. N. Y., 1962, p. 599—620.
64. Hietanen A. Idaho Batholith, New Pierce and Bungalow Clearwater County, Idaho. Geol. Surv. Prof. Paper, 1963, N 344 D. 42 p.
65. Isacks B., Molnar P. Mantle earthquake of the lithosphere. — «Nature», 1970, v. 223, p. 1121—1124.
66. Isacks B., Molnar P. Distribution of stress in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes. — «Rev. Geophys.», 1971, v. 19, p. 103—174.
67. Isacks B., Oliver J., Sykes L. R. Seismology and the new global tectonics. — «J. Geophys. Res.», 1968, v. 73, N 18, p. 5855—5899.
68. Ivanov R. Zonal arrangement of Rock series with respect to deap-seated masses. — In.: XXXIII Intern. Geol. Congr., 1968, v. 1, p. 43—56.
69. Jakes P., Gill J. Rare earth elements and the island arc tholeiite series. — «Earth Planet. Sci. Lett.», 1970, v. 9, p. 17—28.
70. Jakes P., White A. J. R. K/Rb ratios of rocks from island arcs. — «Geochim. Cosmochim. Acta», 1970, v. 34, N 8, p. 849—856.
71. Jamieson B. G., Clark D. B. Potassium and associated elements in tholeiitic basalts. — «J. Petrol.», 1970, v. 11, N 2, p. 183—204.
72. Karig D. E., Moore G. F. Tectonic complexities the Bonin arc system. — «Tectonophysics», 1975, v. 27, N 2, p. 97—118.
73. Kaula W. M. Earth's gravity field: relation to global tectonics. — «Science», 1970, v. 169, N 3949, p. 982—985.
74. Kaula W. M. Global gravity and mantle convection. — «Tectonophysics», 1972, v. 13, N 1—4, p. 341—359.
75. Kaula W. M. Absolute plate motions by boundary velocity minimizations. — «J. Geophys. Res.», 1975, v. 80, N 2, p. 244—248.

76. *Kaula W. M.* On the long term evolution of mantle convection. — In.: IUGG. XVI Gen. Assambly, Grenoble, 1975, p. 19.
77. *Khan M. A.* Some geophysical implications of the satellite-determined geogravity field. — «Geophys. J. Roy. Astr. Soc.», 1971, v. 23, N 1, p. 15—43.
78. *Klushin I. G., Abramovich I. I.* The form of geoid, seismicity and the composition of mantle magmas products. — In.: IUGG. XVI Gen. Assambly, Grenoble, 1975, p. 15—16.
79. *Kuno H.* Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. — «Bull. Volc.», Napoli, 1966, t. 29, p. 195—222.
80. *Le Pichon X.* Sea-floor spreading and continental drift. — «J. Geophys. Res.», 1968, v. 73, N 12, p. 3661—3697.
81. *Magnetic and petrologic variations along the Galapagos spreading center and their relation to the Galapagos melting anomaly.* — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1975, v. 86, N 5, p. 683—694. Auth.: R. N. Anderson, D. A. Clague a. o.
82. *Marsh J. G., Vincent S.* Global detailed geoid computation and model analysis. — «Geophys. Surv.», 1974, v. 4, N 4, p. 481—511. (NASA/GODDARD Space Flight Center).
83. *McKensie D. P.* The viscosity of the lower mantle. — «J. Geophys. Res.», 1966, v. 71, N 6, p. 3995—4010.
84. *McKenzie D. P.* Plate tectonics of the mediterranean region. — «Nature», 1970, v. 226, N 239, p. 15—21.
85. *McKenzie D. P., Morgan W. J.* Evolution of triple junctions. — «Nature», 1969, v. 224, N 5215, p. 125—133.
86. *Mitchell A. H. G., Garson M. S.* Relationship of porphyry copper and Circum-Pacific tin deposits to paleo-Benioff zones. — «Trans. Inst. Min. Metall.», 1972, v. 81, N 783, p. 10—25.
87. *Miyashiro A.* Metamorphism and related magmatism in plate tectonics. — «Amer. J. Sci.», 1972, v. 272, p. 629—656.
88. *Miyashiro A.* Classification, characteristics and origin of ophiolites. — «J. Geol.», 1975, v. 83, N 2, p. 249—281.
89. *Morgan W. J.* Deep mantle convection plumes and plate motions. — «Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.», 1972, v. 56, N 2, p. 203—213.
90. *Ninkovich D., Hays J. D.* Mediterranean Island arcs and origin of high potash volcanoes. — «Earth a. Planet. Sci. Lett.», 1972, v. 16, N 3, p. 331—345.
91. *Plafker G.* Alaskan earthquake of 1964 and Chilean earthquake of 1960., implications for arc tectonics. — «J. Geophys. Res.», 1972, v. 77, p. 901—925.
92. *Sainsbury C. L.* Tin resources of the world. Bull. US Geol. Surv., 1969, N 1301. 55 p.
93. *Schatz J. F., Simmon G.* Thermal conductivity of earth materials at high temperatures. — «J. Geophys. Res.», 1972, v. 77, p. 6966—6983.
94. *Scheidegger K. F.* Temperatures and compositions of magmas ascending along mid-ocean ridges. — «J. Geophys. Res.», 1973, v. 78, N 17, p. 3340—3355.
95. *Shaw H. R., Jackson E. D.* Linear island chains in the Pacific: result of thermal plumes or gravitational anchors. — «J. Geophys. Res.», 1973, v. 78, N 35, p. 8634—8652.
96. *Sigimura A.* Multiple correlation between composition of volcanic roks and depth of earthquake foci. — In.: The Western Pacific. 1973, p. 471—482.
97. *Solomon C. S., Sleep N. H.* Some simple physical models for absolute plate motions. — «J. Geophys. Res.», 1974, v. 79, N 17, p. 2557—2567.
98. *Sykes L. R.* Seismicity of the Indian Ocean and a possible nascent island arc between Ceylon and Australia. — «J. Geophys. Res.», 1970, v. 75, N 26, p. 5041—5055.
99. *Tseng Jung-sheng, Sung Zi-an.* Phase velocities of Rayleigh waves in China. — «Acta Geophys. Sinica», 1963, v. 12, N 2, p. 148—165.
100. *Watts A. B., Talwani M.* Gravity effect of downgoing lithospheric slabs beneath island arcs. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1975, v. 86, N 1, p. 1—4.

101. *Wilson J. T.* Continental drift. — «Sci. Amer.», 1963, v. 208, p. 86—100.
102. *Wilson J. T.* Mantle plumes and plate motions. — «Tectonophysics», 1973, v. 19, N 2, p. 149—164.
103. *Yamasaki M., Brousse R.* La diversité des basaltes. — «Bull. Soc. Geol. France», 1964, ser. 7, t. 5, N 2, p. 202—209.
104. *Yukutake T., Tachinaka H.* Separation of the earth's magnetic field into the drifting and the standing parts. — «Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.», 1969, v. 47, p. 65—97.

8

1. *Бейли Б.* Введение в петрологию. М., «Мир», 1972. 280 с.
2. *Горшков Г. С., Боговяленская Г. Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955—1963 гг. М., «Наука», 1965. 170 с.
3. *Зоткин И. Т., Цветков В. И.* О поисках метеоритных кратеров на Земле. — «Астрон. вестн.», 1970, т. 4, № 1, с. 55—65.
4. *Косыгин Ю. А., Соловьев В. А.* Принципы историзма и тектоника. — «Геология и геофизика», 1974, № 5, с. 49—56.
5. *Кринов Е. Л.* Метеоритные кратеры на поверхности Земли. — «Метеоритика», 1962, вып. 22, с. 3—30.
6. *Луцицкий И. В.* Основы палеовулканологии. М., «Наука», 1971. Т. 1. 479 с. Т. 2. 382 с.
7. *Масайтис В. Л.* Геологические последствия падений кратерообразующих метеоритов. Л., «Недра», 1973. 18 с.
8. *Масайтис В. Л.* Некоторые древние метеоритные кратеры на территории СССР. — «Метеоритика», 1974, вып. 33, с. 64—68.
9. *Покровский Г. И.* Взрыв. М., «Недра», 1972. 182 с.
10. *Поляков М. М., Трухалев А. И.* Попига́йская вулкано-тектоническая кольцевая структура. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1974, № 4, с. 85—94.
11. *Рамберг Г.* Термодинамика и кинетика петрогенезиса. — В кн.: Земн. кора М., ИЛ, 1957, с. 447—466.
12. *Станюкович К. П., Федьинский В. В.* О разрушительном действии метеоритных ударов. — «Докл. АН СССР», 1947, т. 57, № 2, с. 129—132.
13. *Фирсов Л. В.* О метеоритном происхождении Пучеж-Катунского кратера. — «Геотектоника», 1965, № 2, с. 106—118.
14. *Bostock H. H.* The Clearwater complex, New Quebec. — «Bull. Geol. Surv. Canada», 1969, v. 178, p. 63.
15. *Brögger W.* Die Eruptivgesteine des Kristian gebietes. Bd. 2. 1895. 183 S.
16. *Bucher W. H.* Cryptoexplosion structures caused from without or from within the earth? («astroblemes» or «geoblemes»?) — «Amer. J. Sci.», 1963, v. 261, N 7, p. 597—649.
17. *Currie K. L.* Geology and petrology of the Manicouagan resurgent caldera. — «Bull. Geol. Surv. Canada», 1972, N 198, p. 153.
18. *Das Ries.* Geologie, Geophysik und Genese eines Kraters. — «Geologica Bavarica», 1969, N 61, S. 478.
19. *Dence M. R.* Impact melts. — «Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 23, p. 5552—5565.
20. *Dence M. R.* The nature and significance of terrestrial impact structures. — In.: IGG, 24 ses., sect. 15. Montreal. 1972, p. 7789.
21. *Die Forshungsboren Nördlingen 1973.* — «Geologica Bavarica», 1974, N 72, S. 98.
22. *Engelhardt V. W.* Detrital impact formation. — «Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 23, p. 5566—5574.
23. *French B. M.* Shock metamorphism as a geological process. — In.: Shock metamorphism of natural materials. Ed. B. M. French, N. M. Short. Baltimore, 1968, p. 1—17.
24. *French B. M.* Production of deep melting by large meteorite impacts:

the Sudbury structure, Canada. — In.: IGC, 24 ses., sect. 15, Montreal. 1972, p. 125—132.

25. Gault D. E. Displaced mass, depth, diameter and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks. — «Moon», 1973, N 6, p. 32—44.

26. Millman P. M. The space scars of earth. — «Nature», 1971, v. 232, N 5307, p. 161—164.

27. Shock metamorphism of natural materials. Ed. B. M. French, N. M. Short. Baltimore, 1968, p. 510.

28. New developments in Sudbury. — «Geol. Assoc. Spec. Paper», 1972, N 10, p. 124.

29. Stöffler D. Progressive metamorphism and classification of shocked and brecciated crystalline rocks at impact craters. — «Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 23, p. 5566—5574.

30. Urey H. C. Cometary collisions and geological periods. — «Nature», 1973, v. 242, p. 32—33.

9

1. Абрамович И. И. Петрохимические критерии эволюции магматизма геосинклинальных областей. — В кн.: Магмат. и метаморф. образования Сибири. М., «Недра», 1966, с. 145—146.

2. Абрамович И. И. Петрохимические индикаторы эволюции магматизма орогенных зон. — Докл. сов. геологов на XXIII сессии МГК. М., «Наука», 1968, с. 119—120.

3. Абрамович И. И., Груза В. В. Фациально-формационный анализ магматических комплексов. Л., «Недра», 1972. 237 с.

4. Абрамович И. И., Груза В. В. Петрохимические инварианты и диахроническая структура вулканизма Алтае-Саянских каледонид. — В кн.: Эволюция вулканизма в истории Земли. М., «Наука», 1973, с. 61—62.

5. Абрамович И. И., Клушин И. Г. Вариации состава раннегеосинклинальных гранитоидных комплексов и особенности глубинного строения земной коры. — «Сов. геология», 1974, № 12, с. 34—47.

6. Аксаментова Н. В. Сравнительная характеристика химизма разновозрастных орогенных базальт-андезит-диабазитовых серий. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1971, № 11, с. 36—43.

7. Барт Т. Ф. В. Идеи о взаимоотношении осадочных и изверженных пород. — «Геохимия», 1962, № 4, с. 296—299.

8. Белоусов А. Ф. Статистические особенности поведения калия в базальтоидах при зеленокаменном метаморфизме. — «Геохимия», 1971, № 7, с. 830—836.

9. Белоусов А. Ф., Налетов Б. Ф., Полякова З. Г. Статистические сравнения химизма кислых вулканитов геосинклинальных орогенных и платформенных областей и вопросы их петрогенеза. — «Геология и геофизика», 1971, № 10, с. 3—12.

10. Беус А. А. Геохимия литосферы. М., «Недра», 1972. 296 с.

11. Блюмштейн Э. И., Грачев А. Ф. Эволюция вулканизма материковых и океанических рифтовых областей. — В кн.: Эволюция вулканизма в истории Земли. М., 1973, с. 14—15.

12. Бондаренко В. Н., Золотарев Б. П. Основные тенденции петрохимической эволюции толентовых серий. — Там же, с. 22—24.

13. Бондаренко В. Н., Соловьев В. А., Шилов В. Н. Изменение во времени петрохимических особенностей продуктов вулканизма Курильских островов. — Там же, с. 149—150.

14. Велицкий В. В., Пинус Г. В. Об эволюции химического состава вещества верхней мантии. — В кн.: Проблемы петрологии и генет. минералогии. М., «Наука», 1969, с. 173—182.

15. Викман Ф. Э. Концепция блоков и региональная геохимическая распространенность. — В кн.: Проблемы геохимии. Посв. акад. А. П. Виноградову. М., «Наука», 1965, с. 663—668.

16. *Гольцко И. Н.* Геохимические закономерности эволюции вулканизма. — В кн.: Геодинамика вулканизма и гидротерм. процесса. Петропавловск-Камчатский, 1974, с. 208.

17. *Горлацкий Б. А.* Выявление генетических особенностей докембрийских формаций методами геохимических исследований (на примере Украинского щита). — В кн.: Вопр. петрохимии. Л., 1969, с. 434—435.

18. *Жданов В. В.* Магматизм зон океанизации материковой коры. — Материалы IV Всесоюз. петрограф. совещ. Баку, Изд-во АН АзССР, 1969, с. 122—124.

19. *Заарицкий А. П.* Введение в петрохимию изверженных горных пород. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950. 400 с.

20. *Изох Э. П., Пономарева А. П.* Об опыте формационного анализа гранитоидов в Западном Узбекистане. — В кн.: Проблемы магмат. геологии. Новосибирск, «Наука», 1973, с. 188—212.

21. *Каденская М. И.* Особенности ультраосновных пород Анабарского, Алданского и Украинского щитов. — «Учен. зап. Ленингр. пед. ин-та им. А. И. Герцена», 1966, вып. 290, с. 69—100.

22. *Кен А. Н.* Геологические формации центральной части Алтае-Саянской складчатой области и их рудоносность. — «Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер.», 1964, вып. 103, с. 2—57.

23. *Кепежинская В. В.* Об эволюции позднепалеозойского и мезо-кайнозойского вулканизма МНР. — В кн.: Эволюция вулканизма в истории Земли. М., 1973, с. 96—99.

24. *Клушин И. Г., Абрамович И. И.* Об эволюции состава альпинотипных гипербазитов. — «Докл. АН СССР», 1975, т. 221, № 2, с. 451—453.

25. *Кутюлин В. Д.* Проблемы петрохимии и петрологии базальтов. Новосибирск, «Наука», 1972. 208 с.

26. *Кухаренко А. А.* Геохимическая эволюция щелочных магматических комплексов восточной части Балтийского щита. — В кн.: Междунар. геохим. конгресс 1971. Т. 1. 1972, с. 505—518.

27. *Марин Ю. Б., Иванов В. С.* Об общей направленности изменения минерального и химического составов в разновозрастных гранитоидных сериях (на примере гранитоидов Северного Казахстана и Центральной Чукотки). — В кн.: Магмат. породы Дальнего Востока. Владивосток, 1973, с. 223—235.

28. *Масайтис В. Л.* Состав толеитовых базальтов платформ и геологическое время. — «Зап. Всесоюз. минерал. о-ва», 1970, т. 99, № 2, с. 192—199.

29. *Масайтис В. Л., Рябенко А. А.* Эволюция состава базитов Сибирской платформы во времени. — В кн.: Вопр. петрохимии. Л., 1969, с. 323—324.

30. *Милашев В. А.* Кимберлитовые провинции. Л., «Недра», 1974. 238 с.

31. *Наливкина Э. Б., Бурков Ю. К., Русанов М. С.* Эволюционный ряд офиолитовых формаций и петрохимические черты его ранних членов. — В кн.: Вопр. петрохимии. Л., 1969, с. 294—296.

32. *Основные особенности вулканизма на разных стадиях развития эвгеосинклиналей (по данным палеовулканологических исследований на Урале).* — В кн.: Эволюция вулканизма в истории Земли. М., 1973, с. 16—48. Авт.: С. Н. Иванов, Г. Ф. Червяковский и др.

33. *Полов В. Е., Трофимов В. А.* Количественная оценка эволюции магматизма складчатых областей по петрохимическим данным (на примере Горного Алтая). — В кн.: Вопр. петрохимии. Л., 1969, с. 231—238.

34. *Ронов А. Б.* Общие тенденции в эволюции состава земной коры, океана и атмосферы. — «Геохимия», 1964, № 8, с. 715—743.

35. *Ротман В. К.* Петрохимическая эволюция лав Среднего Камчатского хребта. — В кн.: Петрохим. особенности молод. вулканизма. М., 1963, с. 56—70. (АН СССР).

36. *Рундквист Д. В.* Эволюция рудообразования в истории геологического развития и вопросы изучения филогенеза генетических типов месторождений. — «Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер.», 1971, т. 158, с. 312—331.

37. *Скублов Г. Т.* О цикличности и направленности в развитии ороген-

ного вулканизма (на примере Токрауской структурно-формационной зоны, Центральный Казахстан). — В кн.: Эволюция вулканизма в истории Земли. М., 1973, с. 77—78.

38. Чернов В. И. Проблема петрохимической цикличности, вулканизма и взаимоотношений между источниками основной и кислой магмы (на примере Рудного Алтая). — «Иzv. вузов. Геология и разведка», 1973, № 1, с. 49—57.

39. Шеймович В. С. Изменение содержания щелочей в вулканитах в ходе игнибритообразующих извержений. — «Докл. АН СССР», 1972, т. 202, № 3, с. 681—684.

40. Шилов В. Н. Эволюция вулканизма Сахалина и Курильских островов. — В кн.: Эволюция вулканизма в истории Земли. М., 1973, с. 148—149.

41. Энгель А. Э. Д., Энгель Ц. Г. Происхождение континентов. — В кн.: Очерки современ. геохимии и аналит. химии. М., «Наука», 1972, с. 76—87.

42. Agterberg F. P. The use of multivariate Markov schemes in petrology. — «J. Geol.», 1966, v. 74, N 5, p. 764—785.

43. Choubert B. Principes evolutions de la formation des roches ignées. — «Mem. Soc. Geol. France, N. S.», 1963, t. 42, fasc. 3, p. 1—109.

44. Crustal evolution and global tectonics: a petrogenic view. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1974, v. 85, p. 843—858. Aut.: Engel A. E. J., Itson S. P., Engel C. G. a. o.

45. Engelhardt W. Kreislauf und Entwicklung in der Geschichte der Erdrinde. — «Nova Acta Leopold.», 1959, v. 21, N 143, S. 59—64.

46. Fahrig W. F., Eage K. E. The chemical evolution of the Canadian shield. — «Canad. J. Earth Sci.», 1968, v. 5, N 5, p. 1247—1252.

47. Glangeaud L., Létolle R. Evolution géochimique et géodynamique des magmas du massif volcanique du Mont-Dore et de l'Auvergne. Methodes et consequences generales. — «Bull. Soc. Franc. Min. Cristal.», 1962, t. 85, N 3, p. 296—308.

48. Green G., Poldervaart A. Some basaltic provinces. — «Geochim. Cosmochim. Acta», 1955, v. 7, p. 177—188.

49. Korolus K. Chemizmus eruptivnych fáz slovenských neovulkanitov. — «Zb. Geol. Vied.», 1970, zk 12, p. 85—136.

50. Wright T. L. Chemistry of Kilauea and Mauna loa lava in space and time. Geol. Surv. Prof. Paper, 1971, N 735. 40 p.

10

1. Белоусов А. Ф. Неоднородность распределения составов в ассоциациях изверженных пород. — «Геология и геофизика», 1971, № 12, с. 9—18.

2. Белоусов А. Ф. Об основаниях петрохимической классификации эффузивных пород. — «Геология и геофизика», 1974, № 3, с. 20—26.

3. Боголепов К. В. Некоторые вопросы учения о геологических формациях. — «Геология и геофизика», 1970, № 1, с. 39—49.

4. Бондаренко В. Н. Петрохимическое разграничение андезитов и базальтов. — «Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол.», 1967, т. 42, вып. 3, с. 158—159.

5. Воронин Ю. А. К математико-логическому освоению геологических классификаций. — «Геология и геофизика», 1963, № 9, с. 129—133.

6. Добрецов Н. Л. Общий модельный подход при выделении и классификации геологических формаций. — «Геология и геофизика», 1972, № 12, с. 74—84.

7. Изох Э. П. О систематике гранитоидных формаций при металлогенических и геохимических исследованиях. — В кн.: Геохим. критерии потенц. рудоносности гранитоидов. Ч. 2, Иркутск, 1971, с. 3—27.

8. Изох Э. П. О классификации габбро-гранитных серий в металлогенических целях. — В кн.: Магматизм, формации кристалл. пород и глубины Земли. М., «Наука», 1972, с. 16—21.

9. Кузнецов Ю. А. О состоянии и задачах учения о магматических формациях. — «Геология и геофизика», 1973, № 8, с. 3—11.

10. Кузнецов Ю. А., Шаранов В. Н., Меламед В. Г. О магматических фациях глубинности. — «Геология и геофизика», 1973, № 7, с. 3—17.

11. О карте магматических формаций СССР. — «Геология и геофизика», 1973, № 5, с. 130—134. Авт.: А. Ф. Белоусов, Э. П. Изох, Ю. А. Кузнецов, Г. В. Поляков.

12. Петров В. П. Природа магмы и разнообразие горных пород. Труды IV Всесоюз. петрографич. совещ. Ч. 1. М., «Наука», 1972. 133 с.

13. Связь магматизма и эндогенной минерализации с блоковой тектоникой. М., «Недра», 1969. 264 с. Авт.: М. А. Фаворская, И. Н. Томсон, Р. Г. Иванов и др.

14. Соболев В. С., Кепежинская В. В. Типы дифференциации серий вулканогенных пород. — «Геология и геофизика», 1971, № 12, с. 9—18.

15. Харкевич Д. С. (ред.). Карта магматических формаций СССР. М-б 1 : 5 000 000. Л., 1971.

16. Bernotat W. H. Chemical classification of igneous rocks and igneous rock association by mean of discriminant analysis and cluster analysis. — «Tscherm. Min. Petrogr. Mitt. Folge 3», 1972, Bd. 17, H. 3, S. 161—188.

17. Richardson W. A., Sneesby G. The frequency distribution of igneous rocks. — «Min. Mag.», 1922, v. 19, N 303, p. 21—43.

11

1. Барсуков В. Л., Дмитриев Л. В. О верхней мантии Земли как возможным источнике рудного вещества. — «Геохимия», 1972, № 12, с. 1515—1541.

2. Белоусов В. В. Основы геотектоники. М., «Недра», 1975. 262 с.

3. Беус А. А. Геохимия литосферы (породообразующие элементы). М., «Недра», 1972. 296 с.

4. Бонатти Э., Гоннорец Х., Феррара Г. Перидотит-габбро-базальтовый комплекс экваториальной части Срединно-Атлантического хребта. — В кн.: Петрология извержен. и метаморф. пород дна океана. М., «Мир», 1975, с. 9—29.

5. Буртман В. С., Клишевич В. Л. О варисских шарьяжах в южной и северной Фергане (Тянь-Шань). — «Геотектоника», 1971, № 1, с. 103—117.

6. Буртман В. С., Клишевич В. Л. О структурном положении ультрабазитов и метаморфических сланцев Южного Тянь-Шаня. — «Докл. АН СССР», 1972, т. 206, № 3, с. 671—674.

7. Буртман В. С., Пейс А. В., Руженцев С. В. Главные сдвиги Тянь-Шаня и Памира. — «Труды Геол. ин-та», 1963, вып. 80, с. 152—172.

8. Васильев В. И. Структурно-геометрические основы прогнозирования. — В кн.: Итоги совещ. по проблеме «Основы науч. прогноза месторождений руд. и нерудн. полезн. ископаемых». Л., 1972, с. 27—32.

9. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. — «Геохимия», 1962, № 7, с. 555—571.

10. Глубинное сейсмическое зондирование в переходной зоне от Азиатского континента к Тихому океану в период МГГ. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1961, № 2, с. 169—184. Авт.: А. Г. Аверьянов, П. С. Вейцман, Е. И. Гальперин и др.

11. Дмитриев Л. В. Петрология и геохимия ультрабазитов срединных океанических хребтов. — В кн.: Проблемы петрологии гипербазитов складчат. обл. Труды I Всесоюз. симпозиума. Новосибирск, 1973, с. 101—110.

12. Дмитриев Л. В., Уханов А. В., Шараськин А. Н. К вопросу о составе вещества верхней мантии. — «Геохимия», 1972, № 10, с. 1155—1167.

13. Добрецов Н. О. Глаукофансланцевые и эклогит-глаукофансланцевые комплексы СССР. Новосибирск, «Наука», 1974. 430 с. (Труды Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, вып. 57).

14. Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И., Коваленко В. И. Структурно-магматическая зональность, эндогенная металлогения и тектоника плит. — В кн.: Металлогения и нов. глобалн. тектоника. Л., 1973, с. 26—30.

15. *Иванов С. Н.* Металлогения на новой геотектонической основе. — Там же, с. 11—15.
16. *Книппер А. Л.* Габброиды офиолитовой «формации» в разрезе океанической коры. — «Геотектоника», 1970, № 2, с. 112—120.
17. *Ковалев А. А.* Новая глобальная тектоника и металлогения. — В кн.: Металлогения и нов. глобал. тектоника. Л., 1973, с. 4—10.
18. *Кропоткин П. Н.* Палеомагнетизм, палеоклиматы и проблема крупных горизонтальных движений земной коры. — «Сов. геология», 1961, № 5, с. 16—38.
19. *Луцк Б. Г.* Химический состав континентальной коры и верхней мантии Земли. М., «Наука», 1975. 168 с.
20. *Мейсон Б., Мелсон У.* Лунные породы. М., «Мир», 1973. 166 с.
21. *Мияки И.* Основы геохимии. Л., «Недра», 1969. 329 с.
22. *Мурс Э. М., Вайн Ф. Дж.* Массив Троодос на Кипре и другие офиолиты как древняя океаническая кора. — В кн.: Петрология извержен. и метаморф. пород дна океана. М., «Мир», 1973, с. 50—74.
23. *Мушкетов И. В., Мушкетов Д. И.* Физическая геология. Т. 1. Изд. 4-е. Л.—М., ОНТИ, 1935. 908 с.
24. *Николс Г. Д., Ислам М. Р.* Геохимические исследования базальтов и ассоциирующих с ними пород дна океана. — В кн.: Петрология извержен. и метаморф. пород дна океана. М., «Мир», 1973, с. 75—90.
25. *Новая глобальная тектоника (тектоника плит).* М., «Мир», 1974. 472 с.
26. *Океаны и геосинклиальный процесс.* — «Докл. АН СССР», 1971, т. 196, № 3, с. 657—659. А. В. Пейве, Н. А. Штрейс, А. Л. Книппер и др.
27. *Палеозоиды* Евразии и некоторые вопросы эволюции геосинклиального процесса. — «Сов. геология», 1972, № 12, с. 7—25. Авт.: А. В. Пейве, Н. А. Штрейс, А. А. Моссаковский и др.
28. *Пейве А. В.* Разломы и тектонические движения. — «Геотектоника», 1967, № 5, с. 8—24.
29. *Пейве А. В.* Океаническая кора геологического прошлого. — «Геотектоника», 1969, № 4, с. 5—23.
30. *Перфильев А. С., Руженцев С. В.* Структурное положение габбро-гипербазитовых комплексов в складчатых поясах. — «Геотектоника», 1973, № 3, с. 14—26.
31. *Поршняков Г. С.* Герциниды Алая и смежных районов Южного Тянь-Шаня. Л., 1973. 216 с. (Ленингр. ун-т).
32. *Распределение редких земель в литосфере и в космосе.* М., «Мир», 1968. 187 с. Авт.: Л. А. Хэскин, Ф. А. Фрей, Р. А. Шмидт, Р. Х. Смит.
33. *Ритман А.* Вулканы и их деятельность. М., «Мир», 1964. 438 с.
34. *Сабдушев Ш. Ш., Усманов Р. Р.* Тектонические покровы, меланж и древняя океаническая кора в Тамдытау (Западный Узбекистан). — «Геотектоника», 1971, № 5, с. 27—36.
35. *Силлитое Р.* Модель тектоники плит в применении к процессу образования месторождений меднопорфировых руд. — В кн.: Нов. глобал. тектоника. М., «Мир», 1974, с. 335—350.
36. *Соболев Н. В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, «Наука», 1974. 264 с.
37. *Соловьев В. В.* Морфоструктуры центрального типа в связи с некоторыми аспектами глобальной тектоники и металлогении. — В кн.: Металлогения и нов. глобал. тектоника. Л., 1973, с. 148—152.
38. *Соловьев С. П.* Химизм магматических горных пород и некоторые вопросы петрохимии. Л., «Наука», 1970. 312 с.
39. *Сорохтин О. Г.* Глобальная эволюция Земли. М., «Наука», 1974, 184 с.
40. *Тейлор С.* Геохимия андезитов. — В кн.: Распространенность элементов в земн. коре. М., «Мир», 1972, с. 15—39.
41. *Ушаков С. А.* Строение и развитие Земли. Сер. Физика Земли. Т. 1. М., ВИНТИ, 1974. 270 с.

42. *Фаворская М. А., Томсон И. Н.* Глобальные закономерности размещения рудоконцентрирующих структур. — В кн.: *Металлогения и нов. глобальн. тектоника*. Л., 1973, с. 133—136.
43. *Хайн В. Е.* Общая геотектоника. Изд. 2-е. М., «Недра», 1975. 512 с.
44. *Харт С. Р.* Содержание K, Rb, Cs, Sr, Ba и отношение изотопов в базальтах океанического дна. — В кн.: *Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана*. М., «Мир», 1973, с. 125—139.
45. *Хаст Н., Нильсон Т.* Измерения напряжения в горных породах и их значение для строительства плотин. — «Проблемы инж. геологии», 1967, вып. 4, с. 13—21.
46. *Храмов А. Н., Шолпо Л. Е.* Палеомагнетизм. Принципы, методы и геологические приложения палеомагнитологии. Л., «Недра», 1967. 251 с.
47. *Шиллинг Дж.-Г.* Эволюция морского дна на основе данных по геохимии редкоземельных элементов. — В кн.: *Петрология извержен. и метаморф. пород дна океана*. М., «Мир», 1973, с. 198—241.
48. *Шульц С. С.* Планетарная трещиноватость (основные положения). — В кн.: *Планетар. трещиноватость*. 1973, с. 5—37 (Ленингр. ун-т).
49. *Шульц С. С. (мл.)*. Геологическое строение зоны сочленения Урала и Тянь-Шаня. М., «Недра», 1972. 208 с.
50. *Шульц С. С. (мл.)*. Глобальная тектоника и прогнозирование месторождений полезных ископаемых. — В кн.: *Металлогения и нов. глобальн. тектоника*. Л., 1973, с. 20—26.
51. *Шульц С. С. (мл.)*. Концентрические сводовые структуры восточной части Туранской плиты на космических снимках. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1973, № 7, с. 182—184.
52. *Шульц С. С. (мл.)*. Тектоника плит, планетарная трещиноватость и линейменты на космических снимках Земли. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1974, № 12, с. 23—25.
53. *Шульц С. С. (мл.)*. Формирование континентальной коры палеозойских складчатых поясов и их современная структура (на примере Тянь-Шаня). — В кн.: *Тектоника Урало-Монгол. складчат. пояса*. М., «Наука», 1974, с. 156—176.
54. *Шульц С. С. (мл.)*. Линейные и мозаичные системы сдвигов на космических снимках Земли. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1975, № 1, с. 16—21.
55. *Яковлев Н. А., Скублова Н. В.* Дешифрирование космических снимков с целью выявления кольцевых вулcano-плутонических структур и изучения закономерности их размещения. — В кн.: *Исследование природ. среды косм. средствами*. Геология и геоморфология. Т. 2. М., 1974, с. 83—87.
56. *Abdel-Gawad M.* Wrench movements in the Baluchistan Arc and relation to Himalayan-Indian ocean tectonics. — «Geol. Soc. Amer. Bull.», 1971, v. 82, N 5, p. 1235—1250.
57. *Chen J. C.* Petrology and chemistry of garnet lherzolite nodules in kimberlite from South Africa. — «Amer. mineralogist», 1971, v. 56, N 11—12, p. 2098—2120.
58. *Coleman R. G.* Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. — «J. Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 5, p. 1212—1222.
59. *Davies H. L.* Papuan ultramafic belt. — In: 23rd Intern. Geol. Congr. Sec. 1. Upper Mantle. Prague, 1968, p. 209—220.
60. *De-Boer J.* The geology of the Vicentinian Alps (NE Italy), with special reference to their palaeomagnetic history. Utrecht, 1963. 178 p.
61. *Dewey J. F., Bird J. M.* Mountain belts and the new global tectonics. — «J. Geophys. Res.», 1970, v. 75, N 14, p. 2625—2647.
62. *Dewey J. F., Bird J. M.* Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland. — «J. Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 14, p. 3179—3206.
63. *Ernst W. G.* Occurrence and mineralogic evolution of blueschist belts with time. — «Amer. J. Sci.», 1972, v. 272, N 7, p. 657—668.
64. *Ernst W. G., Seki Y.* Petrologic comparison of the Franciscan and

Sanbagawa metamorphic terranes. — «Tectonophysics», 1967, v. 4, N 4—6, p. 463—478.

65. Gale G. H., Roberts D. Trace element geochemistry of Norwegian lower palaeozoic basic volcanics and its tectonic implications. — «Earth a. Planet. Sci. Lett.», 1974, v. 22, N 4, p. 380—390.

66. Hamilton W. The Uralides and the motion of the Siberian and Russian Platforms. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1970, v. 81, N 9, p. 2539—2576.

67. Hatherton T., Dickinson W. R. The relationship between andesitic volcanism and seismicity in Indonesia, the Lesser Antilles and other island arcs. — «J. Geophys. Res.», 1969, v. 74, N 22, p. 5301—5310.

68. Hersey J. B. Sedimentary basins of the Mediterranean Sea. — In.: Submarine Geology and Geophysics. Colston Papers. Ed. W. F. Whittard. London, Butterworths, 1965, p. 75—91.

69. Hess H. H. History of ocean basins. — In.: Petrologic Studies. Buddington Volume. Ed. A. E. J. Engel, B. F. Leonard. Geol. Soc. America, 1962, p. 599—620.

70. Hess H. H. The oceanic crust, the upper mantle and the Magaguez serpentinized peridotite. — In: A Study of Serpentinite. Ed. C. A. Burke. Natl. Acad. Sci., Natl. Res. Council Publ. 1188, 1964, p. 169—175.

71. Hill M. N. Recent geophysical exploration of the ocean floor. Progr. Phys. Chem. Earth, 2. 1957, p. 129—163.

72. Jackson E. D. The character of lower crust and upper mantle beneath the Hawaiian islands. — In 23rd Intern. Geol. Congr. Proc. 1. Prague, 1968, p. 135—150.

73. Karig D. E. Ridges and basins of the Tonga-Kermadec island arc system. — «J. Geophys. Res.», 1970, v. 75, N 2, p. 239—255.

74. Karig D. E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. — «J. Geophys. Res.», 1971, v. 76, N 11, p. 2542—2561.

75. Kay R., Hubbard N. J., Gast P. W. Chemical characteristics and origin of oceanic ridge volcanic rocks. — «J. Geophys. Res.», 1970, v. 75, N 10, p. 1585—1613.

76. Kuno H., Aoki K.-J. Chemistry of ultramafic nodules and their bearing on the origin of basaltic magmas. — In: Phys. Earth Planet Interiors. V. 3. Amsterdam, 1970, p. 271—301.

77. Kutina J., Fabbri A. Relationship of structural lineaments and mineral occurrences in the Abitibi area of the Canadian shield. Canada. Dep. Ener. Min. Resourc. Geol. Surv., paper 71—9. Ottawa, 1972. 36 p.

78. Lefèvre C. Les caracteres magmatiques du volcanisme plioquaternaire des Andes dans le Sud du Perou. — «Contr. Mineral. a. Petrol.», 1973, v. 41, N 4, p. 259—272.

79. Mason B. Principles of geochemistry. 3rd ed. N. Y., 1966. 329 p.

80. McBireney A. R. Andesitic and rhyolitic volcanism of orogenic belts. — In: The Earth's crust and upper mantle. Amer. Geophys. Union. Geophys. monograph., v. 13. Wash., 1969, p. 501—506.

81. Menard H. W. Transitional types of crust under small ocean basins. — «J. Geophys. Res.», 1967, v. 72, p. 3061—3073.

82. Michaelis H., Ahrens L. H., Willis J. P. The composition of stony meteorites. II. The analytical data and an assesment of their quality. — «Earth Planet. Sci. Lett.», 1969, v. 5, N 6, p. 387—394.

83. Mitchell A. H., Reading H. G. Continental margins, geosynclines and ocean-floor spreading. — «J. Geology», 1969, v. 77, N 6, p. 629—646.

84. Moody J. D., Hill M. J. Wrench-fault tectonics. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1956, v. 67, N 9, p. 1207—1246.

85. Moores E. M. Petrology and structure of the Vourinos ophiolitic complex of Northern Greece. Geol. Soc. Amer. Spec., paper 118, 1969. 74 p.

86. Ninkovich D., Hays J. D. Mediterranean island arcs and origin of high potash volcanoes. — «Earth Planet. Sci. Lett.», 1972, v. 16, N 3, p. 331—345.

87. Pavoni N. Die Nordanatotische Horisontalverschiebung. — «Geol. Rdsch.», 1961, Bd. 51. N 1, S. 122—129.

88. *Pearce J. A.* Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. — «Tectonophysics», 1975, v. 25, p. 41—67.

89. *Pearce J. A., Cann J. R.* Ophiolite origin investigated by discriminant analyses using Ti, Zr and Y. — «Earth Planet. Sci. Lett.», 1971, v. 12, p. 339—349.

90. *Pearce J. A., Cann J. R.* Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. — «Earth Planet. Sci. Lett.», 1973, v. 19, p. 290—300.

91. *Raiitt R. W.* The crustal rocks. — In: *The Sea*. V. 3. Ed. M. N. Hill. N. Y., «Wiley», 1963, p. 85—102.

92. *Reinhardt B. M.* On the genesis and emplacement of ophiolites in the Oman Mountains Geosyncline. — «Schweiz. Min. Petrog. Mitt.», 1969, v. 49, N 1, p. 1—30.

93. *Ringwood A. E.* Mineralogy of the mantle. — In: P. M. Hurley (ed.). *Advances in Earth Sci.* MIT press. Cambridge, Mass., 1966, p. 357—398.

94. *Shor G. G.* Structure of the Bering Sea and the Aleutian ridge. — «Marine Geol.», 1964, v. 1, p. 213—219.

95. *Thayer T. P.* Peridotite-gabbro complexes as keys to petrology of mioceanic ridges. — «Geol. Soc. Amer. Bull.», 1969, v. 80, N 8, p. 1515—1522.

96. *Turekian K. K., Wedepohl K. H.* Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1961, v. 72, N 2, p. 175—192.

97. *Urey H. C.* The planets, their origin and development. London, New Haven, 1952. 245 p.

98. *Wakeel-El S. K., Rily J. P.* Chemical and mineralogical studies of deep-sea sediments. — «Geochim. Cosmochim. Acta», 1961, v. 25, N 2, p. 117—146.

99. *Williams H.* Mafic-ultramafic complexes in Western Newfoundland. Appalachians and the evidence for their transportation. — «Geol. Assoc. Canada Proc.», 1971, v. 24, N 1, p. 9—25.

12

1. *Абрамович И. И., Клушин И. Г.* Вариации состава раннегеосинклинальных гранитоидных комплексов и особенности глубинного строения земной коры. — «Сов. геология», 1974, № 12, с. 34—47.

2. *Клушин И. Г.* Некоторые особенности сейсмических разрезов земной коры. — «Геология и геофизика», 1969, № 8, с. 70—80.

3. *Природа сейсмических границ в земной коре*. М., «Наука», 1971. 136 с.

4. *Bowin C. O.* Geophysical study of the Cayman Trough. — «J. Geophys. Res.», 1968, v. 73, N 16, p. 5159—5173.

5. *Ewing J., Antoine J., Ewing M.* Geophysical measurements in the Western Caribbean Sea and in the Gulf of Mexico. — «J. Geophys. Res.», 1960, v. 65, N 12, p. 4087—4126.

13

1. *Борисов А. А.* Глубинная структура СССР по геофизическим данным. М., «Недра», 1967. 300 с.

2. *Гельчинский Б. Я.* Формулы для вероятностных характеристик поля волны, распространяющейся в однородно-однородной $L_{\text{Ю}}$ -модели. — В кн.: *Вопр. динам. теории распространения сейсм. волн*. Сб. 10. Л., «Наука», 1970, с. 55—65.

3. *Гольцман Ф. М.* Статистические модели интерпретации. М., «Наука», 1971. 311 с.

4. *Керн Р., Вайсброд А.* Основы термодинамики для минералогов, петрографов и геологов. М., «Мир», 1966. 277 с.

5. *Клушин И. Г.* Методика совместной интерпретации геофизических данных с целью изучения плотности глубинных слоев земной коры. — «Геология и геофизика», 1961, № 11, с. 99—107.

6. *Клушин И. Г.* Статистическое исследование глубины распространения намагнитченных пород. — «Прикл. геофизика», 1968, вып. 52, с. 128—133.
7. *Клушин И. Г.* Аналитическое продолжение аномалий потенциальных физических полей Земли на большую высоту. — В кн.: Теорет. обоснования и практика трансформации потенц. геофиз. полей для решения регион. геол. задач. М., 1969, с. 146—161.
8. *Клушин И. Г., Грбовская Т. З.* Об учете в гравиразведке влияния толщ, перекрывающих изучаемые геологические объекты. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1971, т. 61, вып. 2, с. 115—124.
9. *Клушин И. Г., Копкин М. В.* Преобразование аномалий ΔT для геологической интерпретации материалов аэромагнитной съемки в экваториальных зонах Земли. — «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1973, № 4, с. 99—102.
10. *Клушин И. Г., Абрамович И. И.* Об эволюции состава альпийских гипербазитов. — «Докл. АН СССР», 1975, т. 221, № 2, с. 451—453.
11. *Опыт применения эффективной сейсмической модели при интерпретации данных МОВ.* — В кн.: Вопр. динам. теории распространения сейсм. волн. Сб. 10. Л., «Наука», 1970, с. 152—160. Авт.: Б. Я. Гельчинский, А. А. Белозеров, Н. И. Берденников и др.
12. *Халфин Л. А.* Информационная теория интерпретации геофизических исследований. — «Докл. АН СССР», 1958, т. 122, № 6, с. 1007—1010.
13. *Чернов Л. А.* Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. М., 1958. 159 с.
14. *Allan R. R.* Depth of sources of gravity anomalies. — «Nature. Phys. Sci.», 1972, v. 236, N 63, p. 22—23.
15. *Anderson O. L., Liebermann R. C.* Elastic constant of oxide compounds used to estimate the properties of the Earth's interior. — In: The Application of Modern Physics to the Earth's and Planetary Interiors. N. Y.—L., «Wiley», p. 425—448.
16. *Chung D. H.* Effects of iron/magnesium ratio on P- and S-wave velocities in olivine. — «J. Geophys. Res.», 1970, v. 75, N 35, p. 7353—7361.
17. *Knopoff L.* Density-velocity relations for rocks. — «Geophys. J. Roy. Astr. Soc.», 1967, v. 13, N 1, p. 1—8.
18. *Shankland T. J.* Velocity-density systematics: Derivation from Debye theory and the effect of ionic size. — «J. Geophys. Res.», 1972, v. 77, N 20, p. 3750—3758.

14

1. *Андреева И. Б., Удинцев Г. Б.* Строение дна Японского моря по данным исследований на «Витязе». — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1958, № 10, с. 3—20.
2. *Балавадзе Б. К.* Геофизические исследования строения земной коры бассейна Черного моря. — В кн.: Глубин. строение Кавказа. М., «Наука», 1966, с. 125—133.
3. *Борисов А. А.* Глубинная структура территории СССР по геофизическим данным. М., «Недра», 1967. 303 с.
4. *Венинг-Мейнес Ф. А.* Гравиметрические наблюдения на море. М., 1940. 324 с.
5. *Гайнанов А. Г., Корякин Е. Д.* Геофизические исследования строения земной коры в области Атлантического океана. М., «Недра», 1967. 170 с.
6. *Глубинное сейсмическое зондирование земной коры Сахалино-Хоккайдо-Приморской зоны.* М., «Наука», 1971. 286 с.
7. *Гурарий Г. З., Соловьева И. А.* Строение земной коры по геофизическим данным. М., 1963. 127 с.
8. *Дементицкая Р. М.* Кора и мантия Земли. М., «Недра», 1967. 278 с.
9. *Клушин И. Г.* Комплексное применение геофизических методов для решения геологических задач. Л., «Недра», 1968. 311 с.

10. *Клушин И. Г., Ривов Л. А.* Дисперсионный анализ данных индуктивной электроразведки. — В кн.: Геофиз. методы изучения геол. строения вост. части Балт. щита. Л., 1974, с. 82—91.
11. *Литвищенко И. В.* О некоторых результатах изучения глубинных разрезов земной коры различных структурно-фациальных зон. — В кн.: Геология и глубин. строение вост. части Балт. щита. Л., 1968, с. 185—190.
12. *Лукк А. А.* Строение верхней мантии вдоль профиля Памир — р. Лена. — «Сов. геология», 1966, № 2, с. 106—117.
13. *Налимов В. В. (ред.)*. Новые идеи в планировании эксперимента. М., 1969. 334 с.
14. *Налимов В. В.* Теория эксперимента. М., «Наука», 1971. 207 с.
15. *Строение земной коры центральной части Каспийского моря по данным глубинного сейсмического зондирования.* — «Докл. АН СССР», 1958, т. 123, № 3, с. 520—522. Авт.: А. А. Гагелянц, Е. И. Гальперин, И. П. Косминская, Р. М. Кракшина.
16. *Субботин С. И., Разимова И. Ш., Наумчик Г. Л.* Мантия Земли и тектогенез. Киев, 1968. 174 с.
17. *Успенский Д. Г.* Изучение строения земной коры океанов гравиметрическим методом. — «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1970, № 7, с. 48—62.
18. *Федьинский В. В.* Геофизические данные о некоторых чертах строения и развития земной коры. — В кн.: Геол. результаты прикл. геохимии и геофизики. Проблема 2. М., 1962, с. 6—13.
19. *Хикс Ч.* Основные принципы планирования эксперимента. М., 1967. 406 с.
20. *Ewing J., Ewing M.* Seismic refraction measurements in the Atlantic basin, in the Mediterranean sea, of the Mid Atlantic Ridge and in the Norwegian sea. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1959, v. 70, N 3, p. 291—318.
21. *Francis T. J. G., Raitt R. W.* Seismic refraction measurements in the Southern Indian Ocean. — «J. Geophys. Res.», 1967, v. 72, N 12, p. 3015—3041.
22. *Gabriel V. G., Kuo J. T.* High Rayleigh wave phase velocities for the New Dehli, India — Lahore, Pakistan profile. — «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1966, v. 56, N 5, p. 1137—1145.
23. *Knopoff L.* Density-velocity relations for rocks. — «Geophys. J. Roy. Astr. Soc.», 1967, v. 13, N 1, p. 1—8.
24. *Knopoff L., Mueller S., Pilant W. L.* Structure of the crust and upper mantle in the Alps from the phase velocity of Rayleigh waves. — «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1966, v. 56, N 5, p. 1009—1044.
25. *Kurita T.* A procedure for elucidating fine structure of the crust and upper mantle from seismological data. — «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1973, v. 63, N 1, p. 189—209.
26. *Lewis B. T. R., Meyer R. P.* A seismic investigations of the upper mantle to the west of Lake Superior. — «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1968, v. 58, N 2t p. 565—595.
27. *Menard H. W.* Transitional types of crust under small ocean basins. — «J., Geophys. Res.», 1967, v. 72, N 12, p. 3061—3074.
28. *Raitt R. W.* Seismic refraction studies of the Pacific Ocean basin. — «Bull. Geol. Soc. Amer.», 1956, v. 67, N 12, p. 1623—1640.
29. *Taluani M., Le Pichon X.* Gravity field over the Atlantic ocean. — In: The Earth's Crust and Upper Mantle. Geophys. Monograph. 13. Amer. Geophys. Union. 1969, p. 341—351.
30. *The crust and upper mantle of the Japanese area. Part 1.* Tokyo, 1972. 119 p.
31. *The crust and upper mantle of the Pacific area.* Geophys. Monograph. 12. Amer. Geophys. Union. 1968. 522 p.
32. *Worzel J. L.* Pendulum gravity measurements at sea, 1936—1959. N. Y.—L., «Wiley», 1965. 422 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

I. ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ

1. Состояние и пути совершенствования теоретической геологии	8
О понимании теоретической геологии	—
Типы исследовательских задач геологии	12
Уровень общности знания как основа выделения теоретической геологии	14
Современные оценки теоретико-методологических основ геологии	18
2. Системный подход и методологические резервы теоретической геологии	24
Основания системного подхода	25
Идеи и понятия системного подхода	29
Системный подход как метод	37
Концептуальные схемы теоретической геологии	51
Теоретическая компонента в структуре геологической науки	64

II. СТРАТИГРАФИЯ И ЛИТОЛОГИЯ

3. Понятийная база и методы стратиграфии	82
Объект, предмет, цели и задачи стратиграфии	83
Основные стратиграфические понятия	84
Принципы стратиграфии	85
Понятие об искусственности, естественности и наименьшем стратиграфическом подразделении	—
Геологическое время и хроностратиграфия	88
Стратиграфические границы	90
Вопросы генезиса в стратиграфии	—
Операциональная схема стратиграфических исследований	92
4. Седиментологические предпосылки, постановка и методы решения литологических задач	94
Фациальные реконструкции по гранулометрическому составу пород	96
Стохастическое моделирование процессов слоенакопления как теоретическая основа для решения прикладных задач литологии, литостратиграфии и тектоники	104

Выявление скрытых закономерностей в строении разрезов осадочных толщ	111
Седиментологические аспекты метода мощностей	117
5. Методы изучения геохимических ассоциаций литосферы	121
Моделирование рядов подвижности и ассоциаций химических элементов	122
Верификация моделей ассоциаций и рядов подвижности химических элементов на эталонных объектах	124
Эвристические возможности формальных процедур	130
III. ПЕТРОЛОГИЯ И ПЕТРОХИМИЯ	
6. Методологическая схема петрологии	138
7. Концепция мобилизма и петрология	144
Конвективные перемещения мантийных масс и их петрологическая индикация	147
Положение петрографических провинций в конвективной ячее, выявление стабильности глубинной неоднородности	154
Выявление петрологических эффектов, связанных с неустойчивостью гравитационного равновесия в процессе конвекции	167
Петрологические следствия различий в интенсивности взаимодействия литосферных плит	180
Влияние тектоно-магматической предьстории на характер петрологических эффектов при последующем взаимодействии плит	191
8. О реконструкции процессов ударно-взрывного породообразования	206
9. Временные петрохимические тренды (интерпретационный аспект)	217
10. О классификационных построениях на петрохимической основе	224
IV. ТЕКТОНИКА И ГЕОФИЗИКА	
11. Проблемы и методы глобальной тектоники	234
Ряд глубинной дифференциации вещества Земли и использование геохимических данных в геотектонических исследованиях	238
Тектоно-магматические циклы и палинспастические реконструкции	245
Пояса альпийотипных офиолитов как индикаторы зон субдукции океанической коры геологического прошлого	249
Потенциальные возможности геологической интерпретации космических снимков Земли	255
12. Установление эмпирических связей между разнотипными характеристиками геологических объектов при построении содержательных моделей в геофизике	260
13. Разнообразие природных ситуаций и интерпретационные ресурсы геофизики	270
Модели локального, регионального и глобального уровней	—
Полнота обоснования моделей	275
Детерминистический и стохастический подходы	282

14. Верификация интерпретационных схем геофизики на эмпирической основе	289
Пути верификации интерпретационных схем	290
Модель слоистой среды, используемая при изучении коры и мантии Земли с помощью глубинных сейсмических зондирований и гравиметрии	294
Гравитационные аномалии и сейсмические разрезы экваторий — эмпирические данные для контроля модели	296
Группирование сейсмических разрезов для верификации модели и оценки источников гравитационных аномалий	298
Степень соответствия модели и геологической реальности; новые результаты в исследовании причин региональных гравитационных аномалий на экваториях	302
Список литературы	308

МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Редактор издательства Л. Г. Ермолаева
Переплет художника Ю. И. Прошлецова
Техн. редактор Н. П. Старостина
Корректоры М. И. Витис, В. Н. Малахова

Сдано в набор 10/VI 1977 г. Подписано в печать 13/XII 1977 г.
М-44156. Формат бумаги $60 \times 90^{1/16}$. Печ. л. 21. Уч.-изд. л. 21,88.
Тираж 2150 экз. Бумага тип. № 1. Заказ № 269/275. Цена 3 р. 50 к.

Издательство «Недра», Ленинградское отделение.
193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книж-
ной торговли.
196006, Ленинград, М-6, Московский пр., 91.

3р. 50к.

2405