

Ю. А. ВОРОНИН
Э. А. ЕГАНОВ

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ
ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ
В ГЕОЛОГИИ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

550.8+519

Ю. А. ВОРОНИН, Э. А. ЕГАНОВ

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ
ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ
В ГЕОЛОГИИ

Ответственный редактор
чл.-корр. АН СССР Э. Э. Фотиади

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск 1974



1113

УДК 550.8

В работе рассматриваются различные аспекты процесса математизации геологии. На основе определения геологии и математики анализируются ситуации, допускающие математическую обработку геологических данных с применением ЭВМ; причины, затрудняющие математизацию; логические типы геологических задач и условия, обеспечивающие правильность их математической постановки. Обсуждены вопросы организации исследований с применением математических методов и ЭВМ, а также подготовки соответствующих специалистов. Подводятся некоторые итоги десятилетней дискуссии по вопросам математизации геологии, логики построения геологических теорий и эффективного решения задач.

Книга может быть полезна всем, кто интересуется методологическими проблемами развития геологических наук.

В 20802—767 533-74
055(02)-74

© Издательство «Наука», 1974.

1. Последние 10—15 лет в СССР и за рубежом интенсивно исследуются возможности применения математических методов (ММ) и электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в геологии. Активизация таких исследований вызвана многими причинами, в частности повышением требований к достоверности результатов и экономической эффективности геологоразведочных работ, неудовлетворенностью традиционными способами сбора и обработки данных и пр. О широте исследований в СССР вопросов применения ММ и ЭВМ в геологии можно судить по быстрому росту числа исследователей в этой области, увеличению количества печатных работ, по резкому возрастанию ассигнований, которые особенно выросли в связи с разработкой автоматизированных систем управления (АСУ) геологоразведочными предприятиями. Можно не сомневаться, что в ближайшем будущем подобные исследования будут развиваться еще более быстрыми темпами, приобретут государственную важность. Анализ опыта по применению ММ и ЭВМ в геологии может оказать существенную помощь в организации и планировании научно-исследовательских геологических работ, а также в разработке перспективных программ подготовки геологических кадров. Ниже рассматриваются некоторые вопросы, связанные с анализом имеющегося опыта применения ММ и ЭВМ в геологии.

2. Ряд публикаций, где анализируется накопленный опыт применения ММ и ЭВМ в геологии, свидетельствует, что многие аспекты такого анализа носят сложный и дискуссионный характер. Нельзя не отметить некоторые интересные частные и общие исследования по применению ММ и ЭВМ в геологии, позволившие решить ряд конкретных задач и значительно повлиявшие на представления геологов о ММ и ЭВМ. Однако результаты по применению ММ и ЭВМ в геологии оказались гораздо более скромными, чем это ожидалось. Например,

можно легко убедиться, что пока применение ММ и ЭВМ не оказало какого-либо влияния на характер теоретических конструкций геологии и практику геологоразведочных работ, а также на характер преподавания геологических дисциплин. Возникает вопрос, почему надежды, связанные с применением ММ и ЭВМ в геологии, оправдались не полностью? Ответ на этот вопрос и составляет в основном содержание данной работы.

То обстоятельство, что перспективы, связанные с применением ММ и ЭВМ в геологии, оправдались не полностью, можно объяснить либо тем, что возможности ММ и ЭВМ в геологии переоценены, либо тем, что они неэффективно используются. По-видимому, справедливо второе. Ошибки, допускаемые при применении ММ и ЭВМ в геологии, обусловлены, в первую очередь, слабой разработанностью методологических вопросов этого применения.

3. Методологические вопросы применения ММ и ЭВМ в геологии имеют гораздо больший смысл, чем принято считать. Обсуждение методологических проблем в других естественных науках показывает, что здесь еще требуется большая работа. Так, обзор методологических вопросов биологии приводит к заключению, что «...как раз методологические проблемы, которые в известном смысле становятся сегодня ключевыми, большинство современных биологов на протяжении длительного времени (а во многих случаях и сейчас) либо игнорировало, либо уделяло им внимание лишь, так сказать, в свободное от работы время. Этот стиль мышления, характерный для того, что называется сегодня «научным производством», не может привести к построению и развитию теоретической биологии» [162, с. 10]. Подобное высказывание полностью применимо и к геологии, что и было отмечено в [130]. Руководства по применению ММ в геологии почти не обсуждают методологических проблем этого применения.

4. Исследования по применению ММ в геологии разбиваются на две основные группы. Одна из них (более обширная) включает работы по решению частных геологических задач на основе ранее сложившихся теоретических представлений и методов. Эти работы проводятся с использованием того фактического материала, который был накоплен и продолжает накапливаться без учета возможности его математической обработки. Такое направление пользуется предпочтением среди специалистов, ибо именно по практическим результатам оцениваются работы в геологии. Предпочитающие этот путь неохотно рассматривают ключевые общеметодологические вопросы: выбор путей решения прикладных задач и развитие теории.

Другое направление гораздо моложе первого. Оно родилось 10—12 лет тому назад в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР и было отражено в книге «Геология и математика» [41]. Его сторонники считают, что эффективное внедрение ММ в геологию возможно лишь на основе предварительного формального совершенствования теоретических представлений геологии, при использовании строго определенных понятий и отборе достоверных фактов, записанных в терминах наблюдений*. Это направление предполагает проведение подготовительной работы по улучшению и уточнению ряда традиционных геологических понятий, целей, схем рассуждения и доказательства, а также способов решения задач. Сторонники этого направления полагают, что общие усилия по уточнению языка науки, по правильной и осмысленной постановке целей и задач, по расчленению задач на подзадачи и т. п. (несмотря на малую эффективность на первых порах) впоследствии позволили бы быстро продвинуться, причем не только в области решения частных, прикладных задач, но и прежде всего в теоретических построениях геологик.

5. Цель настоящей работы — рассмотрение методологических вопросов применения ММ и ЭВМ в геологии; оценка современного состояния применения ММ и ЭВМ в геологии; сопоставление двух упомянутых направлений; формулирование причины недостаточной эффективности использования ММ и ЭВМ в геологии; выяснение условий, при которых применение ММ и ЭВМ в геологии сможет дать максимальный эффект.

6. Поиски эффективных путей внедрения ММ и ЭВМ в геологию, очевидно, заключаются в обсуждении преимуществ и недостатков описанных выше направлений в их рациональной оценке. Этому, однако, должно предшествовать предварительное рассмотрение некоторых общих понятий и вопросов. В частности, потребуется ответить на такие вопросы:

что такое «геология»;
что такое «математика и математические методы»;
что такое «геологическая задача»;
что означают «математическая постановка геологической задачи», «решить задачу»;
что значит «хорошее понятие» и как оценить решение.
Придется разобрать и такие понятия, как «научный метод», «теория», «модель» и пр.

7. Чтобы это обсуждение поставить на реальную почву, его необходимо начать с изложения того, что именно целе-

* Или в «наблюдаемых терминах» (эмпирических) ([78], гл. 24).

сообразно понимать под геологией [33, с. 11] и математикой, затем разобрать вопрос о роли ММ в геологии, о причинах недостаточного влияния ММ на развитие теоретических конструкций геологии, сравнить методологию геологии с методологией одной из точных наук. После этого можно будет перейти к типам и постановкам геологических задач, которые имеет смысл решать с помощью ММ, к рассмотрению основных трудностей на этом пути и рациональных способов внедрения и использования ММ.

§ 1. ТОЛКОВАНИЕ ПОНЯТИЯ «ГЕОЛОГИЯ»

1. Когда мы говорим о математических методах и ЭВМ в геологии, то предполагаем, что геология — это некая целостная научная область или, по крайней мере, состоит из таких частей, которые с интересующей нас точки зрения суть известным образом взаимодействующие разделы. Насколько, однако, такие предположения верны в действительности?

Прежде всего попытаемся дать общее представление о геологии, определить главные цели геологии (вернее — договориться о них), а кроме того, выявить разделы, где имеет смысл говорить о применении ММ.

2. Общеизвестны трудности, возникающие при попытке дать общее представление о науке. Усилия, затраченные на выяснение того, что такое физика, привели к появлению шуточного определения: «физика — это то, чем занимаются физики поздно вечером» [121]. Аналогично, попытки определить математику привели к тому, что «однажды кто-то, видимо, в отчаянии предложил определить математику как «все, чем занимаются математики» [143, с. 12]. Поэтому принято давать представления о конкретной науке по какой-либо схеме. Будем считать, что представления о любой науке складываются из следующих элементов.

А. Пояснения исходных понятий, с помощью которых формулируются представления и определения соответствующей науки.

Б. Представления об объекте и предмете исследования.

В. Мотивы, цели и задачи исследования.

Г. Метод исследования.

Д. Представления о строении и структуре науки (содержание разделов, их взаимосвязь).

Е. Область применимости результатов исследований, значение, связь с другими науками.

Обычно в зависимости от целей ограничиваются разъяснением только некоторых из этих элементов.

3. В настоящее время геологию принято толковать как науку о составе, строении, движениях и истории формирования и развития земной коры [20]. Подразделить геологию можно на описательную (или статическую), историческую (или ретроспективную) и динамическую [92]*.

Это разделение основывается прежде всего на отношении к параметру «время». Исследовать земную кору можно в статическом аспекте, т. е. не принимая во внимание этот параметр. При этом изучают только строение, подобно тому, как можно изучать здание, не задумываясь над тем, в каком порядке укладывались детали при его постройке. Вводя же параметр времени, переходят к динамической и исторической геологии, которые различаются на основании того, какое время имеется в виду. Если для объектов вводится геологическое время, то говорят об исторической геологии. Если же вводится время физическое, то говорят о динамической геологии [92].

Подразделение геологии в излагаемом аспекте можно представить схемой 1.

4. Статическая геология толкуется как область знаний о распространении, распределении и структуре геологических объектов, которые можно выделить, пользуясь теми или иными исходными понятиями о земной коре; об устойчивых связях между этими объектами и системами, в которых такие связи реализуются. Исходными понятиями для статической геологии являются такие, как минерал, горная порода, геологическая граница, геологическое тело, структура и т. п.

Цель статической геологии — сделать возможным предсказание состава и расположения геологических тел (скажем, определение пунктов залегания полезных ископаемых или иных геологических объектов) на основе известных связей.

Задачи статической геологии сводятся в основном к нахождению систем свойств, по которым из геологического пространства выделяются и классифицируются некоторые объекты оптимальным (для конкретных целей) способом. Следующим важным типом задач статической геологии является определение связей между выделенными объектами и их характеристик.

Основные методы исследования в статической геологии —

* Аналогично делению механики на статику, кинематику и динамику.



классифицирование по заданным требованиям, установление степени сходства между выделенными объектами и выявление связей между объектами и свойствами объектов.

Историческая геология — область знаний о временной последовательности возникновения объектов, так или иначе выделенных в составе земной коры; о причинах появления этих объектов. Основным исходным понятием исторической геологии является понятие о геологическом времени.

Цель исторической геологии в широком аспекте — установление взаимозависимости явлений во времени, повествование о последовательности событий, приведших к возникновению наблюдаемого состояния и расположения объектов; вскрытие взаимообусловленности событий, тенденций в их ходе; словом, установление причин геологических явлений. Для достижения такой цели требуется решить задачи выделения объектов, установления связей и затем нахождения меры сходства между объектами (и системами объектов).

Основными методами исследования в области исторической геологии являются классифицирование и аналогия (метод актуализма, сравнительный анализ и т. д.), однако данные по конкретным объектам здесь заменяются суждениями о них, интерпретационными высказываниями и классифицируются, по сути дела, не объекты, а представления об их происхождении. Методы исторической геологии не представляют твердых систем действий: ретроспективные выводы во многом генерируются интуитивно. Основным методом исторической геологии следует считать аналогию.

Динамическая геология понимается как область знаний о процессах, преобразующих геологические объекты и вызывающих их перемещение. Эти процессы протекают в земной коре в период, доступный наблюдению субъекта (под субъектом подразумеваются не только отдельные исследования, но и человечество в целом). Цели и задачи динамической геологии в широком плане совпадают с целями и задачами исторической геологии.

Методы динамической геологии полностью соответствуют методам химии, физики, механики и других формально разработанных областей знания, будучи лишь приложенными к природным объектам, являющимся частями земной коры. То есть все они — суть методы исследования поведения систем в физически измеряемом времени.

В Геологическом словаре (1955 г.) определения динамической и исторической геологий не взаимосвязаны, вследствие чего создается впечатление, что они сильно разнятся: первая изучает процессы, а вторая — историю. История, однако, тоже процесс (развитие), точнее говоря, история (в отличие от хроники) — это описание результатов исследования некоторого процесса. Но изучение процесса требует фиксации физического времени, поэтому динамическая геология может строиться только в тех пределах, когда эта фиксация реально возможна. Историческая же геология опирается на данные статической геологии, поставляющей сведения об объектах и структурах, и динамической с ее информацией о процессах, которую историческая геология использует, опираясь на принцип актуализма [92] и соображения об эволюционном развитии.

5. Традиционно геологию принято подразделять по предмету и методам исследования на такие основные дисциплины: минералогия, петрографию, стратиграфию и геотектонику, а также геохимию и геофизику, которые разными методами изучают разные отношения, части и свойства одних и тех же различных объектов геологических тел. Стратиграфия изучает взаимоотношения тел (что выше, что ниже, что пересекает, а что пересекается); тектоника — характер их ориентации, морфологическое и качественное состояние; петрография (и литология) — внутреннюю структуру и минеральный состав геологических тел; минералогия — структуру и состав элементарных компонентов тел (минералов); геохимия — распределение и законы поведения химических элементов в телах.

Существуют и другие подразделения геологии: по методам, масштабу, области, объектам, например региональная геология, гидрогеология, учение о полезных ископаемых, геоморфоло-

гия, неотектоника и т. п. Это традиционное разделение геологии возможно, но совершенно непригодно для обсуждения вопросов о применимости в геологии ММ и ЭВМ.

6. Сравнивая между собой названные три раздела геологии, можно отметить следующее. Динамическая и статическая геологии могут основываться на экспериментальных данных, и их выводы, если не считаться с затратами, могут быть экспериментально проверены. В исторической геологии выводы основываются только на правдоподобных, во многом интуитивных рассуждениях; многие ее построения в принципе не могут быть экспериментально проверены [33].

В динамической и статической геологии методы исследования и доказательства можно делить на теоретические и экспериментальные, а в исторической возможны только теоретические методы.

Упомянутые разделы геологии развиваются по-разному. Статическая и динамическая геологии развиваются в основном по линии аппроксимации накопленных теоретических представлений новыми. Здесь происходит включение старого в новое. Историческая же геология развивается в основном по линии смены старых теоретических представлений новыми.

Говоря о взаимодействии этих разделов геологии, надо отметить, что историческая геология есть интерпретация материалов статической и динамической геологии. Как показано в [41, 92], все задачи статической геологии могут быть сформулированы и решены независимо от историко-генетических представлений, но нельзя сформулировать ни одной задачи исторической геологии, не опираясь на данные статической и динамической.

В этом смысле статическую и динамическую геологии (включая геофизику и геохимию) следует считать фундаментальной частью геологии, а историко-генетическую — интерпретационной надстройкой над ней.

7. Итак, сейчас геология представляет собой конгломерат отдельных научных дисциплин, различающихся целями, содержанием, методами, характером фактов и теоретических построений. Объединяет их то, что все они изучают объекты, составляющие Землю. Логическая связь между традиционными частями геологии конкретизируется с трудом, а логические основы этих отдельных частей геологии во многом неясны, спорны.

В настоящее время используемое здесь деление геологии на статическую, динамическую и историческую не вызывает особых возражений. Однако исследователи по-разному толкуют взаимодействие этих разделов, по-разному оценивают их значение. Можно, по-видимому, говорить о

двух исторически сложившихся взглядах на геологию: о так называемом «европейском», в соответствии с которым основной задачей геологии является изучение истории Земли, и «американском», согласно которому основная задача геологии — изучение строения Земли. «Европейская» точка зрения обстоятельно обсуждалась в [33], а «американская» — в [107, 186].

Различное отношение исследователей к той или иной части геологии хорошо иллюстрируется, к примеру, определением цели стратиграфии и взаимоотношения ее частей у К. Данбара и Дж. Роджерса [65, с. 10—11]. По их мнению, стратиграфия может быть подразделена на три части. Первая — описание слоев, вторая — корреляция частных разрезов. Эти две части составляют «основу исторической геологии» и являются лишь ступенью к последней (основной, по мнению этих авторов) части стратиграфии, а именно: «интерпретации стратиграфической летописи ... для выяснения прошлой истории Земли». Таким образом, методы и принципы первых двух частей стратиграфии касаются способов подразделения геологического пространства, классифицирования выделенных единиц и их упорядочивания. Принципы и методы третьей части — это те, «с помощью которых стратиграфы интерпретируют данные описания и корреляции, создавая живые картины геологического прошлого». Совершенно аналогично в ряде случаев истолковывается и геология в целом. Первые две части стратиграфии К. Данбара и Дж. Роджерса соответствуют содержанию статической геологии, а третья часть — собственно исторической.

Из приведенного примера видно, что толкование геологии в определенной мере зависит от понимания взаимодействия между ее частями, затем от понимания целей. Так, накопление информации, относящейся к области статической геологии, является ступенью к интерпретации причин, обусловивших наблюдаемый порядок пластов; но его можно рассматривать и как вполне самостоятельный раздел, имеющий свои конечные цели.

8. Из изложенного становится понятным, что какое бы значение ни придавали различным частям геологии, а вследствие этого как бы ни определяли ее основную цель, геологию нельзя рассматривать как единое целое с точки зрения применения ММ и ЭВМ. Попытки обсудить их использование в геологии «в целом» порождают путаницу, ибо в любом случае имеется в виду не вся геология, а только какая-то неявно подразумеваемая ее часть. Так, когда относительно применения ММ в геологии высказывается скептическая точка зрения, то почти наверняка имеется в виду возможность применить ММ к историко-генетическим построениям как к важнейшей части геологии. И действительно, применение ММ, сводящееся в данном случае к так называемой верификации гипотез, вызывает наибольшие затруднения.

На этом вопросе следует остановиться подробнее. Историческая геология, как сказано выше, изучает геологические процессы прошлого, т. е. такие последовательности явлений, которые в большинстве случаев уже не могут наблюдаться. Представления, вырабатываемые исторической геологией, ярки,

интересны, знакомство с ними, а тем более их разработки всегда очень увлекательны, они дают простор для развития фантазии. Однако экспериментально проверить многие ретроспективные построения геологии в принципе невозможно. Историческая геология снабжает нас совокушностями высказываний, пользуясь которыми хотя и можно предпринимать иногда какие-то действия в геологической практике, но успех этих действий еще не означает, что данные высказывания «адекватны природной истории». В этой ситуации особенно необходимы четкие представления в задачах и выводах. «Природная» история может быть изложена по-разному. Ряд ретроспективных построений, особенно касающихся глубокого прошлого, обречен на многократные изменения — приспособление к новым фактам и теориям.

В соответствии с принципом наблюдаемости М. Борна [185, с. 57—59] возможность получения каких-либо теоретических суждений о процессах прошлого представляется спорной. П. Ленжевен в соответствии с этим принципом заметил, что «теория не должна содержать ничего такого, что не имело бы экспериментально смысла и не соответствовало бы опыту, если и не легко осуществимому, то хотя бы воображаемому» [95, с. 365], а П. Дирак говорил, что наука имеет дело лишь с наблюдаемыми вещами [69, с. 18] и т. п. Аналогичных высказываний можно привести много.

Специфика применения ММ в исторической геологии обусловлена также особыми свойствами геологического времени, которое не измеряется на основе какого-либо периодического процесса, а является сложным параметром, выводимым из гипотез и предположений статической геологии [41, с. 188—189].

В целом историческая геология не располагает на сегодняшний день достаточно строгой системой понятий, достаточным количеством достоверных наблюдаемых фактов и теоретическими конструкциями, позволяющими получить четкое представление о ее задачах. Как было показано нами в [49], историко-генетические представления имеют смысл лишь тогда, когда они направляют выбор свойств или объектов для исследования связей при построении научно проверяемых схематизаций. Они относятся к предмодельному уровню исследований и играют положительную роль. Предмодельный уровень рассуждений неизбежен в любой науке. Однако доля построений предмодельного уровня исследований в науке не должна быть слишком большой.

9. Заметим, что ограничение применения ММ областью статической и динамической геологии пока является вынужден-

ным. Этот момент не всегда верно понимается исследователями, поэтому придется остановиться на нем подробнее.

Ученому очень трудно примириться с мыслью о том, что утверждения об объективном характере добываемых фактов, о том, что мир устроен закономерен, является не более чем принципами, т. е. положениями, в которые мы верим, но которые невозможно доказать, о чем очень хорошо написано Ю. А. Шрейдером [173]. Из этой непримиримости вытекают тенденции довольно странного, так сказать, «фотографического» подхода к познанию природы, ориентирующие исследователя на мысль о существовании в природе какой-то запытанной совокупности основных сведений, позволяющей «расшифровать» ее летопись с любой степенью точности. Это равносильно вере в то, что в переводе стихотворения на другой язык могут быть в точности переданы все оттенки оригинала. Поэтому, когда предполагаемые закономерности ускользают от естествоиспытателя, он надеется обнаружить их с помощью использования большего количества фактов, избавления от помех, более тонкой процедуры извлечения выводов и т. д. И тогда он обращается к математике.

Надо сказать, что применять ММ можно независимо от количества фактов и их сложности. Совершенно неважно, используются ли при этом вычислительные устройства и приемы. Математической прежде всего должна быть сама схема рассуждений. Нельзя упускать и то, что модель не адекватна действительности, что осмысление достоинств и недостатков модели действительности есть косвенный, но очень сильный способ влияния на эту действительность [173, с. 212]. В итоге ученый может начать действительность дотягивать до модели [173, с. 213]. Но в этом деле ММ никак не могут помочь. Они помогают строить модель, эксплуатировать ее, проверять ее действие, но не определять истинность или ложность этой модели.

Поэтому попытки «чтения каменной летописи Земли» на основе ММ (скажем, на основе теории информации) пока не пошли дальше изложения геологической проблемы в новых терминах. Одним из многочисленных примеров таких работ является статья А. С. Девдариани [67], из которой еще не вытекает заключения о возможности применения теории информации к расшифровке сигналов из геологического прошлого. Описываемые в этой статье задачи решаются по-прежнему на основе интуитивных соображений, хотя в процессе рассуждений введены формальные правила построения обобщенных графиков изменений некоторого свойства, наблюдаемого в колонке напластований.

Для того чтобы показать применимость формальной теории, к примеру теории информации, для решения выбранной проблемы, необходимо: а) дать постановку этой задачи в двойном варианте — геологическом

и информационном; б) указать метод решения информационного варианта. При этом постановка задачи сводится к указанию:

- 1) того, что задано экспериментально и теоретически;
- 2) что предполагается и допускается;
- 3) что требуется узнать;
- 4) как можно найти решение;
- 5) как оценить решение.

В статье [67] указывается только то, что задано экспериментально и что требуется узнать. Все остальное разбирается опять же путем рассуждений различного уровня достоверности с опорой на «здравый смысл, опыт и интуицию», хотя каждый шаг рассуждений по возможности расчленен на элементарные, четко определенные операции. Формализация последних и создает впечатление применения математического аппарата.

10. В связи со сказанным имеет смысл говорить только о проблемах статической геологии как о таких, где в первую очередь возможно рациональное применение ММ. Условимся также не затрагивать применения ММ в статической геологии на базе моделей математической физики [41].

Проблемы применения ММ в динамической геологии достаточно ясны, и в дальнейшем мы их касаться не будем. Вопросы динамической геологии в той или иной мере решались с помощью ММ, это, по сути дела, те же физические эксперименты, лишь осуществляемые в природных масштабах. Примерами таковых могут быть исследования закономерностей движения осыпей, переноса взвесей в водах, разрушения берегов морей волнами, формирования поверхности дна в зоне волнения, образования косой слоистости, речных меандр или террас, соотношения между восходящими движениями и размывом и т. п.

Рассматривать же внедрение ММ в историческую геологию, какой бы вес ей ни придавался, сейчас весьма затруднительно. Математику можно применять для изучения процессов в том случае, если существуют уравнения этих процессов, подобно тому как исследуются в частных производных уравнения колебания струны. Отметим, что все основные законы науки (законы Ньютона, Кеплера, Фарадея и т. д.) не историчны и не генетичны, обладая в то же время всем достаточным для развития теории. В геологии еще только предстоит выявить и сформулировать отдельные законы. Но надо помнить, что «... закон сам по себе еще ничего не объясняет, поскольку он только констатирует обобщенный характер какой-то фактической зависимости (последовательности, корреляции и т. д.). Объяснение же начинается только установлением координации законов...» [161, с. 164]. Математические методы в историко-генетиче-

ской части геологии пока могут применяться только на уровне постановки задач.

11. Может показаться, что вопрос о толковании геологии и ее разделении на статическую, динамическую и историческую имеет значение только в связи с обсуждением проблем применения ММ. В действительности же он крайне важен и для общего развития теоретической геологии [41, 92] даже в тех случаях, когда применение ММ не предполагается. Дело в том, что в своих рассуждениях геологи очень часто основываются на данных статической геологии вперемежку с положениями исторической, что приводит к обилию тавтологических высказываний, выдаваемых за дополнительные закономерности, к лингвистическим недоразумениям, путанице. Примером такой тавтологии является часто встречаемое перечисление «литологических», затем «палеогеографических», «тектонических» закономерностей размещения полезных ископаемых в таких формулировках, что вторые и третьи фактически представляют повторение первых, только в других терминах.

Выводы. Говоря о применении математических методов и ЭВМ в геологии, следует обязательно учитывать, что пока еще она представляет совокупность нескольких научных дисциплин, сильно различающихся содержанием, целями, методами, характером фактов и возможностями теоретических построений.

Учитывая предпосылки, необходимые для применения ММ и ЭВМ, геологию в общих чертах можно подразделить на три весьма различные части: статическую, динамическую и историческую. Традиционно наибольшее значение в геологических кругах придается интерпретационной части — исторической геологии, которая базируется на объективных построениях статической и динамической геологий. Применение же ММ и ЭВМ для исторической геологии наиболее сложно вследствие косвенного характера ее построений и неясности теоретических конструкций. Выводы исторической геологии представляют собой результат правдоподобных рассуждений. В настоящий момент попытки применить ММ для решения задач исторической геологии были бы непоследовательными: они не пойдут далее математической перефразировки результатов нестрогих рассуждений.

Наиболее интересные и важные задачи применения ММ и ЭВМ лежат в области статической и динамической геологий, и в первую очередь — статической. Главными задачами статической геологии следует считать установление связей между геологическими объектами или их свойствами, определение

формы и силы этих связей, определение тех оснований для выделения объектов, при которых обнаруживались бы оптимальные (для преследуемых целей) связи.

§ 2. О ТОЛКОВАНИИ ПОНЯТИЯ «МАТЕМАТИКА» И УСЛОВИЯХ ЕЕ ПРИМЕНИМОСТИ

1. Говоря о применении ММ и ЭВМ в геологии, необходимо яснее изложить сущность и возможности математики в этой области, так как распространенные среди геологов представления о ММ чаще всего ошибочны. В краткие курсы математики, которые читаются студентам геологических специальностей, не входит рассмотрение сущности и возможностей математики в целом. Именно по этой причине подавляющее большинство геологов воспринимает математику лишь как совокупность вычислительных приемов и способов подстановок величин в формулы. В этом отношении многие из них занимают, говоря словами Н. Винера, позицию «людей, не связанных с математикой по роду своих знаний», для которых «математика... — нечто в высшей степени скучное, сухое и отвлеченное. Если о ней когда-нибудь вспоминают, то она ассоциируется с неким подсобным аппаратом физики или с работой статистиков; в наиболее печальных случаях считается, что это почти то же самое, что занятие бухгалтерией» [26, с. 56]. Насколько глубоко внедрилось в геологических кругах это ошибочное понимание, видно из специализированной статьи А. М. Журавского «Математика и геологические науки» [75].

2. Подобное мнение является причиной устойчивой приверженности к традиционным — интуитивным в основе — методам исследования, которые на современном этапе уже должны считаться малопродуктивными и малоперспективными, замедляет темпы развития науки. В ряде случаев оказывалось активное противодействие внедрению ММ в геологию. Те немногие заделы, которые удается осуществить сторонникам математизации, квалифицируются как заумь или терминологические спекуляции. Вследствие недостаточного понимания сути математики возникает нетерпеливое требование немедленных результатов.

3. Толкование понятия «математика» более трудная задача, чем толкование понятия «геология». Однако оно нас интересует в основном в связи с возможностями применения математики в других науках, что облегчает задачу. Начнем с того, что приведем некоторые высказывания и ссылки.

С философских позиций о существе и возможностях математики подробно говорится, например, в работах Г. И. Рузавина «О природе математического знания» [137], А. Д. Александрова [2]. Очень красочно и увлекательно рассказано о математике в работе А. Реньи «Диалоги о математике» [135]. Сущность высказываний об этой науке можно было бы обобщить словами У. Сойера [143, с. 7]: «Математика — это классификация и изучение всех возможных закономерностей». Здесь имеются в виду любого рода закономерности, доступные для постижения и представляющие собой наиболее сильные стабильные характеристики постоянно меняющегося мира. Именно с позиции понимания математики как универсальной системы закономерностей У. Сойер привел слова А. Пуанкаре о том, что математика — это искусство называть разные вещи одним и тем же именем.

В работах известных французских математиков, выступающих под псевдонимом Н. Гурбаки, «Теория множеств» [23, с. 23] отмечается, что с времен древних греков говорить «математика» — значит говорить «доказательство». К этому уместно добавить слова Н. Винера: «Задача математики в том, чтобы с помощью четких и точных методов создать новое, более совершенное представление о мире, высказать какое-то суждение, которое еще немного приоткрывает завесу таинственного» [26, с. 57].

В. А. Успенский в предисловии к книге Ю. А. Шихановича «Введение в современную математику» [156, с. 7] отметил, что математика — это не только совокупность фактов, изложенных в виде теорем, и не только набор вычислительных приемов; это прежде всего язык для описания объектов исследования различных областей науки, арсенал методов строгих рассуждений. В сборнике «Общие вопросы применения математики в экономике и планировании» [115, с. 158] А. А. Марков писал: «... Самая важная черта математических методов: не то, что они являются количественными, не то, что они обычно связаны со счетом и измерением, а то, что они ведут к уточнению научных представлений... Существо математики — это точность понятий и строгость выводов»*.

Сказанное можно заключить выдержкой из книги Ю. В. Сачкова, где дается хороший обзор вопроса (раздел 1, § 2): «В современных определениях математики через самое себя

* Вопрос о степени доказательности математических выводов даже в столь точной науке, как механика, является в определенной мере дискуссионным и тонким. Это показано в статье И. И. Блехмана, А. Д. Мышкис и Я. Г. Паповко [40].



отмечается, что она есть наука об абстрактных структурах, законах их функционирования и развития и действий над ними; наука об абстрактных объектах и взаимосвязях между ними; наука об операциях (действиях, правилах вычислений) над объектами достаточно общей природы и т. п.». [139, с. 12].

К этому целесообразно добавить два важных момента, отмеченных Ю. В. Сачковым в том же обзоре.

а) Наибольшая ценность математики состоит в том, что «ее абстрактные объекты и отношения выражают остов, каркас, внутреннюю организацию наших знаний о соответствующих процессах природы» [139, с. 13]. История математики показывает постоянное расширение ее сферы путем обобщения методов, позволяющее охватывать новые объекты, более сложные, и в свете этого становится ясной несостоятельность нередко и сейчас культивируемых попыток заставить новые разделы математики рождаться из экспериментальных истин конкретных наук. Новые разделы математики возникали независимо от разработки многих новых естественных теорий (в частности, физических); последние скорее следствие развития математики, чем первопричина этого развития.

б) «Математика есть не только и даже не столько отдельная и особая научная дисциплина или область научного исследования; она представляет прежде всего определенный стиль, способ теоретического мышления, характеризующий достаточно высокий уровень его развития» [139, с. 21].

Резюмируя все это, можно сказать, что математика занимается изучением абстрактных множеств объектов, а также отношений между объектами любой природы. Образно говоря, она призвана заготавливать представления, понятия, приемы рассуждений и вычислений для различных конкретных наук.

4. Что же это значит — «применять математические методы»?

Из приведенных высказываний следует, что применение математики мыслится в качестве языка, аппарата, стиля мышления. Мы уже сказали, что большая часть геологов пока рассматривает математику весьма однобоко, главным образом как вычислительный аппарат, позволяющий оперировать мерой и числом. В геологии пока с трудом осознают общую роль математики, которую можно выразить словами С. Л. Соболева: «Есть одна наука, без которой невозможна никакая другая. Это математика. Ее понятия, представления и символы служат тем языком, на котором говорят, пишут и думают другие науки» [141, с. 5].

Целесообразно рассматривать математику и как язык, и как аппарат. Это два очень тесно связанных между собой воп-

роса. Однако очевидно, что математический аппарат возможно использовать только на основе математического языка. Стиль же математического мышления возникает впоследствии — как результат овладения и языком, и аппаратом математики. Из этого следует важный для нас вывод. До того, как математика в геологии сможет применяться в качестве аппарата, надо научиться использовать ее в качестве языка данной науки.

О значении такого языка для мышления, а следовательно, для правильного применения вычислительного аппарата очень хорошо сказано у М. С. Козловой [83] в разделе «Логическая критика естественного языка». Здесь в числе прочего приведено исключительно яркое и образное высказывание Витгенштейна, сравнивающего язык с одеждой, которая в зависимости от ее структуры и формы в разной степени позволяет определить скрытое под ней логическое «тело» мысли, иногда полностью маскируя последнее [83, с. 56—57].

Проблема точного языка в геологии остро поставлена в статьях Ю. А. Косыгина и В. А. Соловьева [91, 92]. Применять его надо под контролем содержательных геологических концепций. В первую очередь, в качестве языка науки математика должна быть использована для постановки задач, скажем, задач фациального или формационного анализа, задач поиска и т. п.

Подчеркиваем, что как язык математика может быть успешно использована в любой, но достаточно ясной ситуации. Оценка записи проблемы математическим языком не может быть дана математически. Как аппарат, причем не только для вычислений, но и для вывода любых суждений, математика может быть использована тогда и только тогда, когда выдвинутая задача уже соответственным образом поставлена и мы имеем дело с некоторой системой формализмов. Иначе говоря, объектами математического исследования могут быть только заранее построенные и строго оговоренные формальные системы. В их пределах математика дает наилучшее решение.

Решение любой задачи можно разделить на математическое и эвристическое. Под математическим понимается решение задачи при условии, что она четко и однозначно сформулирована, точно оговорены все условия. Это требует, чтобы величины, понятия и т. д., которые фигурируют в постановке задачи и далее при ее решении, были определены однозначно. Для каждой величины требуется дать четкий рецепт, указывающий, при помощи какого приема можно данный геологический объект сопоставить с тем или иным значением этой величины. Этот же рецепт служит и для обратного перехода

от величины к природному объекту. Когда отсутствуют оба эти условия, можно говорить об эвристическом подходе, даже если и применялся некоторый математический аппарат. Следует сказать, что при отсутствии четкой постановки задачи использование строгого математического аппарата часто совершенно излишне. Кроме того, при эвристическом подходе к решению возможны две ситуации: когда за нечеткой (или отсутствующей) постановкой задачи стоит в принципе правильная задача и когда нечеткая (или отсутствующая) постановка задачи скрывает в принципе бессмысленную задачу.

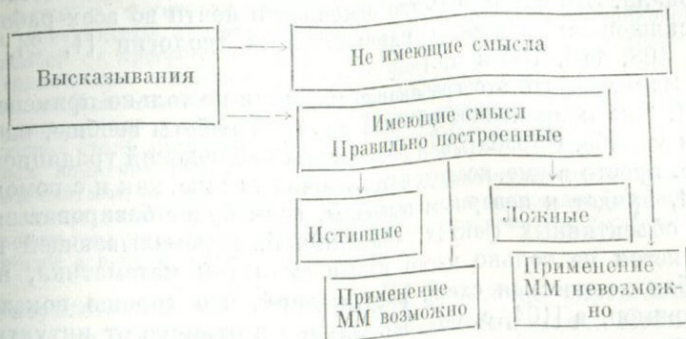
5. Теперь разберем вопрос об условиях применимости математики. Для начала продолжим уже цитированное высказывание А. А. Маркова [115, с. 158], в котором говорится, что, ведя к уточнению научных представлений, «... математические методы применимы только в тех науках, которые являются достаточно зрелыми для этого, у которых выработались четкие понятия или, по крайней мере, вполне осознана необходимость их выработки».

То же соображение подчеркивается известным немецким философом-логиком Г. Клаусом. В работе «Кибернетика и философия» [182, с. 42] он пишет: «Естественно, что математику можно применять в определенной области науки в том случае, если постановка проблем и система понятий в этой области науки сформулированы настолько ясно, что допускают математическую обработку. Представителю конкретной науки, и самому толком не знающему, что, в сущности, он хочет сказать, не стоит надеяться, что его еще не перебродивший продукт мышления может быть обработан точным инструментом математики». Аналогичное замечание делает и П. Дирак [70], говоря, что математика есть только орудие и что нужно уметь владеть физическими идеями безотносительно к их математической форме.

Сказанное можно представить наглядно (схема 2).

Если сопоставить высказывания А. А. Маркова и Г. Клауса, можно заметить, что они несколько по-разному толкуют условия применимости математических методов. По мнению А. А. Маркова, математические методы применимы в тех областях конкретных знаний, в которых, по крайней мере, осознана необходимость выработки четких понятий и постановок задач, а по мнению Г. Клауса, математические методы применимы только в тех областях, где уже имеются четкие понятия и постановки задач. Такое расхождение обусловлено следующим.

Когда о применении математических методов в конкретных областях знаний говорят математики, они имеют в виду два



направления. Во-первых, применение языка математики и ее методов рассуждений для анализа и совершенствования теоретических представлений конкретной области знаний, в частности для получения четких формулировок понятий и математической постановки задач. Во-вторых, применение арсенала методов математических рассуждений и вычислительных приемов для решения математически поставленных задач конкретной области знаний. Эти два этапа — постановку задачи и их решение — следует всегда четко и строго различать.

Когда же о применении математических методов в конкретных областях знаний говорят философы-логики, они имеют в виду лишь второе из упомянутых направлений.

Хотя эти два направления сильно взаимосвязаны, они существенно различаются. Дело в том, что постановка задач в значительной мере — искусство. Поэтому все результаты, которые могут быть получены на первом направлении, только эвристические. Это означает, что они заранее не гарантируют возможности получения решения (в отличие от алгоритмических процедур, которые его гарантируют [134, с. 182]), тем более не гарантируют получение наилучшего из решений.

Полученные постановки нельзя обосновать. Их ценность полностью зависит от ценности определяемых ими результатов, получаемых строго на том этапе, где математический подход применяется к формальным конструкциям и который является скорее техникой дела.

Следует всегда учитывать, что применение ММ и ЭВМ в любой естественной науке не является самоцелью. Оно призвано обеспечить принятие наилучшего из возможных решений в точно оговоренных условиях. Поэтому доброкачественное использо-

вание ММ предусматривает использование качественного материала. Это обстоятельство отмечается почти во всех работах, посвященных вопросам математизации геологии [1, 24, 61, 93, 108, 118, 180 и др.]

Заметим, что это требование касается не только применения ММ. Оно непереносимое условие научной работы вообще, на любом уровне. Обработывая результаты наблюдений традиционно, т. е. просто в уме, исследователь точно так же, как и с помощью ММ, придет к неверным выводам, если будет базироваться не на объективных фактах. «Мельницей, перемалывающей все», является не только часто называемая так математика, но и любая логическая схема рассуждений, что хорошо показано, например, в [104, с. 60—62]. Однако в отличие от интуитивно работающего исследователя, который нередко добавляет факты уже в ходе рассуждений (и часто не замечает этого), математический аппарат не производит новой информации и, будучи запущен, обходится введенными в него сведениями. Поэтому информационная необеспеченность задачи при попытке обратиться к ММ становится особенно заметной, в свете чего более свободные действия при интуитивной обработке иногда кажутся более привлекательными, более результативными.

6. Основные ограничения применимости ММ вытекают из требований формального подхода. Выше отмечено, что ММ могут оперировать только с формализованными конструкциями. В геологии созданию таких конструкций должно предшествовать совершенствование понятий науки.

Ограничения, которые накладывают на ММ несовершенные понятия геологии, понимаются пока весьма узким кругом геологов, что во многом дискредитирует идеи ММ в геологии. Процесс уточнения понятий многие геологи, привыкшие к нечетко трактуемым идеям, считают излишним, а формально уточненные понятия ими плохо воспринимаются и считаются неудачными, трудными, непонятными и др. [24]. Из этого делаются заключения или о том, что математику в геологии невозможно или не нужно применять, или о том, что уточнения надо проводить локально, далеко не для всех понятий, и по ходу решения конкретных задач.

Применяя плохо определенные понятия, сталкиваются с первым ограничением ММ; такие понятия не гарантируют от засорения исходной информации необъективными данными.

В качестве примера удобно еще раз затронуть статью А. С. Девдариани [67], где в качестве «сигналов из прошлого» рассматривается, по сути дела, не объективная информация, а интерпретация, заключающаяся в приписывании наблюдаемому факту (в осадке есть раковина такой-то формы) ненаблюдаемого свойства (этот вид теплолюбив, и, следовательно, осадки, заключающие такие раковины, формировались в зоне теплого климата).

Подчеркнем, что уточнение понятий важно не только для обоснования применения ММ. Оно важно и для развития теоретической науки в целом. Опасность невнимательного отношения к совершенствованию

понятийной базы науки отмечена Б. М. Кедровым на примере положения в биологии: «Сравнительно недавно мы были свидетелями, как... посредством невероятной путаницы понятий и произвольного их толкования выдавалось за прогрессивное учение (причем единственно прогрессивное, единственно материалистическое!) нечто весьма сумбурное и неверное...». И далее: «Невозможно говорить о какой-то теории, о каком-то учении..., если в основе прокламируемых «учений», «теорий» и «законов» лежат столь распылчатые, легко трактуемые в совершенно разных смыслах понятия» [80, с. 7—8].

Мы считаем, что эти слова применимы ко многим аспектам геологии, в частности к учениям о рудных, магматических и осадочных формациях, ко многим геохимическим, прогнозным и геотектоническим построениям, ко многим аспектам исторической геологии.

Разумеется, формально уточнять достаточно определенные понятия не требуется. Но таких в геологии мало. Поэтому, прежде чем поставить геологическую задачу в математическом виде, требуется всякий раз уточнять понятия. Результаты такой работы могут быть использованы и при решении других задач, опирающихся на те же понятия, и тем самым процесс формализации понятийной базы геологии будет расширяться и углубляться. К данному вопросу мы еще вернемся ниже.

Выводы. Говоря об использовании ММ и ЭВМ в различных науках, следует иметь в виду, что оно происходит в двух тесно взаимосвязанных аспектах: совершенствование теоретических представлений и постановки задач; решение математически сформулированных задач. Эти аспекты хотя и тесно связаны, но различны как с точки зрения условий их реализации, так и критериев оценки качества результатов. В первом направлении ММ и ЭВМ можно употреблять в любых геологических ситуациях, когда хотя бы на разъяснительном уровне нам ясно, чего мы хотим; во втором — только тогда, когда задача выражена системой формализованных высказываний.

Применение ММ и ЭВМ на первом направлении — в качестве научного языка для доказательных рассуждений — есть искусство; на втором — техника, позволяющая получать точные выводы и наилучшие решения в строго оговоренных ситуациях. Необходимо четко различать вопросы постановки задач и их решения. Чем яснее и конкретнее осуществлена постановка задачи, тем легче подобрать из арсенала математики или создать адекватный аппарат. Применение ММ в качестве языка для геологии должно сейчас стать основным направлением, с этого надо начинать в любой ситуации.

Цель применения ММ, состоящая, как сказано, в получении наилучшего решения в строго оговоренной ситуации, диктует условие применимости. Они заключаются в точной формулировке задач и использовании объективных данных.

§ 3. О РОЛИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГЕОЛОГИИ

1. В предыдущем разделе было выяснено, что значит — применять ММ. Теперь требуется установить, возможно ли это при решении геологических вопросов и какое значение для геологии может оно иметь.

По остроумному замечанию А. Гумбольдта, всякая плодотворная идея проходит в человеческом уме через три стадии: сначала — «какая чушь!», затем — «в этом что-то есть!», наконец — «кто же этого не знал?». Через подобные три стадии, по-видимому, уже прошла и идея математических методов и ЭВМ в геологии. Однако до сих пор нет ясной точки зрения относительно их значения в этой области науки. А это важный вопрос, который и будет рассмотрен с небольшими экскурсами в прошлое.

До недавнего времени, примерно до 1965 года, существовали различные точки зрения даже по вопросу о принципиальной возможности приложения ММ в геологии. К объективным факторам, на которых основывается отрицание такой возможности, можно отнести, например, многопараметровый характер описания геологических объектов, качественный в основном характер сведений о них, необходимость изучать их во времени. К субъективным — ссылки на неполноту геологических сведений, на специфичность геологических методов. Отмечалось, что применение ММ и ЭВМ требует абстрагирования от некоторых свойств объектов и, следовательно, потери этих свойств, обеднения данных; что применение ММ ведет к искусственному расчленению объектов [5, 21, 125, 168]. Однако все подобные аргументы не выдерживают критики [117].

Сложность объектов исследования предполагает применение сложных методов, а они не могут быть созданы без привлечения математики. Качественный характер геологических сведений тоже не может служить препятствием, ибо современная математика располагает средствами анализа, синтеза и обработки как количественных, так и качественных данных. «...Даже в современной научной литературе... точные методы исследования нередко отождествляются с количественными методами. С этим, конечно, нельзя согласиться» [9, с. 34]. Применение только количественных данных еще не гарантирует от нестрогости выводов. К тому же между количественными и качественными категориями нет резкой границы [152].

Историзм в геологии заключается в исследовании объектов и явлений во времени, а для этого как раз и необходим матема-

тический аппарат. Неполнота геологических сведений требует тщательной их обработки, и только ММ могут позволить создать такие средства обработки. Нельзя исследовать природные объекты и явления, не абстрагируясь от некоторых свойств, не расчленив их.

Опасения за искажения природных объектов и явлений при абстрактном подходе очень характерны. Дело в том, что геологи обычно не считают необходимым оговаривать принципы выделения геологических объектов, считая последние естественными. Долгое время вопрос о неоднозначности подразделения геологического пространства на объекты и о роли субъекта в этом подразделении не возникал [см. 50, 74], так как считалось, что подразделять его нужно и можно так, как это есть в природе, а возникающие недоразумения относились за счет неопытности отдельных лиц.

2. Следует особо остановиться на одном из наиболее живучих доводов, которыми до сих пор обосновывается если не принципиальная невозможность, то, по крайней мере, существенная затруднительность применения ММ в геологии. Речь идет о тех высказываниях, которые имеют в своей основе признание существования упомянутых особых геологических методов и того, что геологические объекты тоже специфичны.

Непонятно, что такое «геологические методы». *Метод вообще представляет собой подход к явлениям, путь, способ достижения цели* [86, с. 301]. Есть методы общие, универсальные и специальные. Но нельзя различать методы по объектам, так как совершенно различные по содержанию объекты могут исследоваться одними и теми же методами.

Специфика у геологии, конечно, есть. Большинство геологов видит специфику в том, что объекты, изучаемые геологией, нередко занимают большой объем пространства, сложны, недоступны для непосредственного исследования как целое; в том, что наблюдения приходится проводить в тех местах, где позволяет ситуация местности. (Мы отвлекаемся от трудностей психологической обстановки — усталости, внешних раздражителей и т.д.). Иначе говоря, получается, что специфичность заключена в способах сбора данных, наблюдений. Но дело не столько в этом, сколько в следствиях из этого. Специфичность геологических исследований заключается и в том, что данные о свойствах многих объектов, изучаемых геологией, в отличие от процедуры изучения небольших по размеру объектов, скажем, зерна минерала или какой-либо пробы, опираются не на прямые, а на косвенные и дорогостоящие процедуры измерений. Косвенный способ получения выводов требует большого

числа наблюдений, а высокая цена последних (проходка горных выработок, поездки к обнажениям) побуждает стремиться к минимальному числу их. Все это, однако, не является противопоказанием к применению ММ и ЭВМ. Косвенность процедур измерений и необходимость сокращать число измерений как раз и требуют применения теоретических моделей в отличие от голого экспериментирования, основанного на вере в то, что чем больше разных, пусть даже несистемных, наблюдений, тем больше можно узнать и тем лучше будут выводы.

Важно заметить, что сейчас в геологии сбор определяет обработку фактов, а не наоборот. На ММ всегда смотрят как на способ обработки данных, и поэтому отмеченная специфичность выдвигается в качестве стойкого аргумента против ММ и ЭВМ в геологии. При существующем положении это в определенной мере справедливо. Но суть дела в том, что принципиальная ориентация геологии на применение математических методов должна изменить это положение. Они должны влиять на способ сбора данных, вся система геологических наблюдений и опробования должна быть подчинена требованиям последующей их обработки математическими методами. Здесь, разумеется, придется учитывать, какие возможности сбора геологических данных зависят от исследователя, а какие — от природных ситуаций.

3. Другой специфической характеристикой геологических методов, более существенной для вопроса о приложении ММ, является то, что в изучении геологических объектов большую роль играет субъективное, чувственное восприятие. Именно то, как данный исследователь воспринимает природу, во многом направляет ход его работы и порядок решения подзадач. Даже когда геолог опирается на наблюдения, регистрируемые прибором (например, при геохимических и геофизических исследованиях), определенная специфичность его работы заключается в том, что эти наблюдения он проводит в соответствии со своими представлениями, выработанными на основе чувственного восприятия естественных объектов, на которые подразделяется геологическое пространство (скажем, ориентируя сеть маршрутов «вкрест простирания» слоев). Хотя подобные действия при измерениях характерны для любых исследований, не только геологических, в геологической работе исследователь менее контролируем, больше предоставлен самому себе, часто его наблюдения нельзя повторить в отличие от большинства физических и других экспериментов.

Таким образом, можно сказать, что вся специфичность геологических методов заключена, по-видимому, в основном в субъективности выбора некоторых действий и оценок. Наблюдение такого рода невоспроизводимы, именно поэтому совпадение мнений относительно тех или иных характеристик геологического пространства воспринимается почти как доказательство их истинности. В геологии это серьезный критерий оценки работ, здесь доказательства очень часто подменяются ссылками на мнения авторитетов. Для применения же ММ требуется, как говорилось, использовать достоверные, воспроизводимые факты и выводы, полученные как результат цепочки доказательств.

Пока же построения некоторых геологов кое в чем напоминают стиль средневековой науки, характеризующейся неясностью идей, духом комментаторства, догматизмом. Ученые того времени имели склонность скрупулезно собирать слабо основанные на опыте мнения своих предшественников, требуя безоговорочного принятия цитируемого автора, и «правила в науке представляли интерес не с точки зрения того, как они были получены, а в той мере, в какой они могут служить рецептом для практических действий» [100, с. 226].

Интересно заметить, что от утверждений специфичности геологии перешли к высказываниям о том, что для применения ММ в геологии надо создавать особые разделы математики, соответствующие геологическим задачам [130]. Трудно возражать против того, что найдутся геологические задачи, которые потребуют создания новых исчислений. Это реальная ситуация при применении ММ в любой науке. Однако заранее выдвигать требование создания новых разделов математики как условие ее применимости в рассматриваемой области совершенно необоснованно. «У нас есть веские основания считать, что те дисциплины, которые строили свой аппарат, опираясь на математику и физику, эти,— говоря словами Ростоу,—передовые отряды в содружестве наук» возвысились гораздо быстрее по сравнению с отраслями, пытавшимися создать свои собственные или идиографические структуры» [163, с. 27].

4. В конце концов после длительных и острых дискуссий сейчас мало кто оспаривает принципиальную возможность применения математических методов в геологии [1, 35, 119]. После того как ММ получили в геологии (по крайней мере от достаточно большой доли исследователей) признание [132—134], встал вопрос о том, какое положение они могут занять в геологических исследованиях. Дискуссия об этом идет до сих пор.

Представляется, что определять место ММ и ЭВМ в геологических исследованиях безотносительно ко времени нет смысла. Следует различать, какое место они занимают в настоящее время и какое будут занимать в будущем. В каждом случае возможна оптимистическая и пессимистическая точка зрения.

Пессимистическая точка зрения на настоящее и будущее ММ в геологии кратко, но весьма четко высказана в работе круп-

нейшего европейского геолога С. Н. Бубнова «Основные проблемы геологии» [21, с. 22], где отмечалось, что отправная точка феноменологического естествознания — математически обоснованный опыт — в геологии не играет и не может играть решающей роли. Немалое количество ведущих отечественных геологов разделяло и разделяет эту точку зрения, рассматривая попытки применять в геологии математику как своего рода модное, но преходящее увлечение. Любопытно отметить одно знаменательное исключение — Д. И. Мушкетова. В своей классической работе «Физическая геология» Д. И. Мушкетов писал: «...Ни одна наука, пожалуй, не далека еще так от проверки своих идей математикой, как геология, чем и объясняются ее теоретические неудачи, хотя и существует мнение о ненужности математического анализа, но вряд ли оно правильно» [110, с. 812].

Оптимистическая точка зрения на современные математические методы в геологии наиболее ярко выражена в работах А. Б. Вистеллуса [28, 31, 32, 33, 34 и др.]. В соответствии с этой точкой зрения успехи математических методов настолько велики, что уже сейчас можно говорить, по аналогии с математической физикой, о математической геологии. В [33] под математической геологией предполагается понимать научную дисциплину, занимающуюся математическим моделированием геологических процессов.

Существует ли действительно математическая геология? В работе [41] подвергались сомнению заявления о том, что математическая геология уже создана. Возражения сводились к следующему. При образовании математической разновидности некоторых дисциплин, например геологии, психологии, физиологии и прочее, нельзя опираться на представления о математическом моделировании процессов (геологических, психологических, физиологических). В соответствии с принятым сейчас представлением математическое моделирование процессов (или объектов) не может быть предметом математической дисциплины. Такое моделирование, всегда носящее эвристический характер, не входит в задачу математики, оно входит в обязанности теоретика данной науки [109, 114, 151, 165, 173, 175]. Известно, что математическая физика не занимается моделированием физических процессов. Она занимается математическим исследованием уже готовых математических моделей, которые были предварительно построены физиками-теоретиками [122]. Таким образом, создать новую математическую науку — это значит ввести новый набор понятий, построить новые математические модели и, главное, сформули-

ровать на такой базе новые математические задачи [41]. Геология пока далека от всего этого.

В конечном счете сегодняшние успехи математики в геологии, разумеется, не определяются тем, внесено в обиход новое словосочетание «математическая геология» или нет. Они определяются другими факторами. В [41] отмечалось следующее. Задачи, которые сейчас решаются в геологии с помощью ММ, в основном связаны с построением и проверкой математических моделей: с экономным представлением экспериментального материала, анализом связи между наборами свойств и статистической проверкой гипотез о генезисе геологических объектов или гипотез о зависимости их свойств от координат на базе существующих образных представлений геологии. Во многих таких работах, например, идет речь о восстановлении процессов осадкообразования, однако заранее не оговариваются, какие два процесса по определению считаются различными, а какие одинаковыми. В еще большем числе работ речь идет о существенном различии в химизме петрографических комплексов конкретных районов, причем опять-таки заранее не оговаривается, какое различие в химизме является существенным и в каких целях. Короче говоря, отсутствует постановка задач отдельно от их решения. В геологии приступают к решению задачи, когда постановка ее еще не выкристаллизовалась. В итоге создается впечатление, что сейчас во многих случаях применение математических методов имеет тот же смысл, что и в свое время применение механики в тектонике [64].

5. Итак, точки зрения на ту роль, которую играют и могут играть ММ в геологии, различны. Это определяется различием трактовок целей геологии и понимания ее как науки, что довольно наглядно иллюстрируется популярно написанной статьей В. Н. Шолпо [171]. Из нее следует, что представители традиционной геологии не могут оценить роль ММ вследствие недостаточного знания математики; те же, кто сейчас является сторонниками математизации, даже при наличии специального геологического образования, не имеют необходимого опыта для глубокого понимания существа геологии. С этим переплетаются высказывания об ограничительной для ММ специфичности геологических методов. О специфичности геологических методов уж говорилось в предыдущем разделе. Что касается понимания целей, то это одно из трудных мест в такой еще в основном описательной науке, как геология. Здесь над исследователями пока довлеют натурфилософские тенденции: в геологии четкой целью исследования считается подробное изучение геологического строения региона [171], структуры,

состава, какого-либо объекта и т. д. Но описание — не цель, а средство для продвижения к какой-то цели. Последняя же, как правило, четко не формулируется. А это при любых методах может сделать подробное изучение малоэффективным в ряде аспектов, что геологи чувствуют достаточно часто, например при использовании геологических карт государственной съемки, когда не могут найти в них ответа на новые возникающие вопросы. Это видно и из многократности посещения разными и одними и теми же геологами одного и того же ранее подробно изученного района и по открытиям в таких районах новых и новых явлений. В итоге можно сказать, что целью многих геологических работ является выявление любой подвинувшейся закономерности.

Подобное понимание целей объясняется тем, что до сих пор опыт в геологии предшествовал теории. Это обстоятельство и определило замедленные темпы развития геологии, а заодно и незначительную потребность в ММ. Увеличивать продуктивность некоторой отрасли промышленности сейчас уже нецелесообразно за счет увеличения количества рабочих рук. Аналогично и в геологии повышение эффективности исследований не может долго идти путем расширения эмпирических данных. Встает вопрос о повышении производительности труда и качества его результатов. Именно на это и нацелены ММ. Но если продолжать понимать геологию только как историческую науку и считать, что добывание фактов основано на специфических геологических методах, по определению чуть ли не отмежевывающихся от требований математизации, то в оценке возможностей ММ как сегодня, так и в будущем придется, действительно, встать на пессимистическую точку зрения.

6. В [41] отмечается также, что теоретическая ценность интересующих нас работ по применению ММ в геологии должна быть признана сомнительной, а практическая ценность — не поддающейся объективной оценке. В статье Э. Э. Фотиади и др. [160] обращено внимание на то, что решаемые сейчас с помощью ММ геологические задачи не имеют четких постановок; известные алгоритмы решения этих задач имеют неизвестную область применимости; при решении таких задач не учитывается совсем или учитывается субъективно самая необходимая геологическая информация, например форма геологических тел, их ориентация и взаимное расположение. Видимо, такую точку зрения, изложенную в [41 и 160], можно считать спорной. Бесспорно же следующее. Рассмотрев геологические работы, опубликованные в журналах «Советская геология» и «Геология и геофизика» за 1965—1970 гг., мы установили, что

только 2% этих работ связаны с применением математических методов, 2,5% статей содержат ссылки на работы, связанные с применением математики. Анализ различных геологических учебных руководств (по литологии, петрографии, структурной геологии и стратиграфии), выпущенных в свет в эти же годы, показал, что ни в одном из них не затрагиваются вопросы применения математических методов. Фундаментальные работы, изданные на русском языке, посвященные методологии применения ММ в геологии, — это главным образом переводные [61, 93, 108 и др.]. В таких крупных научных геологических учреждениях СССР, как ГИН АН СССР, ИГиГ СО АН СССР, СНИИГГиМС МГ СССР, применением математических методов в геологии занимается не более 3% научных сотрудников. В производственных геологических организациях (например, в Новосибирском территориальном геологическом управлении) такой работой занято около 2% геологов из числа тех, кто проводит камеральную обработку геологических данных.

Таким образом, есть основания считать, что математические методы не играют пока в геологии сколько-нибудь существенной роли [5, 27, 105, 111, 132, 133, 180, 182].

Относительно будущей роли этих методов в геологии следует признать справедливой точку зрения, обоснованную, например, в работах А. Б. Вистелиуса, Э. Э. Фотиади, Ю. А. Косыгина и др., а также ряда зарубежных авторов. В соответствии с этой точкой зрения при выполнении некоторых условий математические методы в геологии со временем вытеснят существующие способы геологических рассуждений и займут такое же место, какое они занимают в физике. Однако существуют серьезные расхождения относительно того, какие условия требуются для обеспечения математическим методам соответствующего места в геологии. Эти расхождения мы обсудим позднее. Скажем только, что ММ будут играть в геологии эффективную роль в том случае, если изменится отношение к условиям их применения, если для их внедрения будут предварительно приложены усилия по специальному совершенствованию методологии. Какие именно усилия и в каком направлении — нам предстоит определить. Если же такой подготовке не будет уделено соответствующего внимания, то, видимо, применение ММ в геологии принесет некоторые частные успехи, но в общем плане существенно улучшить положение в настоящее время вряд ли удастся.

Выводы. Итак, доводы в пользу того, что специфика геологических методов исследования и объектов может оказаться серьезным препятствием использованию ММ для совершенства

ния теоретических конструкций геологии, не могут считаться обоснованными. Оценка роли ММ в геологии, однако, должна быть дифференцированной — для текущего момента и для будущего. Положение, существующее в настоящее время, можно оценить пессимистически: роль ММ в геологии сейчас сводится к сугубо вспомогательным операциям, а в ряде случаев — не более чем к применению математической терминологии. В будущем же, если будут приняты правильные методологические посылки, заключающиеся в специальном совершенствовании методологии применения ММ к решению геологических задач, ММ смогут и должны будут занять в геологии такое же место, какое они занимают в физике.

§ 4. ПРИЧИНЫ НЕДОСТАТОЧНОГО ВЛИЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГЕОЛОГИИ

1. Выше показано, что применение математических методов в геологии носит пока узколокальный характер. Это означает, что ММ привлекаются к решению некоторых элементарных подзадач геологических задач, как правило, только с целью получения каких-либо характеристик, которые затем используются для обоснования тех или иных геологических концепций. В качестве примера таких действий можно назвать измерения зависимости между переменными с целью проверки различных гипотез [61, гл. 21]. При этом, если применение математического метода не позволяет достичь намеченной цели, его заменяют другим.

Такой подход нельзя назвать наилучшим. Он опасен тем, что с помощью математики лишь придается вид доказательности уже намеченным результатам. Грубо говоря, ММ и ЭВМ в такой постановке играют роль быстрых, исполнительных, но лишенных своего разума помощников. Такие помощники не оказывают заметного влияния на развитие теоретических представлений геологии, нельзя назвать ни одного случая влияния результатов, полученных с помощью ММ, на геологию в теоретическом плане.

2. Рассмотрим причины, по которым до сих пор математические методы слабо привлекались для совершенствования теоретических представлений геологии.

Одна из причин, которая сразу же бросается в глаза, — это консерватизм подавляющего большинства геологов, их при-

верженность к привычным методам исследования. Надо сказать, что это свойство не является специфическим только для геологов, оно присуще в такой же степени всем прочим ученым. Известно, что «никто не любит изменений, это одна из великих истин, которую мы должны понять в психологии исследовательской работы» [113]. Эта причина наиболее заметная, но не самая главная.

3. Более важна вторая причина: математическая подготовка геологов не только не позволяет им самостоятельно использовать преимущества математического подхода, но и не дает возможности осознать до конца эти преимущества.

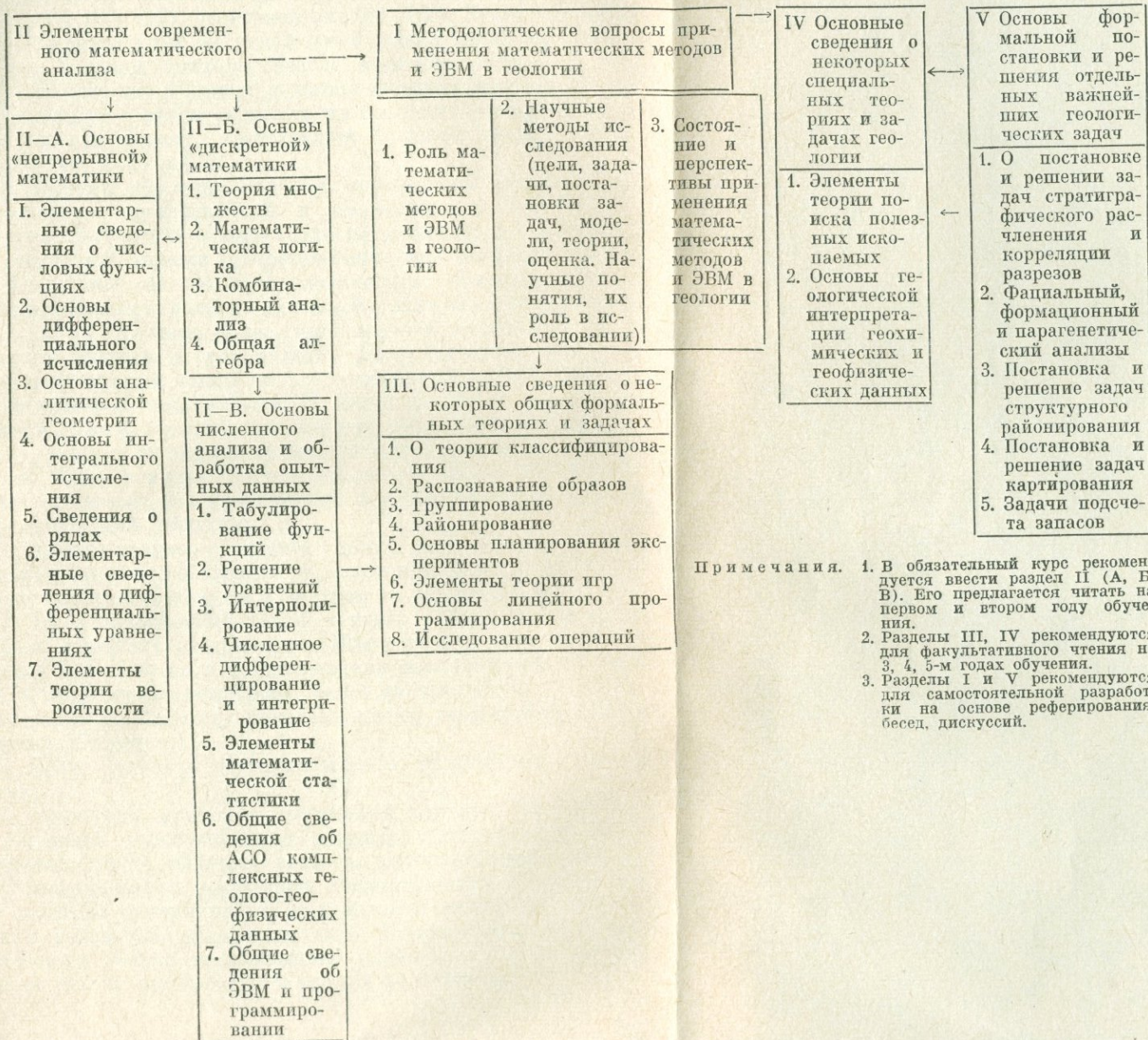
Вопросы коренного изменения математической подготовки и переподготовки геологов уже неоднократно рассматривались, например в работах [41, 54, 136, 158] *.

Наиболее подробно об этом говорится в статье [158], где отмечается, что в оптимальном случае специальный курс должен преследовать следующие цели: во-первых, и это самое главное, научить описывать геологические задачи приемлемым для математиков образом, а также научить правильно истолковывать математические результаты; во-вторых, научить понимать язык и способы рассуждений математиков; в-третьих, научить правильно оценивать возможности и перспективы математических методов. Известно, что правильное истолкование результатов невозможно без понимания того, как они получены [164]. По этому поводу часто приводят притчу А. Эддингтона об ошибке рыбака. Рыбак ловил рыбу сетью с ячейками определенного размера, считая, что самая мелкая рыба, которая ему попадалась, была вообще самой мелкой рыбой в море (на этот счет можно было бы построить генетическую теорию).

Любому числу предшествует определение того, что оно означает, как может прямо и косвенно измеряться и зачем оно вводится. Если нет определения и цели, например для понятия об относительной распространенности химических элементов или изменчивости форм залежи (для их вычисления можно использовать самые разные гипотезы), то бессмысленно вычислять и обсуждать какие-либо цифры. В специальный курс

* Новосибирское территориальное геологическое управление, Вычислительный центр СО АН СССР, Казахстанская опытно-методическая экспедиция Министерства геологии КазССР создали «Программу и методические разработки к курсу применения математических методов и ЭВМ при поисках и разведке полезных ископаемых» [131].

Схема курса «Применение математических методов и ЭВМ в геологии»



должны входить основные понятия и теоремы, необходимые для описания предметов, методов, областей применимости и значения таких разделов математики, как теория множеств, математическая логика, комбинаторный анализ, теория вероятностей, теория информации, математическая статистика, теория игр, теория статистических решений, теория исследования операций, а также элементы программирования. Их согласование следует провести прежде всего по методологической линии. Нужно дать геологу четкое современное представление о том, что такое задача, постановка задач, модель, построение модели, теория, построение теорий и их оценка.

Этот курс надо также согласовать с традиционными теоретическими курсами. В этих целях он должен содержать по возможности математизированные изложения какого-либо раздела теоретической геологии, например, основ структурного, фациального или парагенетического анализов [48, 50, 89, 90]. Как нам представляется, в специальный курс необходимо включить и подробное обсуждение различных задач, связанных с описанием геологических объектов; исследованием их путем классифицирования, в частности распознаванием и группированием; подсчетом запасов, а также тех основных задач, которые рассматриваются в руководствах по применению математической статистики в геологии [71, 93, 108, 169].

Таким образом, в [158] речь идет о создании специального курса нового междисциплинарного типа [159]. На схеме 3 предлагается проект такого курса.

Необходимо изменить весь подход к изложению математики. Следует вести изложение в два цикла: на первом — «с птичьего полета», на втором — «в деталях». Следует начинать не с простого, а с того, что имеет ясный геологический смысл и значение (например, начинать с уравнений математической физики, переходить к обыкновенным дифференциальным уравнениям, а затем вновь возвращаться к уравнениям математической физики). Математические доказательства необходимо рассматривать особо, с систематических позиций.

4. Третья причина, по которой математические методы пока еще не играют сколько-нибудь существенной роли в развитии теории геологии, заключается в том, что до сих пор не удалось построить хотя бы одну такую математическую модель, которая позволила бы постановить и безусловно решить какую-либо принципиально важную задачу. Все геологические задачи, которые мы сейчас умеем доводить до практического результата, плохо поставлены. Для решения каждой из таких задач пост-

роены десятки алгоритмов, но указать область их применимости и оценить точность получаемых с их помощью результатов мы не можем [160]. Типичные примеры таких задач: подсчет запасов [11, 79, 103, 112], распознавание [63, 160]. Ясно, что безупречное решение хотя бы одной такой задачи имело бы, помимо прочего, большое психологическое значение. Вопрос о том, почему до сих пор с помощью математических методов не удалось должным образом решить хотя бы одну принципиальную геологическую задачу, представляет большой интерес, и мы его обсудим особо в § 6.

5. Имеется еще одна причина, тормозящая внедрение математических представлений в теоретическую геологию, — это методологические основы геологии, в частности сложившаяся практика оценки теоретических геологических работ. Она базируется на тех методологических посылах, которые были выработаны в геологии на ранней стадии ее развития и которые, как мы покажем далее, противоречат методологическим посылам физики и математики. Для геологии, пожалуй, в большей, чем для какой-либо другой науки, мере справедливо соображение, высказанное Н. Винером [26, с. 35]: «К сожалению, прием, который ожидает в научном мире ту или иную работу, зависит не только от ценности ее содержания. Подчас гораздо более важным оказывается совсем другое. Например, то, какой интерес она представляет для ведущих специалистов соответствующей области».

От любого ученого требуется усилие воли для того, чтобы проявить заинтересованность в некотором деле, которое он считает перспективным, но в котором он неважно разбирается. Чаще всего непривычный способ и стиль работы не считается важным, вызывает раздражение. Иначе говоря, эта четвертая причина заключается в существовании психологических барьеров. Она представляется нам более значительной.

Выводы. Причинами узколокального применения ММ в геологии являются:

1) недостаточность математического образования специалистов;

2) отсутствие примеров построения удачных математических моделей принципиально важных геологических задач (например, задач подсчета запасов, распознавания, поиска);

3) инерционность мышления исследователей и сложившаяся практика оценки работ, при которой новые подходы вызывают недоверие, вследствие чего исследователи стремятся реализовать только те привычные подходы, которые не требуют от них затрат времени и усилий на обучение.

§ 5. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ГЕОЛОГИИ И ФИЗИКИ НА БАЗЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ЗАДАЧАХ И МОДЕЛЯХ

1. В узком смысле под методологическими основами какой-либо конкретной науки можно понимать критерии, которыми руководствуются при проведении научных работ и на основе которых производится оценка научных исследований [106].

Если назвать занятие наукой игрой, то методология — это как бы правила игры. Роль ее огромна. В частности, методология оказывает непосредственное влияние на выбор средств научных исследований, от нее зависит успешное развитие науки [106, 116, 123]. В различных областях знаний основы методологии различны, но они имеют и некоторые общие черты. Известно, что правила доказательств в математике и физике несколько различаются [173], но известно также, что все научные работники, независимо от специальности, руководствуются в своих рассуждениях одними и теми же правилами логики, что и позволяет говорить о логике научных исследований [8, 15, 19, 55, 81, 96, 140, 147, 150, 153]. В разных науках методологические основы развиты в разной степени, наиболее тщательно они разработаны в физике и математике [123]. Почему же математика является базой теоретической физики, но не является таковой для теоретической геологии? Для уяснения этого требуются общие представления о задачах, моделях, теориях.

2. Существуют три толкования задачи: широкое, среднее и узкое. При широком толковании любой вопрос, интуитивно воспринимаемый как имеющий смысл, уже считается научной задачей. При среднем требуется сформулировать вопрос в терминах некоторой формальной теории и показать, что он имеет смысл в данной теории. При узком толковании вопрос оговаривается так, чтобы можно было доказать, что он имеет решение, и притом единственное.

Постановка задач также осуществляется тремя способами. В первом случае вопрос просто формулируется. Так делается при постановке большинства геологических задач, когда, скажем, ставится задача: изучить строение некоторого района в заданном масштабе, провести районирование, позволяющее выявить закономерности строения. В физике такая постановка считается преднаучной, там задачи чаще ставятся вторым способом. Третьим способом задачи ставятся в математике.

К перечисленным в § 1 пяти пунктам постановки задач следует добавить шестой, заключающийся в требовании определить, какова связь данной задачи с другими.

После того как задача поставлена, физик старается выяснить, существует ли решение и единственное ли оно? Это делается теоретически, расчетным путем. Последний во многом зависит от того, что исследователь считает возможным допустить и предположить. Иначе говоря — от выбора модели.

3. Моделирование, т. е. замена реального изучаемого объекта иной системой с четко заданным набором свойств, — весьма эффективный метод современного естествознания. Поэтому чрезвычайно важны критерии построения и совершенствования моделей изучаемых объектов, их логико-математический анализ и экспериментальная проверка [109, 114, 154, 165, 174, 175, 176]. Не всякая замена реального объекта некоторой системой есть моделирование. Как отмечается в [175, с. 19], «...под моделью понимается такая... система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна заменить его так, что ее изучение дает нам новую информацию об этом объекте». Кроме того, помимо новой информации, модель должна показать, правильны ли наши предположения о действительности. Обычно для пояснения соотношения между объектом и моделью сравнивают объект со стихотворением, положим, на русском языке; тогда модель — это его перевод. К этому можно добавить образное высказывание известного физика Я. И. Френкеля, сравнившего теорию с карикатурой. В последней в отличие от фотоконии опускаются многие детали, но подчеркиваются и утрируются наиболее характерные черты.

Специфические черты модели определяются не только специфическими чертами объекта исследования, но и спецификой задач, для решения которых модель строится. Одному и тому же объекту исследования могут отвечать разные модели. Например, одной планете Земля могут отвечать две различные модели: одна геологическая, другая астрономическая (физическая). Это положение иногда называют принципом целевой спецификацией моделей. Принято делить модели на материальные и идеальные. Идеальные — на образные и логико-математические или знаковые. Пример материальной модели — макет кристаллической, решетки, образной — геологическое описание района, знаковой — уравнение линии регрессии. В простейших случаях в геологии построение знаковой модели множества объектов исследования A сводится [40, 41, 46, 48, 50, 51] к приписыванию объектам $a \in A$ значений некоторых свойств $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$; затем к построению функции вида $\mu (\Phi_1^i, \Phi_2^i, \dots, \Phi_n^i$;

$\varphi_1^j, \varphi_2^j, \dots, \varphi_k^j$), позволяющей определить меру сходства между парами объектов $(a_i \text{ и } a_j) \in A$; и далее — к установлению некоторых связей между свойствами $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$, имеющими место на объектах $a \in A$.

В качестве множества объектов исследования можно рассматривать, например, минеральные зерна определенного вида, в качестве свойств могут фигурировать их размер и форма, плотность, химический состав и др.

Построение любой знаковой модели — не алгоритмический процесс, для него нельзя указать исчерпывающие правила, хотя возможно высказать наводящие соображения о том, как можно и как нельзя строить знаковые модели. Примером построения знаковой модели является построение аппроксимирующего полинома [3, 183]. Известно, что выбор степени такого полинома определяется эвристически. По этой причине задачу построения любой знаковой модели нельзя рассматривать как математическую. В зависимости от формального характера свойств $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ и формального вида связей между ними можно различать частные виды знаковых моделей, например детерминированные и вероятностные. В геологии их часто неправомерно противопоставляют друг другу [36, 138, 166, 167, 177, 178]. Эти виды моделей дополняют друг друга, вторые строятся на базе первых [38, 39, 40].

Для исследования знаковых моделей необходим специальный математический аппарат, свой для каждого частного вида этих моделей. Чтобы иметь возможность установить, в каких ситуациях сведения, полученные на знаковых моделях, можно переносить на объекты исследования, нужны специальные приемы проверки их пригодности и интерпретации.

Итак, модели являются целенаправленными конструкциями, причем они могут различаться по форме. Для одной и той же цели могут строиться различные модели, основанные на разных математических аппаратах, скажем, использующие аппарат статистики или же дифференциального исчисления. Встает вопрос, какую из возможных моделей предпочесть, как сравнивать их между собой? Следует предпочесть модель, более соответствующую действительности согласно некоторому критерию, причем этот критерий соответствия не должен зависеть от вида модели, но должен зависеть от цели моделирования.

Знаковая модель конкретного множества объектов в совокупности с приемами ее проверки, исследования и интерпретации может рассматриваться как теория этого множества объектов [109, 114, 151]. Проверка пригодности знаковых мо-

делей и интерпретация результатов, полученных с их помощью, также не являются алгоритмическим процессом. Для этого можно строить некоторые формальные критерии. В конечном счете эффективность знаковых моделей определяется их согласием с основными принципами и законами конкретной области знаний, а также тем, что нового они дают.

Вопрос о проверке пригодности знаковых моделей — очень тонкий теоретический вопрос. В [40, 41] отмечается, что в геологии используются в основном образные модели (коды, графики), в физике — знаковые (уравнения). В [50] показано, что взгляды физиков и геологов, применяющих математические методы, по вопросу пригодности знаковых моделей значительно расходятся. Например, в соответствии с мнением А. Б. Вистелиуса [33] можно говорить о математической модели всегда, когда удается представления выразить математически; отсюда следует, что выбор класса моделей можно проводить на основании генетических соображений, а проверку их пригодности можно свести к статистической проверке гипотез. С таким толкованием знаковых моделей нельзя согласиться. Нет смысла рассматривать такую модель, которая не дает нового. Из соображений о происхождении того или иного объекта класс знаковых моделей определить нельзя. Проверка же их пригодности, к сожалению, не так проста. Исходя из положений, намеченных в [33], следовало бы забраковать все модели математической физики, в том числе идеальной теории упругости, которые лежат в основе сейсмологии. Наконец, очень важно учитывать ограниченный характер любых моделей [173].

4. Разобрав представления о задачах и моделях, можно кратко резюмировать, что такое теория. Эта система правильно построенных высказываний, описывающих: задачу, набор различных моделей, аппарат для решения задачи, процедуру получения фактов и проверки их соответствия предсказанию, а также правила интерпретации.

Л. И. Мандельштам, касаясь вопроса о структуре физических теорий [99, с. 326, 328, 382], обращал внимание на то, что теории состоят из двух частей. Первая их часть описывает, как соотносить природные объекты с определенными величинами; вторая часть представляет уравнения (то есть собственно математику), устанавливающие соотношения между этими величинами. Л. И. Мандельштам отмечал, что установление рецептов измерения величин обычно предшествовало созданию формализма; до построения математической части теории с этими рецептами успевали сжиться. Поэтому-то их часто и не при-

числяют к составным частям теории [99, с. 383]. Иногда же формализм устанавливался ранее рецепта сопоставления выражаемой им функции природным объектам (как, например, Ψ -функция в уравнении Шрёдингера).

Сказанное о теории можно суммировать словами из статьи С. П. Божича: «Всякая естественнонаучная теория должна содержать три элемента:

- 1) описание множества выполнимых экспериментальных процедур, называемого областью приложения теории;
- 2) описание подмножества тех процедур, результат выполнения которых известен, называемого базовой областью теории;
- 3) способ предсказания результата выполнения любой процедуры из области приложения» [12, с. 248—249].

Пример геологической теории — теория процесса седиментации. Задачей в ней является установление закона распределения масс осадков различных классов при заданных условиях в области сноса и бассейне накопления; набор моделей характеризует условия дезинтеграции исходного материала, переноса и отложения. Аппарат решения — законы переноса твердых частиц определенной формы в водной среде и падения этих частиц на дно, их укладки, упаковки и последующего взаимодействия, а также законы выпадения растворенных веществ в осадок.

Теперь можно заметить, что из систем высказываний, называемых в геологии теоретическими, большая часть пока не отвечает критерию истинности, так как они в основном лишь удовлетворительно объясняют известные факты, редко предсказывая новые. Но «...если теория лишь доказывает неизбежность того, что уже свершилось и известно, то она не построена правильно и не должна считаться ни истинной (подтвержденной), ни ложной (опровергнутой)» [12, с. 248].

5. Обратимся к сопоставлению общих представлений геологов и физиков о теоретической научной работе. Выше говорилось о том, что, с точки зрения многих геологов, работа может считаться теоретической, если она посвящена описанию, генетическим проблемам и содержит генетические выводы. Считается, что только знание генезиса геологического объекта позволяет получить достоверные сведения и прогнозы о нем [20, 21]. С точки зрения физика работа считается теоретической, если она опирается на модель, удовлетворяющую некоторым требованиям, не противоречит основным законам физики, не содержит формально-логических ошибок, позволяет полу-

чать новые экспериментально проверяемые следствия и пр. Эти две точки зрения существенно различаются. В соответствии с первой все определяется направлением научной работы, в соответствии со второй — способом рассуждений, используемых в работе.

6. Рассмотрим общие представления геологов и физиков об основных этапах научной работы. Опираясь на [15, 19, 69, 95, 124, 148, 187, 188], можно считать, что научная работа, грубо, может быть разбита на несколько этапов и стадий (схема 4). При рассмотрении этой схемы условимся принимать во внимание только те ее элементы, которые отражаются в научных работах геологов и физиков.

Определение используемых понятий — очень важная для физика-теоретика стадия научной работы, которой он уделяет большое внимание, руководствуясь формальными и операционными требованиями [41]. В геологических исследованиях этому пока не уделяется должного места.* Недостаточное внимание к определению и уточнению используемых понятий (в отличие от частых споров терминологического характера) — давняя традиция геологических научных работ. Она, как видно, например, из [13, 18, 24, 38, 39, 53, 54, 66, 71, 72, 76 и др.], поддерживается даже теми геологами, которые в своей работе применяют математические методы.

Анализ возможных постановок задач, вопросов существования и единственности их решения, а также использования решений является одним из центральных для физиков-теоретиков. В геологических же научных работах такого анализа, как правило, не бывает [40].

Построение гипотезы, дающей решение задачи, физик-теоретик проводит на базе знаковой модели через средство математической постановки задачи, геолог — с помощью образной модели на основании правдоподобных рассуждений.

При проверке полученного решения физик-теоретик в первую очередь опирается на основные принципы и законы, а затем уже на экспериментальные данные. Геолог при этом опирается в первую очередь на генетические представления, а затем на данные наблюдений. Как правило, спорные генетические представления оказываются малодостоверными, но именно по ним проверяется решение [41, 49, 62].

* Имеется в виду действительное уточнение понятий, а не часто встречаемая перефразировка их формулировок, кажущаяся автору более ясной.

Этапы	Стадии
Общая постановка задачи	<ol style="list-style-type: none"> 1. Общее знакомство с проблемой, указание, цели 2. Определение используемых понятий 3. Сбор и анализ данных, оценка их точности 4. Анализ различных возможных общих постановок задач с точки зрения существования и единственности их решения и его использования; уточнение цели
Построение конструкций для решения задачи	<ol style="list-style-type: none"> 1. Формулировка априорных предположений и построение знаковой модели для математической постановки задачи 2. Математическая постановка задачи
Решение задачи	<ol style="list-style-type: none"> 1. Построение алгоритма решения математической задачи 2. Получение решения математической задачи (обработка данных)
Интерпретация решения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проверка полученного решения в соответствии с известными принципами и законами и экспериментальными данными 2. Определение области применимости и точности полученного решения. Перспектива использования в практических и теоретических целях

С точки зрения физика-теоретика определение области применимости, точности и перспектив использования полученного решения — этап обязательный. В геологических работах, как правило, обсуждаются только перспективы использования полученного решения [28—34], и для геолога важно не то, как получено решение, а то, как его можно использовать.

7. Обращаясь к общим критериям оценки научных теоретических работ в геологии и физике, можно выяснить, что в геологии оценка научных работ проводится с позиции что и сколько сделано, в физике же — что и как сделано.

На первый взгляд способы оценки теоретических работ в геологии, в первую очередь опирающиеся на практическую полезность результатов, не таят в себе чего-либо опасного. В действительности же они убийственны для развития теории геологии, ибо декларирование примеров успешного практического применения какой-либо системы высказываний, выдаваемых за теорию, учение и т. д. без формально-логического обоснования, оправдывает загромождение науки малоплодотворными, а то и спекулятивными построениями.

Образно это можно пояснить так: теории подобны людям — они рождаются, растут, достигают периода расцвета и умирают, порождая новые. Нельзя различить младенцев по той пользе, которую они приносят. Здесь нужны иные критерии, например здоровье. Так и только что возникшую теорию нельзя оценивать с точки зрения полезности, нужны другие критерии, например формальное совершенство.

8. Было бы, однако, неверным считать, что критерий «как сделано» совершенно не учитывается в геологических работах. Это, конечно, не так. Но все же критерием, так сказать, «добропорядочности» теоретической геологической работы для большинства случаев является ее приложение. Геологи нередко отказываются обсуждать в теоретическом плане способы решения геологических задач, если это обсуждение зиждется только на логическом выводе и не сопровождается примером применения абстрактной схемы на эмпирическом материале. Иначе говоря, в геологии отсутствует разделение на теоретическую и прикладную сферу. Отрицательное значение такого подхода, процветающего и во многих других естественных науках, в частности биологии и географии, отмечено в статьях [98, 162]. Можно сказать, что в основной своей массе геологи по стилю мышления пока являются эмпириками-материалистами, недооценивающими значение абстрактных построений, хотя только последние могут приблизить нас к познанию существенного и закономерного в явлениях [86, с. 605]. Требование не только дать хорошую теоретическую конструкцию, но и подтвердить ее на «собственном» эмпирическом материале в сочетании с рядом других причин приводит к смещению интересов геологов в сторону сбора фактов с последующей поверхностной интерпретацией на базе нечетких теоретических предположений. «Работа с конкретным материалом» в науках, подобных геологии, ценится намного больше, чем исследование абстракций, хотя последнее зачастую требует гораздо больше времени и большего напряжения исследовательских сил. Для геолога во многих случаях доказать существование закономерности означает дать

ей удовлетворительное генетическое объяснение, подтвержденное примерами. Однако примеры приложения теории или гипотезы могут служить лишь иллюстрациями их существования и эффективности, что полезно для исследования особенностей теории. Но примеры не могут быть использованы для доказательства ее совершенства или истинности.

Анализируя общую схему научной работы (см. схему 4), нетрудно согласиться с тем, что один и тот же исследователь справится со всеми стадиями, лишь когда он имеет дело с очень простыми задачами. В мало-мальски сложных и нетривиальных ситуациях без помощников-специалистов не обойтись. Как ни странно, в геологии до сих пор существует только специализация по объектам и экспериментальным методам, т. е. по вертикальным столбцам схемы: есть специалисты в области сейсмологии, литологии, палеонтологии и т. д., но нет специалистов по горизонтальным столбцам — методологов, теоретиков, экспериментаторов. Считается, что специфика разделов геологии настолько различна, что постановка задач, скажем, в литологии и стратиграфии, в сейсмологии и геотермике должна осуществляться только самими литологами, стратиграфами и т. д. Но именно это и приводит к низкому уровню исполнения отдельных стадий исследовательской работы.

Выводы. Представления о задачах, моделях и теориях в геологии заметно отличаются от аналогичных представлений точных наук. В геологии задачи часто ставятся весьма широко, что обуславливает расплывчатость или неверность решений; очень часто результатом научной работы в геологии считаются не решения проблем, а протоколы наблюдений, так сказать, заготовка сырья для решения каких-то, иногда даже не сформулированных проблем. Применяются в основном образные, а не знаковые модели. Теоретической работой в геологии обычно считаются генетические построения, т. е. предмодельные, а не модельные представления. Выдвижение гипотез в геологии осуществляется не на базе знаковой модели посредством математической постановки задачи, а с помощью образной модели и правдоподобных рассуждений. Проверка полученных решений в геологии опирается не столько на принципы и законы, сколько опять же на генетические представления. Оценка научных работ в геологии проводится с позиции «что и сколько сделано», а не по критерию формального совершенства, что существенно тормозит развитие теоретических работ.

Все это можно подытожить так: в геологии отсутствует разделение на теоретическую и практическую части, и это снижает качество той и другой.

§ 6. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГИИ

1. Попытаемся выяснить, чем обусловлено то, что до настоящего времени с помощью математических методов не удалось безупречно до конца решить и даже поставить какую-либо из основных геологических задач.

2. Все важные геологические задачи описаны давно. Они трактовались, как правило, исходя из желаемого, без должного учета возможностей, в первую очередь экспериментальных; например, в задаче подсчета запасов нужно подсчитать запас с некоторой заранее фиксированной точностью [93, 103, 108]. Но позволяют ли экспериментальные возможности действительно получить такие оценки? Ведь может оказаться, что они не дают такой возможности. Тогда на первых этапах следовало бы ограничиться меньшим. Например, в задаче подсчета запасов ограничиться получением надежной оценки лишь снизу [37]. Для получения строгих результатов мы должны, как следует из схемы 4, во всех случаях принять некоторые априорные предположения и математически сформулировать нашу задачу. Например, в задаче подсчета запасов принять, что плотность запасов месторождений определенного класса является такой функцией координат, частные производные которой ограничены некоторой константой, и сформулировать задачу как оценку тройного интеграла от упомянутой функции при условии, что известны значения этой функции в некоторых точках.

Чтобы убедиться в реальности общей постановки той или иной принципиально важной геологической задачи и получить ее математическую постановку, а также для того, чтобы суметь проинтерпретировать полученные результаты, нужны общие исходные теоретические представления, удовлетворяющие определенным формальным требованиям. Если таких представлений нет, необходимо либо построить их, либо отказаться от попытки привлечения математических методов для решения рассматриваемой задачи. Таким образом, оказывается, что для решения геологических задач с помощью математических методов недостаточно иметь экспериментальные данные, ЭВМ и генетические гипотезы. Необходимы еще некоторые общие теоретические представления, удовлетворяющие определенным формальным требованиям. Это утверждение остается в силе для любой конкретной геологической задачи.

3. Тот факт, что возможности применения математики для решения конкретных задач полностью определяются формаль-

ным совершенством теоретических представлений, давно и хорошо осознан в физике [15], осознается сейчас в экономике [184] и биологии [151]. Его можно проиллюстрировать таким примером. Как известно, сейчас нет достаточно совершенных с формальных позиций теоретических представлений о сухом трении. Есть некоторые генетические представления о механизме сухого трения: предполагается, что оно обусловлено неровностями трущихся поверхностей и молекулярными силами взаимодействия; известны некоторые приближенные формулы, установленные эмпирически; имеется огромное число экспериментальных данных [52] и, конечно, есть возможность привлечь математический аппарат и ЭВМ. Казалось бы, можно действовать, как это рекомендуется в [33]: из генетических соображений предположить, что сухое трение обусловлено действием многих случайных факторов, и попытаться с помощью соответствующего теоретико-вероятностного аппарата и ЭВМ, опираясь на имеющиеся эмпирические формулы и экспериментальные данные, получить фундаментальные результаты. Однако заранее известно, что такой подход к решению задач, связанных с сухим трением, обречен на неудачу (разумеется, этого нельзя сказать, положим, о задаче оценки качества экспериментальных данных по сухому трению, т. е. определения коэффициентов трения в зависимости от фактов, что составляет важный, но лишь предварительный этап в решении задач сухого трения).

Именно по этой причине физики говорят: при решении физических задач нельзя обойтись без математических методов и ЭВМ, но в отсутствие подходящей физической теории никакие математические методы и ЭВМ сами по себе не могут дать эффективных результатов.

Хорошей иллюстрацией к сказанному служит задача определения степени аппроксимирующего полинома, о чем уже упоминалось. Следует отметить, что вопрос о соотношении и взаимосвязи формального и содержательного подходов в естествознании вообще плохо разработан [49, 57, 85]. Существует точка зрения, в соответствии с которой задача содержательной теории — как можно больше переложить на плечи математики. Например, степень полинома выбирается теоретиком, а его коэффициенты — математиком. Желательно же, чтобы теоретик выбрал лишь общий характер поведения функции, а математик — и степень, и коэффициент полинома. Разумеется, в нетривиальных случаях полностью на математические основы задачу перевести нельзя. Многие считают, что, когда удастся математически поставить задачу, можно считать, что сделано

более половины. Это тем более верно, если учесть возможности современных ЭВМ. В связи со сказанным понятно, почему говорят, что нет ничего практичнее хорошей теории.

4. Могут ли современные теоретические представления геологии быть использованы в качестве основы для математической постановки конкретных геологических задач? Относительно состояния этих представлений сейчас также существует оптимистическая и пессимистическая точки зрения. Наиболее отчетливо пессимистическая точка зрения по этим вопросам была сформулирована известным английским философом Дж. Берналом в работе «Наука в истории общества» [6]. На основе логического анализа основных положений геологии он пришел к выводу, что теоретические представления геологии не содержат каких-либо самостоятельных конструкций и что геология является скорее «графией», чем «логией».

В ответ на эту работу в советской литературе появились статьи [88, 125, 168], где утверждалась оптимистическая точка зрения на этот вопрос. В частности, оптимистическая точка зрения на современное состояние теоретической геологии Г. Л. Поспелова [125] базируется на представлении о «геологической форме движения материи» и на практических успехах геологии по добыче полезных ископаемых. Сейчас о «геологической форме движения» говорят нечасто, во всяком случае, это вопрос философский. Что же касается практических успехов геологии, то их затруднительно измерить.

Для оценки практических успехов существующей геологии надо иметь возможность сравнить ее результаты с результатами другой геологии. То есть об этом можно было бы говорить, если над решениями одних и тех же задач на равных правах и с равными возможностями, соревнуясь, трудились бы, скажем, «традиционная» и «математическая» геологии. Тогда наши суждения об успехах той или иной геологии могли бы считаться объективными. Но геология пока что одна, и ее успехи подобны успеху спортсмена, занявшего первое место на соревнованиях из-за отсутствия соперников.

И все-таки оценку Дж. Бернала действительно следует признать недостаточно обоснованной, в первую очередь потому, что она не учитывает перспектив развития геологии. Поясним это. Одни и те же авторы, оценивая современное состояние теоретических представлений геологии, иногда дают хорошую, а иногда плохую оценку. Такое противоречие наблюдается, например, в двух статьях В. В. Белоусова: «О современном состоянии теоретической геологии» [4] и «О путях развития теоретической геологии» [5]. В первой работе, написанной в 1953 г., говорится о том, что современные теоретические

представления геологии не отвечают необходимым требованиям; во второй же статье, написанной в 1963 г., утверждается, что эти представления достаточно хороши. Такая перемена взглядов свидетельствует о том, что оценка теоретических представлений геологии — вопрос спорный, который нельзя решить, если предварительно не договориться о критериях.

Условимся ввести оценку современного состояния теоретических представлений геологии по трем критериям: по системам геологических понятий, геологическому языку и геологическим классификациям. Естественно, ко всем критериям следует подходить с формальных позиций, ибо они интересуют нас в первую очередь с точки зрения математической постановки геологических задач.

5. А. Эйнштейн отмечал, что научные понятия призваны служить нам путеводной звездой в ошеломляющем хаосе восприятий и инструментом извлечения общих истин из отдельных наблюдений. Очень хорошо определил роль понятий основоположник современной кристаллографии Е.С. Федоров [157, с. 2]: «Всякое строгое научное изучение предметов требует, прежде всего, совершенно строгого определения основных понятий».

6. Как показано в [41, 53, 84, 89—91, 118, 120], существующие сейчас системы понятий геологии различны у различных школ специалистов и не удовлетворяют необходимым требованиям классической формальной логики [82]. Исторически сложившаяся особенность геологических понятий заключается в том, что они строились на основе наглядных представлений и самоочевидности. Они позволяют геологу рассказать, что его занимает и что он по этому поводу думает; они работают в области непосредственного познания. Но они не позволяют строить доказательные рассуждения.

Очень часто геологи не желают углубляться в уточнение применяемых понятий, например таких, как «минерал», «порода», именно потому, что все и так считается всем совершенно понятным. Но при этом обыденная, привычно чувственная самоочевидность смешивается с научной истиной, что, как отметил М. Бунге, далеко не одно и то же! «Обычно самоочевидность, — писал он, — признак привычки, следовательно, она должна вызывать тревогу (в вопросах науки. — Авт.), так как мы не склонны подвергать сомнению или анализировать то, к чему привыкли, что довольно опасно» [22, с. 39—40].

Поясним это соображение таким примером. Положим, нам необходимо сформулировать понятие о выпуклых телах. Геологический подход дает следующее. Выпуклые тела — это

тела, не имеющие вмятин; двигаясь по таким телам, мы плавно поднимаемся или опускаемся. Примерами выпуклых тел являются куриное яйцо, большинство галек. Физико-математический подход дает иное определение: тело называется выпуклым, если линия, соединяющая две любые его точки, целиком находится внутри тела. Легко видеть, что для образных сравнений предпочтительней первый подход, а для доказательных рассуждений — второй.

7. Заметим, что возможность объяснения всегда в той или иной мере гарантируется естественным языком, слова которого составляют львиную долю геологического научного языка, обладающего неопределенной семантикой [18, 38-39, 91, 118]. Но дело в том, что взаимопонимание — не самое главное в науке. Важно доказывать, а не объяснять. Геологический же язык в очень малой степени обладает доказательной и информационной функциями, ибо опирается на неоднозначные в строгом смысле слова. Может быть, именно поэтому геологи всегда предпочитают своими глазами увидеть интересующий объект, явление, что опять же не избавляет от недоразумений.

На этих вопросах приходится останавливаться снова и снова, так как одновременно с высказываниями, свидетельствующими о полном понимании проблем формализации и развития геологического научного языка на разных уровнях [118], даже в наших ведущих геологических журналах все еще появляются высказывания о достаточности «самоочевидности», о нецелесообразности стремления к формализации понятий, которая-де «делает понятное непонятым» или в крайнем случае «надуманным» и «трудно воспринимаемым». Высказывания эти, как видно из [24], скорее всего, имеют чисто субъективные корни. Замечалось, что понятия «минерал» и «порода» обычно «совершенно ясны» для студентов I—III курсов, но теряют эту «ясность» при дальнейшем увеличении багажа знаний. Необходимо избегать не множественности понятий, которая действительно является показателем разносторонности, как это и отмечено в [24, с. 6], а их неопределенности.

Отметим, что право на пользование неясными, плохо определенными понятиями, несомненно, есть у любой науки [173]. Однако право иметь такие понятия является прерогативой только новых отраслей знания. Нечеткими понятиями приходится пользоваться для выражения новых представлений, новых идей, для предварительного формулирования нарождающихся гипотез, при попытке поставить какую-то задачу. В этом аспекте понятие играет роль гипотезы, но наука не может пользоваться только неясными понятиями.

Естественно, тем, кто привык к традиционному геологическому языку и операциям на уровне правдоподобных рассуждений, на первых порах трудно воспринимать и оценивать новые уточненные трактовки понятий, символику. Это, по сути, то же самое, что научиться мыслить на чужом языке. Однако пройти через это необходимо, ибо (повторим то, что сказано в § 2) излюбленное высказывание скептиков о том, что математика, как жернова, перемалывает все, что в нее вводят, относится к любому аппарату, перерабатывающему информацию, в том числе и к нашему мозгу.

Насколько угрожающим [является положение с геологическим языком, отлично видно, в частности, из статьи А. М. Боровикова «О фактическом состоянии тектонической терминологии» [17]* и статьи А. П. Васильевой «О нарушении литературных норм в языке и стиле геологических текстов» [25]. Терминологическая перегруженность геологии обусловлена, во-первых, как сказано, современным состоянием геологических понятий, во-вторых, ошибочностью используемых в геологии представлений о соотношении между понятиями и термином [41, 401]. В геологии требуется, чтобы термин «строго выражал сущность данного понятия», «отражал» понятие [94, 401]. С учетом же необходимой краткости терминов и расплывчатости сущности геологических понятий такие требования оказываются практически невыполнимыми. Необходимо рассматривать термин лишь как символ, сопоставляемый понятию [41].

О современных требованиях, предъявляемых к научному языку, хорошо говорится в работе В. А. Успенского [155], а также в [77].

8. Как неоднократно отмечалось [41, 120], используемые классификации геологических объектов исследования, различные у различных школ исследователей, с формальных позиций совершенно неудовлетворительны. В [42—45, 60, 76] выявлены и проанализированы часто встречающиеся логические ошибки классификаций в структурной геологии, тектонике, петрографии, литологии и нефтяной геологии [41, с. 73—75].

Выводы. Применение ММ при решении научной задачи возможно при условии, что содержательные исходные теоретические представления удовлетворяют формальным требованиям. Геология же пока не располагает такими содержательными теориями.

* Нельзя согласиться с критическими замечаниями А. В. Бухникашвили [24, с. 6] по поводу экстраполяции кривой роста количества терминов за несколько лет [17]. Любую экстраполяцию можно оспаривать, но не таким декларативным способом, как сделал А. В. Бухникашвили.

Совершенствование теоретических представлений геологии требует в первую очередь совершенствования геологических понятий, ее научного языка. Теоретические представления геологии в их современном состоянии не могут служить основой для внедрения математических методов.

§ 7. КЛАССЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

1. Чтобы наметить пути эффективного применения математических методов в геологии, необходимо основываться на истории предшествующих геологических исследований, связанных с применением математики, и выяснить, какие классы геологических задач в настоящее время решаются с помощью математических методов, а также как это делается. Поскольку история применения математики в геологии неоднократно рассматривалась [33, 71, 93, 103, 108], не будем на ней останавливаться. Обратимся к выделению и рассмотрению интересных для нас классов геологических задач.

Вопрос о классификации задач геологии, решаемых с помощью математических методов, очень важен, сложен и плохо разработан. Специалисты опираются на различные классификации и используют различные термины, в чем можно убедиться, если сравнить работы [33, 93, 103, 108]. Например, в [33] выделяются задачи: стохастического моделирования, построения моделей-откликов, использования статистики в описательных целях, факторного анализа, дискриминантного анализа, последовательного анализа и тренд-анализа, а в [108] — задачи определения функций распределения и оценки их параметров, корреляционно-регрессионного анализа, дисперсионного анализа, многомерного анализа и тренд-анализа. Часто [см. 33] трудно понять, какие соображения положены в основу выделения классов задач; не менее часто, как, например, в [108], используются такие подходы к классификации, которые опираются только на традиции математической статистики, учитывают несущественные для поставленных нами целей формальные детали. В некоторые задачи вкладывается несколько различных смыслов, например в задачи дисперсионного и факторного анализов [33, 108]. Наконец, формулировки многих задач далеки от должной четкости. Так, в [108] говорится: «Под трендом имеется в виду любая закономерность в упорядоченной последовательности чисел или элементов. Любая упорядоченная последовательность чисел или элементов, от-

личающаяся от случайной, будет рассматриваться как имеющая тренд». На основе такого определения трудно понять, что же представляет собой задача тренд-анализа.

2. Можно увидеть, что в упомянутых работах рассматриваются не столько геологические задачи, сколько их математическая интерпретация. Тем самым совершается подмена классифицируемого множества. Образно говоря, происходит то же самое, как если бы при необходимости классифицировать, скажем, людей, расклассифицировали бы их по профессиям. Нетрудно допустить, что подобная операция вообще может оказаться плодотворной. Могла бы выявиться, например, корреляция профессий с телосложением или характерами. Однако в данном случае имеется в виду другое, а именно то, что одной и той же геологической задаче можно давать различные — более удачные и менее удачные — математические интерпретации.

Для ММ важен выбор подходящей математической интерпретации, а для этого надо попытаться расклассифицировать именно геологические задачи, так как удачность математической интерпретации определяется в первую очередь содержательными соображениями. Для наших целей удобно подразделить геологические задачи на три класса по степени сложности: элементарные, простые и сложные (имея в виду, как было условлено ранее, только задачи статической геологии).

При геологических исследованиях приходится иметь дело с точками в пространстве признаков и с точками в геологическом пространстве, а также с множествами точек в признаковом и геологическом пространствах. Последнему виду множеств отвечают геологические тела.

С этими заданными объектами — точками и множествами точек — проделываются элементарные операции: устанавливаются между точками расстояния и меры сходства (классифицирование), меры связи между свойствами; выделяются подмножества точек и описываются; вводятся отношения, а затем образы и группы.

На основе этих элементарных операций проводятся простые (выводные) операции: распознавание, заключающееся в диагностике (простом и сложном), интерполяция, экстраполяция и прогноз [50, с. 25]: кроме распознавания, возникает задача группирования объектов.

Вслед за решением простых появляется возможность решать сложные задачи. Например, задачи поиска геологических объектов с заранее фиксированными свойствами. Поясним предложенную классификацию геологических задач схемой 5.

Логические типы геологических задач

Объекты Классы задач	Множества точек	
	в пространстве признаков < $f_1^k, f_2^k, \dots, f_n^k$ >	в геологическом пространстве < $x^k, y^k, z^k; f_1^k, f_2^k, \dots, f_n^k$ >
Элементарные	—	Введение расстояний между точками и множествами точек
	Введение мер сходства между точками и множествами точек	Введение мер сходства между точками и множествами точек
	Введение мер связи между свойствами и совокупностями свойств	Введение мер связи между свойствами и совокупностями свойств
	Выделение множеств точек (областей)	Выделение множеств точек (тел)
	Описание множеств точек (областей)	Описание множеств точек (тел)
	—	Введение отношений между множествами точек (телами)
	Введение образцов и групп для множеств точек (областей)	Введение образцов и групп для множеств точек (тел)
Простые	—	Распознавание (диагноз, интерполяция, прогноз...)
	—	Группирование (конструирование объектов с заданными свойствами, районирование...)
Сложные	—	Поиск множеств точек (тел) с фиксированными свойствами
	—	Предсказание поведения множества точек (тел) в физическом времени

3. Будем считать, что нам заданы как описания точки в геологическом и признаковом пространствах. Точка в признаковом пространстве описывается списком значений свойств $(f_1^k, f_2^k, \dots, f_n^k)$, к которому для описания точки в геологическом пространстве добавляются координаты точки $(x^k, y^k, z^k; f_1^k, f_2^k, \dots, f_n^k)$. Множеством точек в геологическом пространстве задаются геологические тела, а в признаковом пространстве — области. После того как точки и множества точек заданы, можно решить элементарные задачи, которые обуславливают одна другую в следующем порядке:

а) *введение расстояния* (в геометрическом смысле) между точками и геологическими телами необходимо при решении многих задач. Эти расстояния могут вводиться указанием формул, согласно которым измеряются интервалы между условными центрами тел, их границами или характерными точками;

б) *введение мер сходства* между объектами (или совокупностями объектов) производится при их сопоставлении. Обычно при геологическом подходе эта мера вводится интуитивно. В [46] задача введения мер сходства аналитическим способом рассмотрена достаточно подробно с модельным примером парного сравнения аналитического описания четырех стратиграфических колонок;

в) *введение мер связи* между свойствами (или совокупностями свойств) производится тогда, когда хотят по одному из них определить другое; когда из многих свойств выбирают совокупность, наилучшую для решения задач (получение оптимального описания). Примером введения меры связи может служить определение коэффициента корреляции, характеризующего связь между двумя случайными величинами. С такими задачами приходится иметь дело при определении количества одного элемента через количество другого, скажем, содержания фосфора по естественной или наведенной радиоактивности образца. Аналогично при определении связи между величинами применяется критерий независимости Пирсона $P(\chi^2)$;

г) *выделение геологических тел* — геологическое районирование осуществляется, пожалуй, на всех уровнях геологической работы. Выделение тел в геологическом пространстве заключается в проведении границ некоторых областей, обладающих заранее заданными характеристиками (однородностью, определенной степенью связи или сходства между элементами, и т. д.). Оно может опираться на расстояния между точками, а также на меры сходства и связи. Так выделяются минералы,

пласты, пачки, свиты, формации, массивы, структурные области и т. п.;

д) *описание выделенных тел* или компонент связности (в пространстве признаков) является операцией, следующей за их выделением. Описание может быть графическим (частый случай в геологии) и аналитическим, элементарным и сложным. В [46] показано, что аналитическое описание геологических тел сводится к заданию таких характеристик, как форма, ориентация, вещественный состав, структура, вещественная ассоциация, граница и относительный возраст;

е) *выделение отношений между телами* или компонентами связности является почти всегда необходимым элементом геологической работы, заключающимся в определении взаиморасположения тел, их соседства, пересечения и наложения. Так, в стратиграфическом разрезе обычно вводятся отношения «залегает над, под», «залегает выше, ниже», «переходит по простиранью»; в других случаях, например при изучении взаимоотношений магматических образований с вмещающими, вводятся отношения «пересекает» (для жил), «включает» (для ксенолитов, шпиров), «накладывается» и т. д.

Более сложный вид отношений между геологическими телами, установленный на основании введения мер связи, — это парагенезис, формально представленный в [50]. Такие отношения могут определяться в признаковом пространстве объектов как парагенезисы или же, в геологическом пространстве, как парагенетические совокупности (минералов, слоев и т. д.);

ж) на основании решения предыдущих задач возможно *введение образов и групп*. Образ — это класс, организованный на свойствах, присущих самим объектам. Группа — множество объектов, то есть класс, организованный на свойствах, измеряемых на множестве объектов.

Примерами решения задач по введению образов и групп являются работы по фациальному и формационному анализу, в результате которых выделяются группы элементарных геологических тел, обладающие единым, заранее заданным свойством. Последнее может быть выражено в генетических терминах (для сложных геологических тел, именуемых *фациями*) и в вещественных (для сложных геологических тел, именуемых *формациями*). Формальные процедуры введения образов, отвечающих телам (в признаковом пространстве), и тел (в геологическом пространстве) изложены в [50].

Очевидно, что выполнение даже элементарных задач возможно лишь в определенном порядке, так как наличие решений по одним определяет возможность решения других. Спо-

собы проверки полученных решений элементарных задач заключаются главным образом в приложении этих решений к каким-то другим задачам, на основании чего удастся достичь некоторых заранее оговоренных результатов. Например, выбор расстояния может оцениваться с точки зрения возможностей эксплуатации пласта как единой рудной залежи. Введение мер сходства может быть оценено с позиции классифицирования каких-то объектов и т. д. Общий характер решений элементарных задач таков, что допускается множественность решений в зависимости от принятых предположений.

Простые задачи целиком определяются данными решения элементарных. Поясним подробнее простые задачи, объединенные под названием «распознавание».

Д и а г н о з п р о с т о й. Состоит в определении одних свойств $У$, присущих объекту в момент T , через другие свойства X , присущие этому же объекту в тот же момент T . Например, определение степени водоносности слоя по данным о его электрическом потенциале и сопротивлении; определение способности пласта к нефтеотдаче по данным о структуре породы и составе минеральных компонентов.

Д и а г н о з с л о ж н ы й — определение одних свойств $У$, присущих всему объекту в фиксированный момент T , через другие свойства X , присущие частям данного объекта в тот же момент T . Сложный диагноз производится, например, при фациальном анализе, когда по свойствам отдельных частей сложного геологического тела определяются условия и обстановка образования всего сложного тела, скажем, по включениям палеонтологических остатков, минералам, конкреционным стяжениям и т. д. определяются некоторые геохимические свойства всего слоя.

Примеры интерполяции и экстраполяции можно почерпнуть из практики составления геологических и структурных карт, профилей, диаграмм распределения какого-либо свойства отложений по разрезу и т. п.

Решение сложных задач осуществляется многократным повторением элементарных и простых процедур в различных комбинациях. Таковы задачи поиска полезных ископаемых, а также предсказания быстропротекающих геологических явлений с фиксацией времени: селевые потоки и оползни, землетрясения, изменения конфигурации земной поверхности и геологической структуры, возникновения новых геологических объектов (напоров, жил, трещин) и т. д.

4. Ниже перечислены задачи, для которых разработаны процедуры применения математических методов. В работе [14]

приведены 6 основных задач, охватывающих значительную часть деятельности геологов: 1) описание геологических объектов; 2) сравнение объектов; 3) изучение зависимости между характеристиками объектов; 4) определение родства объектов; 5) расчленение объектов (разрезов); 6) определение характеристик

Дж. Гриффитс [61] различает такие задачи изучения осадочных пород: а) измерение основных свойств объектов (состав элементов и их размеры, форма, ориентировка, упаковка); б) определение классов элементов; в) измерение производных свойств (плотности, проницаемости и др.), т. е. свойств, измеряемых на «коллективах» элементов. Все подобные задачи приведены в схеме 5. Задача описания является как бы нулевой подзадачей для всех остальных. В расширенном толковании ее можно рассматривать как первые пять элементарных задач. Другая подзадача — разделение «фоновых» и «аномальных» значений — отвечает задаче введения расстояний и мер сходства, также как и задачи сравнения, а изучение зависимостей — к введению мер связи. Задачи по определению «родства» парагенезиса объектов тоже сводятся к определению мер сходства и мер связи в зависимости от того, как принято «родство» по определению. Задача расчленения разрезов является задачей выделения геологических тел с последующим группированием их. Перечисленные классы задач охватывают основные процедуры, применяющиеся и требующиеся в геологии.

5. Разумеется, элементарные, простые и сложные классы задач тесно взаимосвязаны. Любой природный элемент можно рассматривать как сложную совокупность, и тогда элементарные задачи, производимые с ним, превращаются в более сложные. Процедуры районирования и поиска можно производить по одной и той же схеме как в крупном районе, оперируя подрайонами (пачками, массивами и т. п.), так и в пределах одного слоя, оперируя минеральными ассоциациями. Все зависит от того, что принять за элемент.

Надо сказать, однако, что во всех случаях элементарные и простые процедуры не представляют самостоятельного интереса.

Расчленение геологического пространства, описание выделенных тел, определения мер сходства и связи между ними, введение образов и групп и т. д. не имеют независимых оценок. Их можно решить «правильно», т. е. опираясь на заданные правила. Объективная же оценка решения элементарных и простых задач возможна лишь после того, как они включены в процедуру решения сложных задач, ответы на которые есть возможность проверять и оценивать исходя из заранее задан-

ных критериев. С этим положением геологи сталкиваются очень часто, пытаясь применить решения элементарных задач, найденные другими, к своим целям или же пытаясь обосновать ценность собственных решений элементарных задач.

Точно в таком же положении находятся и ответы на задачи второй группы — простые, — а именно: задачи распознавания и группирования. Решение, скажем, по отнесению некоторой толщи именно к классу молассовой или офиолитовой формации, а не к какому-либо иному, станет возможным оценить только тогда, когда это решение будет включено в условие некоторой сложной задачи. Другим примером может быть объединение геологических тел в единую структурно-формационную зону или какую-либо иную ассоциацию. Такое объединение тоже можно оценить только с позиции его дальнейшего использования. В геологии же обычно пытаются оценить подобные решения безотносительно к возможности использования, что, по сути дела, выливается не в оценивание, а в рекламирование.

Не случайно среди геологов при оценке работ, касающихся элементарных и простых задач, широко употребляются столь растяжимые эпитеты, как «интересная», «оригинальная», «дающая новый подход к пониманию...», «по новому описывающая...» (скажем, более детально) и т. п. Большое значение в подобной субъективной оценке приобретает личность решающего задачу. Такая оценка решений приводит, с одной стороны, к дезориентации слишком доверчивых «потребителей» решений, с другой — способствует быстрому накоплению безликих решений, которые не известно как оценить. Их пытаются каталогизировать, систематизировать, выражают надежду на их будущее. Не будет преувеличением сказать, что в геологии возникла насущная потребность в специальности своего рода «товароведов», которые бы оценивали решения элементарных и простых задач. Считается, что в лице такого специалиста может выступать сам «потребитель». Это невозможно даже при приобретении бытовых товаров. Поэтому важнейшим условием осмысливания геологических результатов должен стать подход, оценивающий решение не исходя из того «что получено», а по тому «как получено». Однако для элементарных и простых задач оба принципа недостаточны, здесь требуется еще узнать, что будет получено при решении сложной задачи, использующей эти выводы.

6. Исходя из сказанного, можно заключить, что подлинно научными задачами в современном понимании науки являются только сложные задачи. Авторы допускают, что такое утверждение при существующем в геологии положении дел, возможно,

является слишком строгим. По способам же решения элементарных и простых задач науки методологически не различаются: везде приходится применять одну и ту же логическую схему. Введение расстояний, мер сходства и связи, описание тел, введение образов, группирование и т. д. методологически одинаковы и в геологии, и в географии, и в физике.

Поэтому надо сказать, что при современном методологическом подходе важнейшая часть геологии начинается с постановки сложных задач. По-видимому, настало время перейти на эту точку зрения.

7. Несколько слов о постановке сложных задач. Это важнейшая и наименее разработанная в геологии область, несмотря на то, что о ней очень много пишется, например о задаче поиска. По сути дела, к задаче поиска можно свести и многие задачи историко-генетической геологии, которые представляют собой не что иное, как поиск объектов, имеющих высокую меру сходства с объектами, генезис или историческая роль которых считаются тем или иным способом фиксированными.

Литература по теории поиска фактически представляет собой громоздкий и довольно сбивчиво систематизированный перечень в различной мере свернутых описаний прецедентов поиска. Систематизация здесь осуществляется в основном по видам объектов поиска и лишь в незначительной степени — по характеру задач. Однако именно последнее и определяет многие особенности подходов. Например, надо различать задачи поиска крупных и задачи поиска мелких месторождений. В первых весьма различаются подзадачи поиска крупных ординарных и крупных уникальных месторождений. Ординарные можно искать в районах, сходных с известными промышленными участками, уникальные — на участках резко отличающихся от всех прочих.

8. Рассматривая геологические задачи по разобранной схеме, можно заметить, что ММ сейчас применяются исключительно для решения элементарных и простых задач. В первую очередь это касается методов математической статистики, которая помогает компактно представлять совокупности протоколов наблюдений и измерений, оценивать погрешности, устанавливать необходимое число наблюдений по заданным требованиям к ответу, определять меры сходства и связи, определять вероятности решений, восполнять недостаток точных данных [14, 61, 93, 107, 169, 179 и др.]. Но для решения сложных задач ММ фактически еще не применялись.

Задачи исторической геологии являются задачами построения исторических знаковых моделей геологических тел. Эти

задачи встречаются в литературе под названиями: построения генетических теорий или генетических моделей [87, 111], определения процессов образования геологических объектов [180], стохастического моделирования [33]. В традиционной геологической литературе используются словесные исторические модели, модели-описания.

Примером задачи исторической геологии является изучение процессов образования слоистых толщ [33, с. 30]. Имеется бассейн, в который периодически привносятся продукты размыва. На дне бассейна образуется осадок, состоящий из песка, алевролита и глины. Каждому акту привноса при осажении отвечает пакет слоев, начало которому дают грубозернистые образования, а концу его — тонкозернистые. Пакет может состоять из одного, двух или трех компонентов и иметь разную мощность, а также содержать слои разной мощности. На основании некоторых предположений указывается последовательность чередования пакетов и, положим, закон распределения мощностей для слоев песчаника.

Цели таких задач: на основе некоторых предположений объяснить данные наблюдений, показать, как мог образоваться геологический объект, обладающий определенным набором свойств; ввести некоторые связи между свойствами геологического объекта, например закон распределения наблюдаемых величин.

Способы проверки решения: согласие выделенных связей между свойствами с наблюдаемыми данными по некоторым (в частности, статистическим) критериям.

Характер решения: допускают много решений, в зависимости от используемых предположений и выбора критериев согласия.

Практическое использование решения: выделение связи между свойствами геологических объектов, в частности законов распределения наблюдаемых величин, которые используются для решения других задач, например задач обработки наблюдений.

Теоретическое значение определяется тем, как фиксирован и описан класс рассматриваемых геологических объектов, четко ли сформулированы используемые предположения, из чего они вытекают, как их проверить, а также тем, насколько новы полученные связи между свойствами геологических объектов.

Трудности построения исторических моделей в [34, с. 14] поясняются так: «Специфика такова. 1) Нас интересует неизвестный процесс, развивающийся во времени, суждение о котором требуется составить по ре-

зультатам его единичного осуществления. 2) Результаты процесса, по которым он восстанавливается, поддаются изучению в редких пунктах... наблюдения несут... случайный характер».

В [33] из этих трудностей делается вывод, что для изучения подобных процессов следует прибегать к теории вероятности. Можно подумать, что к ней следует прибегать, когда нет возможности опереться на достаточное число установленных фактов. Это, конечно, не так.

По-видимому, следует считать, что решение задач построения исторических моделей геологических тел имеет смысл, если предварительно построена их статическая модель. Например, если речь идет об образовании гранитов, необходимо вначале дать формальное определение понятия «гранит», указать, какие свойства могут быть приписаны гранитам, какие связи между свойствами отвечают гранитам. Этот этап в настоящее время, как правило, опускается [33]. В силу своей специфики статистические критерии позволяют судить только о «разумности» предлагаемой генетической модели, которая дает следствия, согласующиеся с наблюдаемыми данными. Хорошо известно, что одной и той же статической модели могут отвечать с точки зрения одного и того же критерия разные генетические модели [87]. Принципиальные трудности отбраковки генетических моделей обусловлены тем, что наблюдать моделируемые процессы нет возможности. В некоторых случаях можно наблюдать частные примеры быстро протекающих процессов, которые приводят к аналогичным в локальном смысле результатам [48, 50, 87]. При этом используется очень расплывчато толкуемый принцип актуализма [50]. Для практических целей предпочтительнее иметь дело со статическими моделями [41, 107].

В заключение поясним предложенную классификацию геологических задач следующим образом. Классификация преследует цель оценить геологические задачи в аспекте применения математических методов и ЭВМ. Она является попыткой перенести в геологическую практику так называемый модульный подход, заключающийся вот в чем.

Выше было сказано, что собственно геологическими, специфичными именно для геологии задачами разумно считать только сложные задачи. Последние, однако, можно представить множеством модификаций. Поэтому каждую сложную задачу необходимо разделить на подзадачи и так далее, вплоть до элементарных процедур, которые задачами, по сути дела, не являются, а относятся к в ы б о р у. Такие элементарные процедуры можно рассматривать как «кирпичи», из которых впоследствии строятся «блоки» (простые задачи), а из «блоков» —

«сооружения» (сложные задачи). Классификация «кирпичей», «блоков» и «сооружений» производится по разным принципам. Не из любых «кирпичей» можно сложить требуемый «блок» и не из любых «блоков» намеченные «сооружения». Некоторые «кирпичи» или «блоки» могут оказаться некоммутативными.

Можно построить теорию, которая покажет, как нужно сочетать выделенные «кирпичи» и «блоки». Некоторые элементарные задачи при этом будут иметь только одно-единственное, не зависящее от интуиции ученого, решение. Но найдутся и такие «кирпичи», которые возможно будет изготавливать по-разному, не говоря уже о «блоках». Теория и должна будет определять, какие типы «блоков» из каких «кирпичей» можно строить. Отрабатывая теорию решений и стыкования элементарных и простых задач, можно будет перейти к теории решения сложных. В такой трактовке возможно говорить о теоретическом исследовании постановки сложных, собственно геологических задач.

Выводы. Вопрос о классификации задач геологии, решаемых с помощью ММ и ЭВМ, важен, но слабо разработан. Обычно рассматриваются не столько геологические задачи, сколько их математическая интерпретация. Однако одной и той же геологической задаче можно давать различные математические интерпретации. Для разбора возможностей применения ММ задачи статической геологии целесообразно подразделить на соподчиненные логические типы — элементарные, простые и сложные. Такое деление позволяет охватить все основные виды исследовательских процедур в геологии, как в признаковом, так и в геологическом пространстве.

Оценивать решения элементарных задач возможно только после применения результатов их решения к другим задачам, решение которых должно удовлетворять некоторым наперед заданным свойствам. Это же касается и простых задач. По процедурам решения элементарных и простых задач геология не отличается от других наук. Собственно геология начинается с постановки сложных задач, где возможны действительно специфические процедуры. Постановка сложных задач сейчас остается наименее разработанной областью.

В настоящее время ММ применяются исключительно для решения элементарных и простых задач, в основном по линии внедрения в геологию математической статистики.

Задачи исторической геологии пока не разработаны с точки зрения применения ММ. Прежде чем приступить к их постановке, необходимо основательно разработать задачи статической геологии.

**§ 8. ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И ОСНОВНЫХ ТРУДНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
И ЭВМ В ГЕОЛОГИИ**

1. Обсуждение вопросов эффективного использования математических методов и ЭВМ в геологии ведется по двум направлениям: разработка научно-организационных мер для обеспечения быстрого и массового внедрения математических методов и ЭВМ в геологию и разработка принципиальных планов для проведения научных работ по применению ММ.

2. По научно-организационным вопросам у специалистов нет сколько-нибудь значительных расхождений во взглядах. Как видно из ряда публикаций [4, 28, 38, 39, 145, 146], необходимые научно-организационные мероприятия должны в общих чертах сводиться к следующему:

а) организация специальных теоретических подразделений для решения важных геологических задач, таких как геологическая интерпретация комплексных геофизических данных, оценка перспективности территорий на поиск крупных месторождений полезных ископаемых, подсчет запасов полезных ископаемых и др.;

б) создание специальных информационно-вычислительных центров, в задачу которых входило бы создание систем геолого-геофизических данных, удобных для обработки на ЭВМ, а также создание фонда алгоритмов и программ;

в) создание специальных курсов для математической подготовки геологов;

г) создание единого теоретического центра по систематизации опыта, связанного с применением математических методов и ЭВМ в геологии, по координации и оценке эффективности таких работ;

д) выработка специальных мер стимулирования совместных работ геологов, геофизиков и математиков.

До сих пор удалось провести лишь небольшую часть названных мероприятий. Это в значительной мере связано с тем, что, хорошо зная, что надо сделать, мы плохо знаем, как это надо делать с учетом реальных возможностей.

Рекомендации научно-организационного характера, данные в [35], обращены в общем на то, что всегда должно учитываться при организации научных работ любого плана. К этому относятся требования тщательной организации научных сессий с руководящей ролью компетентных специалистов и тре-

бование широкого участия советских специалистов в международном сотрудничестве.

3. Чаще всего применение математических методов в геологии считается эффективным, когда оно проводится геологами, хорошо понимающими и специфику геологических задач, и математику [33, 68, 171]. В [33, с. 17] особо подчеркивается, что математическую модель может построить только сам геолог.* По этому вопросу поучительно привести выдержку из книги У. Сойера [143, с. 9—10]: «Практики, как правило, не имеют представления о математике как о способе классификации всех проблем. Обычно они стремятся изучать только те разделы математики, которые уже оказались полезными для их специальности. Поэтому они совершенно беспомощны перед новыми задачами. Вот тогда-то они и обращаются за помощью к математикам. (Это разделение труда между инженерами и математиками, вероятно, оправдано; жизнь слишком коротка для того, чтобы одновременно изучать и абстрактную теорию и инженерное дело.) Встреча математика и инженера очень забавна. Инженер, ежедневно имея дело с машинами, настолько привыкает к ним, что не может понять чувств человека, видящего машину впервые. Он забрасывает своего консультанта математика огромным количеством подробностей, которые для того ровным счетом ничего не значат. Через некоторое время инженер приходит к выводу, что математик — абсолютный невежда и что ему нужно объяснять простейшие вещи, как ребенку или Сократу. Но как только математик поймет, что делает машина или что от нее требуется, он переводит задачу на язык математических терминов. После этого он может заявить инженеру одно из трех:

- 1) что задача известна и уже решена;
- 2) что это новая задача, которую он может попытаться решить;
- 3) что это одна из тех задач, которую математики безуспешно пытались решить... и что поэтому инженеру придется решать ее эмпирически.

К сожалению, третий случай встречается удручающе часто. Но первый и второй случаи также довольно часты, и вот тогда-то математик благодаря его знанию закономерностей может принести пользу в тех областях, о которых он в некотором смысле ничего не знает».

* По этому поводу следует заметить, что нельзя слишком серьезно относиться к разделению людей по специальности. Лучше их делить на более или менее способных к постановке и решению проблем.

Отсюда следует, что совершенно не обязательно появление геологов-математиков. Надо только добиться, чтобы геолог мог и хотел сотрудничать с математиком, обладая достаточно общими навыками математического мышления.

4. По вопросам разработки принципиальных планов научных работ у специалистов различные точки зрения. Серьезные расхождения есть даже в самых общих вопросах: во-первых, какие условия необходимы для эффективного применения математических методов и ЭВМ в геологии; во-вторых, куда в подобных целях следует направить основные усилия; в-третьих, какие геологические задачи в первую очередь следует решать с помощью математических методов и ЭВМ, а также как их следует первоначально ставить.

Как отмечалось в [41] и видно из изложенного, эти расхождения обусловлены различиями толкования геологии, оценки ее методологической и теоретической баз, понимания существа и возможностей математических методов, представлений о соотношениях между детерминированными и статистическими моделями в геологии и пр.

5. В ряде работ [18, 38, 39, 41, 48, 51, 53, 61, 72, 84, 91, 128, 129, 144] отмечалось, что для эффективного применения математических методов в геологии необходимо, чтобы рассматриваемая геологическая задача была сформулирована на основе формальных, однозначно толкуемых геологических понятий.* Но этого еще недостаточно. *Для окончательной оценки нужно объективно проанализировать полученные результаты.* Последняя точка зрения представляется наиболее прогрессивной. Хотя она и порождает свои трудности, но они обусловлены необходимостью создания формального геологического языка, системы формальных геологических понятий. В связи с этим сейчас уместно отметить четыре важных обстоятельства.

Во-первых, современное состояние понятий в геологии не есть результат специфического только для нее процесса. Оно отвечает уровню теоретической зрелости науки [41, с. 111]. По-видимому, на любом уровне теоретической зрелости в гео-

* Очень четко об этом сказано в [61, с. 392]: «Любой научный под ход требует точного определения цели действий и формулировки проблемы. На первый взгляд осуществить это довольно несложно, по крайней мере, в отдельных случаях, и очевидно, что когда формулировка цели выполнена достаточно четко, решение проблемы оказывается более надежным и значимым, нежели при неопределенных формулировках. Поэтому необходимо добиваться формальной постановки проблем и понять, что пренебрежительное отношение к этому вопросу может привести к провалу плана всей работы».

логии будет существовать некоторый набор расплывчатых понятий и образных моделей, но в общем массиве понятий он должен занимать возможно малый объем.

Во-вторых, задача построения системы формальных геологических понятий в постановке новосибирской группы специалистов [89, 159] оказывается совершенно новой для науки. Речь идет об одновременном, направленном на решение задач поиска переустройстве целой системы понятий, так как большинство геологических понятий взаимосвязано. Это не могло не вызвать опасений [1, 24, 171, 177 и др.]. Однако тот факт, что через такой этап переустройства всей системы понятий благополучно прошли и математика, и физика, позволяет надеяться, что его благополучно пройдет и геология. Однако подобные надежды не должны настраивать на слишком оптимистический лад, дескать, со временем все образуется. Дело в том, что последствия, вытекающие из несовершенного состояния понятий, в свое время ясно осознавались широким кругом математиков и физиков, чего нельзя сейчас сказать о геологах. Работа по анализу недостатков существующих понятий математиками и физиками никогда не рассматривалась как покушение на их научный авторитет, на значение их науки, и в работах по построению новых, более совершенных понятий принимали участие крупнейшие специалисты. Эти работы пользовались огромным вниманием научной общественности. В геологии же только предстоит создать подходящую научную атмосферу для подобных работ. При этом надо учитывать, что выработка научных понятий — процесс очень трудный и длительный, о чем говорит опыт, например, математики, физики и кристаллографии [170]*.

Заметим, что требование формализации никак не следует понимать в том смысле, что предлагается глобальная формализация с чуть ли не остановкой геологической работы до уточнения всех геологических понятий. Такое понимание (см. 1) — недоразумение. Уточнять понятия надо при постановке задач поиска полезных ископаемых и только те, которые пужны для их решения. «Вынужденной посадкой» геологии это не грозит, а лишь избавит ее от псевдоматематических и псевдодоказательных решений.

* Именно так надо понимать замечание, высказанное в [41], о том, что усовершенствование понятий, возможно, займет лет 20, а не в том смысле, что оно откладывается на 20 лет, как было воспринято А. В. Бухникашвили [24].

Уточнение одних понятий неизбежно повлечет необходимость уточнения других. Однако во всеобщее разрушение геологических концепций, как это иногда ожидают, формализация не выльется. Если продолжать использовать неформальные понятия, то в принципе тоже ничего «страшного» [см. 24, с. 13] не произойдет. Просто в геологии будет продолжать существовать ряд мифов и предрассудков, основанных на «решении» проблем, и будут «решаться» мнимые проблемы (разумеется, за государственный счет)*.

Некоторыми, например [171], подготовка формальной базы для эффективного использования ММ определяется как «симбиоз» математики и геологии, при котором просто предлагается использовать для обработки и интерпретации геологических данных различные методы и приемы, разработанные в разных областях математики, считаясь с тем, что интуитивные оценки ряда понятий и мер у геологов в целом «одинаковы». В [171] в качестве обнадеживающего момента приводится пример одинакового конструирования геологами шкалы интенсивности складчатости. О сути этого уже говорилось, но следует еще раз разъяснить. Все попытки использовать ММ без формальных понятий или с неполной формализацией обречены на провал. Результаты применения ММ в этом случае неубедительны и, главное, при таком применении невозможно объективно оценить их эффективность. Если геологи, не имея четкого определения понятия «интенсивность складчатости», все же разложили представленные изображения складок в одинаковом порядке, то это еще не значит, что доказана верность или эффективность такой классификации. Геологи лишь пришли к одинаковым экспертным оценкам, действуя и мысля одинаково, но не будучи в состоянии что-либо доказать. Диагностические процедуры — а именно в них суть задачи — можно построить правильно и доказать их эффективность, только используя заранее выдвинутые точные определения и критерии.

В-третьих, пока нет возможности найти достаточно обстоятельные ответы на многие важные вопросы. Можно ли, например, формально усовершенствовать любое наперед выбранное геологическое понятие? Если да, то всякое ли геологическое понятие имеет смысл совершенствовать? Следует ли проводить усовершенствование геологических понятий попутно в процессе решения конкретных задач (как это делается в физике и математике) или это усовершенствование следует рассматривать как самостоятельную задачу? О чем правильнее вести речь: об усовершенствовании старой системы понятий в геологии или о создании новой? Какие понятия геологии можно выбрать в качестве исходных, эксплицируемых? Должна ли система понятий быть единой для всех областей геологии или же в каждой области геологии должна быть своя изолированная система

* Можно, минуя уточнение понятий и постановку задачи, например, как угодно долго манипулировать формулами подсчета прогнозных запасов [172]. Полученные цифры будут носить в основном декларативный, но не научный характер.

понятий? Каким требованиям должны удовлетворять определения понятий о геологических областях?

В-четвертых, очевидно, что необходимые для ММ понятия геологии не могут возникнуть вне учета и анализа уже существующих понятий и представлений геологии. Несмотря на все формальные недостатки, которые сейчас присущи этим понятиям и представлениям, они, несомненно, являются основным источником возможного прогресса.

Однако необходимо обратить самое пристальное внимание на принципы, лежащие в основе всех используемых понятий и подходов, а не на изложение фактов, полученных с их помощью.

6. Относительно того, куда надо направлять сейчас основные усилия для обеспечения эффективного внедрения математических методов и ЭВМ, также имеются различные мнения [33, 41]. Чаще всего предлагается сосредоточить основное внимание на массовом решении конкретных геологических задач [1, 171]. Имеется и иная точка зрения, в соответствии с которой основные усилия предлагается сосредоточить на приведении в надлежащий вид методологической и теоретической баз геологии, на математической постановке важнейших геологических задач, на рассмотрении вопроса существования и единственности решений этих задач [40, 41, 128, 129, 160]. Для выбора между этими точками зрения обратимся к существу дела. Повторим, что для математического решения какой-либо задачи прежде всего необходимо доказать, что она имеет решение и притом единственное. Если таких доказательств нет, то, независимо от количества и сложности имеющихся решений, нельзя предпочесть одно другому. С этих позиций вторая точка зрения представляется предпочтительной. Однако и здесь может возникнуть ряд сложных вопросов о конкретных способах рассмотрения проблем существования и единственности решений задач. Ведь все принципиально важные задачи геологии являются, как было сказано, составными. Например, задача поиска полезных ископаемых по геохимическим данным делится на подзадачи: определение фоновых содержаний, выделение аномалий, оценка перспективности аномалий. Сама задача должна иметь единственное решение, но подзадачи, имеют много решений.

7. Рассмотрим представления о том, какие задачи геологии должны решаться с помощью математических методов и ЭВМ в первую очередь. В работах А. Б. Вистелиуса [33] и ряда других исследователей в качестве таких первоочередных задач выдвигаются генетические задачи геологии — задачи «представления генетических построений геологии в виде полноценных

стохастических моделей». Основание такого выбора сводится к многократному повторению генетической доктрины: без генетических представлений нельзя решать никаких вопросов геологии [см. 33, с. 15]. В работах же представителей новосибирской группы [18, 40, 92, 159] в качестве первоочередных выдвигаются задачи, удовлетворяющие следующим требованиям: (а) они не касаются генетических проблем; (б) представляют бесспорный практический интерес; (в) достаточно разработаны традиционными геологическими методами; (г) по ним имеются четкие геохимические и геофизические представления; (д) они допускают уже сейчас более или менее четкую трактовку. К таким задачам относятся, например, задачи выбора оптимальных разведочных сетей, выбора рациональных комплексов исследований для поисков полезных ископаемых, подсчета запасов полезных ископаемых, оценка перспективности территорий на полезные ископаемые.

Вторая точка зрения в соответствии со всем, что ранее изложено, представляется нам предпочтительнее. Как уже отмечалось в [41, 49, 107], стремление подчинить основные усилия генетической доктрине геологии является серьезной помехой для ее прогресса, отвлекая силы, время и стимулируя своеобразный, малопрогрессивный стиль мышления. Генетические проблемы — самое сложное и спорное; многие из них, например генезис нефти многих руд и горных пород, несмотря на огромные усилия, до сих пор не имеют окончательного решения. Более того, для их решения сейчас не видно реальных путей, и возможно, что они в принципе не имеют отыскиваемых решений. Так, Дж. Мери, говоря о происхождении фосфоритовых конкреций на дне океанов (чему много лет посвящаются значительные усилия лучших специалистов), заметил, что «вероятнее всего, однозначного объяснения формирования фосфоритовых конкреций просто не существует» [105, с. 82].

Некоторые считают, что отказ от решения генетических проблем является уступкой агностицизму или же позитивизму [126]. Это, конечно, не так. Нет смысла связывать сравнительно несложные статические задачи со сложными генетическими проблемами. Генетические задачи, кроме того, не более чем задачи по установлению системы связей между объектами и свойствами. Логическая схема тех и других одна и та же. Только условие и результаты решения генетической задачи формулируются в специфических терминах, обычно не являющихся терминами наблюдения.

Иногда в качестве первоочередной выдвигают задачу математической обработки опытных данных. Но такую обработку

нельзя провести без выбора подходящей знаковой модели, а последнюю нельзя строить без указания конкретных целей. Важно заметить, что многие недоразумения по обработке опытных данных в геологии обусловлены неправильной исходной классификацией этих данных. Известно, что опыты бывают двух видов: простоповторяемые и сложноповторяемые. Первые связаны с действиями, которые не приводят к существенным изменениям объекта, вторые — с действиями, которые приводят к существенным изменениям объекта. Например, измерение размера кристалла или его оптических свойств относится к опытам первого вида, а измерение способности кристалла или организма находится без изменений в условиях высоких температур и т. п. — к опытам второго вида. Опыты первого вида можно повторять много раз на одном и том же объекте. Опыты второго вида можно повторять только тогда, когда организуется класс одинаковых в определенном смысле объектов. Схемы обработки данных опытов первого и второго вида существенно различаются. Их нельзя путать. Например, подсчет количества добытого полезного ископаемого — опыт второго вида.

8. Обратимся к рассмотрению разногласий по постановке задач. Эти разногласия можно пояснить следующим примером. Пусть имеется N локальных «структур», которые по некоторым соображениям перспективны на нефть. В нашем распоряжении имеется Q рублей, которые мы можем затратить на буровые работы. При проведении поисково-разведочных буровых работ мы можем придерживаться различных стратегий R , которые дадут различные оценки запасов нефти P . Естественно, желательно выбрать такую стратегию R' , которая даст максимальную оценку запасов нефти P' . Для поисков такой стратегии необходимо математически поставить задачу и, следовательно, принять некоторые предположения. При формулировке этих предположений приходится руководствоваться двумя требованиями. Они должны быть: а) как можно менее жесткими и допускать экспериментальную проверку, чтобы полученное решение имело практический смысл; б) как можно более полными, чтобы имелась возможность получить решение с помощью уже разработанного математического аппарата на хорошем уровне строгости.

Как правило, эти требования оказываются противоречивыми; приходится учитывать в основном либо то, либо другое требование. Если предположения выбираются с предпочтительной ориентацией на первое требование, можно говорить об эвристической постановке, в противном случае будем говорить о статистической постановке. Представителем исследова-

телей, предпочитающих эвристическую постановку, можно назвать Ш. А. Губермана [63]; исследователей, предпочитающих статистическую постановку, представляет А. Б. Вистелиус [33]. Никаких рецептов определения того, какой подход лучший, дать нельзя. Каждая задача должна рассматриваться конкретно. Однако эвристический подход можно считать в общем более предпочтительным (при условии, что решаемая задача имеет смысл).

9. В заключение кратко обсудим трудности применения математических методов в геологии с точки зрения специалистов, убежденных в их целесообразности и прогрессивности. В настоящее время многие считают, что эти трудности обусловлены в основном отсутствием геологов, знающих математику, и математиков, знающих геологию [33, 68]. Такое толкование этих трудностей, по нашему мнению, не является удачным.

Трудности применения математических методов в геологии следует разделить на два рода: 1) общие для всех конкретных наук (в том числе для физики); 2) специфические для геологии. Трудности первого рода, — обусловленные трудностями построения математических моделей, достаточно простых для использования и отвечающих содержательному существу задач, — уже неоднократно обсуждались в литературе [8, 15, 16, 40, 55, 58, 59, 69, 79, 85, 95, 102, 109, 114, 115, 117, 121, 127, 149, 150, 170, 173, 175] и мы их здесь касаться не будем.

10. При обсуждении специфических трудностей второго рода следует иметь в виду два возможных направления применения математических методов в геологии: для совершенствования теоретических представлений (см. § 6) и для решения конкретных задач (см. § 7).

Если иметь в виду применение математических методов для совершенствования теоретических представлений геологии, то возникающие при этом основные трудности можно считать обусловленными такими обстоятельствами: а) традиционные методологические предпосылки геологии (см. § 5) не только не стимулируют, но и лишают всякого смысла такое совершенствование в рамках этих предпосылок; б) на первых этапах работы по совершенствованию слабо увязываются с практикой и не пользуются уважением, что затрудняет их постановку в плановом порядке.

11. Если иметь в виду применение математических методов для решения конкретных задач, то трудности можно считать обусловленными в основном тремя обстоятельствами: а) современным состоянием теоретических представлений геологии (см. § 6); б) характером современных приемов сбора эм-

пирических данных в геологии, которые не учитывают специфику обработки материала с помощью математических методов. С помощью ММ сейчас обрабатывают данные, сбор которых во многом обусловлен субъективными чертами исследователей и другими привходящими обстоятельствами; в) в настоящее время отсутствует практика построения схем сбора геологических данных с учетом их обработки математическими методами при проверке этих схем на специальных полигонах.

Последний пункт требует пояснения. Проверка эффективности применения ММ может проводиться либо на моделях, либо экспериментами на натуральных объектах. В геологии приемлем в основном именно второй способ, требующий работы на природных полигонах, аналогично испытаниям новых методов геофизики, геохимии, бурения и т. п. Для теоретических методов практической проверки пока не ведется. После выдвижения теоретических предположений их предпочитают сразу же применять на практике без какой-либо проверки, считая, что успех действий в этом практическом их приложении и будет подтверждением удачности решения. Но такой способ проверки не является правильным. В других случаях результаты, полученные с использованием некоторого теоретического метода, сравнивают с результатами, полученными «традиционным» способом, считая последние как бы эталоном (?).

Как это всегда бывает, главное заключается не столько в том, что что-то плохо или что-то отсутствует, сколько в том, что это не ощущается достаточно остро и нет достаточного стремления к нужным изменениям.

Выводы. Резкое и существенное повышение эффективности использования ММ в геологии возможно лишь после проведения научно-организационных мер и определенной перестройки подходов. По научно-организационным мерам выработаны более или менее сходные взгляды. В вопросах же перестройки принципов работы возникают серьезные расхождения. Наиболее прогрессивной представляется точка зрения, согласно которой геологические задачи для решения с помощью ММ должны формулироваться на основе предварительно формализованных понятий. Это требование приводит к признанию необходимости работы по уточнению геологических задач и понятий. Попытки использовать ММ с неполной формализацией понятий немногим лучше попыток обойтись и вовсе без формализации.

Основные усилия по внедрению ММ в геологию необходимо сосредоточить в первую очередь на правильной и имеющей смысл постановке задач. Для конкретного решения с помощью ММ целесообразно подбирать только такие задачи,

которые достаточно разработаны, для которых имеются четкие представления и трактовки. К таким задачам не относятся генетические задачи, хотя последние пока наиболее ценятся.

Предполагается, что при постановке геологических задач рациональнее стремиться к более строгой постановке на основе уже разработанного математического аппарата. Всякое признание смягчающих условий для некорректной постановки снизит уровень исследований.

Не все опытные данные можно обрабатывать с помощью ММ без четкого указания целей. К ним относятся данные, полученные за счет таких измерений, которые нельзя повторять на одном и том же индивиде.

Препятствия на пути применения ММ, специфичные для геологии, в теоретическом плане обусловлены тем, что, во-первых, возникает необходимость менять некоторые прочно сложившиеся методологические посылки геологии; во-вторых, тем, что эта работа на первых порах оценивается как мало практичная. При решении конкретных задач трудности применения ММ возникают как следствие несовершенства некоторых теоретических представлений, неувязки схем сбора фактического материала со схемами его математической обработки и отсутствия испытательной проверки разрабатываемых схем. Кроме всего, атмосфера научной и производственной деятельности в геологии еще не стимулирует появления у основной массы специалистов тяги к нововведениям математического характера и это положение также надо решительно изменить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широко распространена точка зрения, согласно которой все науки развиваются одинаково успешно, во всяком случае настолько, насколько позволяют внешние условия. В действительности же, как отмечал Дж. Платт [123], наука развивается успешно только тогда, когда развитие ее теоретических методов исследования отвечает новым задачам, возникающим перед ней. Каждый ученый должен заботиться о будущем своей науки, и развитие новых методов исследования должно являться его первой обязанностью.

Сейчас перед геологией возникли новые задачи, связанные с необходимостью строгого теоретического обобщения огромного объема различных по природе экспериментальных данных, значительного углубления и повышения производительности исследований. Для успешного решения подобных задач необходимы новые теоретические методы исследования. Такие методы нельзя создать без привлечения математики и вычислительной техники.

Теоретическое перевооружение геологии уже началось, и в нашу задачу входило помочь геологу определить свое место в этом процессе перевооружения. Основное внимание в данной работе было обращено на анализ процесса внедрения математических методов и ЭВМ в геологию и возможностей такого внедрения в развитии геологической теории. Сейчас ясно, что внедрение математических методов и ЭВМ в геологию затрагивает ряд сложных методологических и теоретических вопросов, порождает комплекс проблем, по которым существуют различные точки зрения.

По всем затрагиваемым в работе проблемам пока нельзя получить полностью объективных правильных суждений. Точка зрения, которой мы отдали здесь предпочтение, кратко сводится к следующему.

Существо математических методов состоит в том, что они основаны на строгих понятиях и являются инструментом для строгих выводов, для поиска наилучшего решения в строго оговоренной ситуации. Математические методы могут быть использованы в двух направлениях: для совершенствования теории и для решения конкретных задач. Во втором направлении они могут быть успешно использованы тогда и только тогда, когда в нашем распоряжении имеется формальная модель, адекватная рассматриваемому объекту.

Математические методы и ЭВМ пока еще играют в геологии чисто иллюстративную роль. При корректном подходе они ставят вопросов больше, чем решают. Пока их пытаются применять всего лишь как средство, повышающее производительность труда, совершенствуя с их помощью некоторые трудоемкие операции, в то время как вся трудовая процедура осуществляется по старой схеме. В этом аспекте применение ММ и ЭВМ во многих случаях лишь усугубляет заблуждения, возникающие при попытках дать точное решение неверно или плохо поставленной задаче.

Трудности применения математических методов в геологии обусловлены в первую очередь несовершенством ее методологической базы и формальными пороками ее теоретических представлений. Успех в дальнейшем может быть обеспечен, если соответственно будут изменены методологические и теоретические представления геологии. При правильном подходе к вопросам применения в геологии ММ они в будущем смогут полностью заменить традиционные громоздкие и ставшие малоэффективными способы геологических рассуждений. При этом основные усилия мы должны направить на решение задач статической геологии.

Все отрицательные черты геологии, отмеченные выше, лишь издержки ее роста. Творческое освоение накопленного общенаучного опыта и изменение способа сбора данных могут сделать реальными перспективы успешного развития теоретической геологии на базе математических методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович И. И., Бурков Ю. К., Груза В. В., Дуденко Л. Н., Михайлова Ю. И., Олейников А. Н., Романовский С. И. Основные тенденции математизации геологии.— «Сов. геология», 1972, № 3, с. 3—17.
2. Александров А. Д. Общий взгляд на математику.— В кн.: Математика, ее содержание, методы и значение. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 5—78.
3. Арабаджи М. С., Васильев Ю. М. и др. Простейшие математические приемы решения геологических задач. М., «Недра», 1967, 84 с.
4. Белоусов В. В. О современном состоянии теоретической геологии.— «Природа», 1953, № 2, с. 15—22.
5. Белоусов В. В. О путях развития геологической науки.— «Сов. геология», 1963, № 1, с. 11—28.
6. Бернал Дж. Д. Наука в истории общества. ИЛ, 1956, 735 с.
7. Бикар Н. Двадцатилетие всемирной Федерации научных работников — «Мир науки», 1966, № 4, с. 2—6.
8. Бирюков Б. В., Спиркин А. Г. Гуманитарные науки, логика и кибернетика.— В кн.: Кибернетика, мышление, жизнь. М., «Мысль», 1964, с. 481—509.
9. Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдин Э. Г. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности. М., «Знание», 1969, 48 с.
10. Блехман И. И., Мышкин А. Д., Пановко Я. Г. Правдоподобность и доказательность в прикладной математике.— «Механика твердого тела», 1967, № 2, с. 196—202.
11. Богацкий В. В. Математический анализ разведочной сети. М., Госгеолтехиздат, 1963, 212 с.
12. Божич С. П. О способах истинностной оценки естественнонаучных высказываний.— В кн.: Логика и эмпирическое познание. М., «Наука», 1972, с. 243—255.
13. Бондаренко В. Н. Статистические методы изучения вулканогенных комплексов. М., «Недра», 1967, 135 с.
14. Бондаренко В. Н. Статистические методы решения некоторых задач геологии. М., «Недра», 1970, 247 с.
15. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание.— М., ИЛ, 1961, 151с.

16. Бор Н. О единстве человеческих знаний.— «Успехи физ. наук», т. 76, в. 1, 1962, с. 21—24.
17. Боровиков А. М. О фактическом состоянии тектонической терминологии.— «Геотектоника», 1968, № 1, с. 3—7.
18. Борукаев Ч. Б., Каратаева Г. Н. О работе секций формальных построений на первом сибирском совещании по применению математических методов и ЭВМ в геологии.— «Геология и геофизика», 1966, № 7, с. 147—149.
19. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М., Физматгиз. 1960, 392 с.
20. БСЭ, т. 6. Изд. 3. М., «Советская энциклопедия», с. 300—305.
21. Бубнов С. Н. Основные проблемы геологии. М., Изд-во МГУ, 1960, 233 с.
22. Бунге М. Интуиция и наука. М., «Прогресс», 1967, 188с.
23. Бурбаки Н. Теория множеств. М., «Мир», 1965, 456с.
24. Бухшиканвили А. В. К вопросу о «математизации» геологии.— «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1972, № 1, с. 3—15.
25. Васильева А. П. О нарушениях литературных норм в языке и стиле геологических текстов.— «Геол. ж. АН УССР», 1970, № 1, с. 156—170.
26. Винер Н. Я — математик. М., «Наука», 1967, 356 с.
27. Виноградов А. П. Доклад на общем собрании АН СССР (3—5 февр. 1964 г.).— «Вест. АН СССР», 1964, № 4, с. 34—38.
28. Вистеллиус А. Б. Проблемы математической геологии.— «Геология и геофизика», 1962, № 12, с. 3—9.
29. Вистеллиус А. Б. Основные типы математических рапеший задач современной геологии.— «Разведка и охрана недр», 1964, № 6, с. 18—25.
30. Вистеллиус А. Б. Задачи геохимии и информационные меры.— «Сов. геология», 1964, № 12, с. 5—26.
31. Вистеллиус А. Б. Математические методы в геологии.— «Сов. геология», 1964, № 12, с. 148—149.
32. Вистеллиус А. Б. Теоретические предпосылки стохастических моделей и их проверка в конкретных геологических условиях.— В кн.: Доклады сов. геологов на международном геол. конгрессе, XXIII сессия. Математические методы в геологии. Проблема 13-6. М., «Наука», 1968, с. 7—14.
33. Вистеллиус А. Б. Математическая геология (состояние, перспективы)— В кн.: Математическая геология. Л., БАН, 1969, с. 11—56.
34. Вистеллиус А. Б. Математическая геология.— «Природа», 1969, № 12, с. 34—42.
35. Вистеллиус А. Б. О гейдельбергской сессии совета международной ассоциации математической геологии (МАМГ).— «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1972, № 3, с. 153—155.
36. Воронин Ю. А. О возможностях применения современной математики в геологии.— «Геология и геофизика», 1963, № 1, с. 124—128.
37. Воронин Ю. А. О построении принципиальной схемы подсчета запасов полезных ископаемых.— «Геология и геофизика», 1966, № 2, с. 69—76.

38. Воронин Ю. А. К итогам первого Сибирского совещания по применению математических методов и ЭВМ в геологии.— «Геология и геофизика», 1966, № 7, с. 145—147.
39. Воронин Ю. А. К итогам второго Сибирского совещания по применению математических методов и ЭВМ в геологии и геофизике.— «Геология и геофизика», 1968, № 3, с. 149—150.
40. Воронин Ю. А. Об исследованиях, связанных с применением математических методов и ЭВМ в геологии.— «Геология и геофизика», 1967, № 10, с. 75—81.
41. Воронин Ю. А., Алабин Б. К. и др. Геология и математика. Новосибирск, «Наука», 1967, 254 с.
42. Воронин Ю. А., Гольдина Н. А. и др. Краткие результаты анализа некоторых геологических классификаций.— В кн.: Опыт анализа и построения геологических классификаций на основе представленной конечной математики. Новосибирск, 1964, с. 77—88.
43. Воронин Ю. А., Гольдина Н. А. О математико-логическом анализе геологических классификаций на примере классификаций в геологии нефти и газа.— В кн.: Тр. СНИИГГиМС, 1964, вып. 32, с. 94—109.
44. Воронин Ю. А., Гольдина Н. А. Упрощенная схема математико-логического разбора геологических классификаций.— «Геология и геофизика», 1964, № 9, с. 95—98.
45. Воронин Ю. А., Гольдина Н. А. Пример совместного упрощенного математико-логического разбора геологических классификаций.— «Геология и геофизика», 1965, № 2, с. 83—91.
46. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. Универсальная схема аналитического описания сложных геологических тел.— В кн.: Математические методы в геологии и геофизике. Новосибирск, 1968, с. 21—35. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 79).
47. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. О процедурах сопоставления сложных геологических тел на основе их аналитического описания.— В кн.: Математические методы в геологии и геофизике. Новосибирск, 1968, с. 36—48. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 79).
48. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. Вопросы теории формационного анализа.— В кн.: Сравнительный анализ осадочных формаций. М., «Наука», 1969, с. 123—145. (Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 83).
49. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. О генетическом и агенетическом направлениях в геологии. Новосибирск, ВИНТИ, 3934—72. Деп. 1972, 24 с.
50. Воронин Ю. А., Еганов Э. А. Фации и формации. Парагенезис. Уточнение и развитие основных понятий геологии. Новосибирск, «Наука», 1972, 120 с.
51. Воронин Ю. А., Пуршисов М. Д. Об одном новом способе описания и классифицирования плоских геологических тел по ориентации, форме и f -составу.— В кн.: Математические методы в геологии и геофизике. Новосибирск, 1968, с. 49—61. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 79).
52. Воронков И. М. Курс теоретической механики. Изд. 10-е. М., Физматгиз, 1962, 596 с.
53. Воронич В. А. Еще раз о формализации геологических понятий.— «Сов. геология», 1969, № 8, с. 164—166.
54. Второе сибирское совещание по применению математических методов и ЭВМ в геологии и геофизике.— В кн.: Тезисы докладов и аннотации к программам. Новосибирск, 1967, 140 с.

55. Глушков В. М. Мышление и кибернетика.— В кн.: Диалектика в науках о неживой природе. М., «Мысль», 1964, с. 499—520.
56. Гнеденко Б. В. О роли математических методов в биологических исследованиях.— «Вопросы философии», 1959, № 1, с. 85—97.
57. Гнеденко Б. В. Роль математики в развитии современного естествознания.— В кн.: Диалектика в науках о неживой природе. М., «Мысль», 1964, с. 45—85.
58. Гнеденко Б. В. Предисловие к книге А. Реньи.— В кн.: Диалоги о математике. М., «Мир», 1969, с. 5—19.
59. Гнеденко Б. В. О будущем прикладной математики.— «Наука и жизнь», 1970, № 1, с. 42—47.
60. Гольдина Н. А. Применение упрощенного математико-логического анализа на примере классификации залежей нефти и газа И. О. Брода.— В кн.: Опыт анализа и построения геологических классификаций на основе представленной конечной математики. Новосибирск, 1964, с. 42—50. (Тр. ИГиГ СО АН СССР).
61. Гриффите Дж. Научные методы исследования осадочных пород. М., «Мир», 1971, 422 с.
62. Груза В. В. О современном состоянии петрохимии.— В кн.: Вопросы петрохимии. Материалы к совещанию (21—25 апреля 1969 г.), Л. «Недра», 1969.
63. Губерман Ш. А. Новая область применения распознающих программ.— «Природа», 1965, № 12, с. 39—46.
64. Гуревич Г. И. О так называемом «механическом анализе» в геологической литературе.— «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», № 3, 1954, с. 264—279.
65. Данбар К., Роджерс Дж. Основы стратиграфии. М., ИЛ, 1962, 364 с.
66. Девдариани А. С. Математический анализ в геоморфологии. М., «Недра», 1967, 155 с.
67. Девдариани А. С. Реконструкция истории климата методами теории передачи информации по данным микропалеонтологических анализов.— «Океанология», 1972, № 2, с. 252—261.
68. Демина Н. Е. Математические методы в геологии.— В кн.: Вопросы математической геологии. Л., «Наука», 1968, с. 288—290.
69. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики. М., Физматгиз, 1960, 434 с.
70. Дирак П. А. М. Предисловие.— В кн.: Основы квантовой механики. Изд. 2. Л.—М., 1937, 320 с.
71. Добрецов Н. Л., Маковская Н. С. Применение вероятностно-статистических методов в геологии. Новосибирск, Изд. НГУ, 1967, 124 с.
72. Долицкий А. В. Кодирование геологической информации.— «Сов. геология», 1965, № 8, с. 109—114.
73. Дородницын А. А. Использование математических методов в геологических исследованиях.— «Изв. АН СССР, сер. геол.», 1966, № 11, с. 3—8.
74. Еганов Э. А. О выделении объектов исследования в геологии.— В кн.: Пути познания земли. М., «Наука», 1970, с. 263—272.
75. Журавский А. М. Математика и геологические науки.— В кн.: Математические методы в геологии. Л., «Недра», 1966, с. 3—5. (Зап. ЛГИ, т. 50, вып. 2).

76. Иванова М. Н. Математико-логический анализ некоторых тектонических классификаций. — В кн.: Опыт анализа и построения геологических классификаций на основе представленной конечной математики. Новосибирск, 1964, с. 64—76. (Тр. ИГиГ СО АН СССР).
77. Как работать над терминологией. Основы и методы. М., «Наука», 1968, 76 с.
78. Карнап Р. Философские основания физики (введение в философию науки). М., «Прогресс», 1971, 391 с.
79. Карлье Э. Методика количественной оценки месторождений урана. М., «Атомиздат», 1966, 351 с.
80. Кедров Б. М. Программа на многие десятилетия. — «Природа», 1972, № 3, с. 2—8.
81. Клаус Г. Кибернетика и философия. М., ИЛ, 1963, 631 с.
82. Клаус Г. Введение в формальную логику. М., ИЛ, 1960, 507 с.
83. Козлова М. С. Философия и язык. М., «Мысль», 1972, 255 с.
84. Коломенский Н. В., Иванова И. П. О некоторых основных положениях инженерно-геологического опробования горных пород. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1966, № 6, с. 85—91.
85. Кольман Э. Математика в новых областях знаний. — «Природа», 1964, № 1, с. 11—19.
86. Кондаков Н. И. Логический словарь. М., «Наука», 1971, 638 с.
87. Конторович А. Э. Опыт формального анализа структуры геологических генетических теорий. — В кн.: Математические методы в геологии и геофизике. Новосибирск, 1968, с. 9—20. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 79).
88. Косыгин Ю. А. О положении геологии среди других наук и об основных проблемах геологии. — «Геология и геофизика», 1963, № 8, с. 3—12.
89. Косыгин Ю. А., Воронин Ю. А., Соловьев В. А. Опыт формализации некоторых тектонических понятий. — «Геология и геофизика», 1964, № 1, с. 23—37.
90. Косыгин Ю. А., Воронин Ю. А. Некоторые фундаментальные понятия структурной геологии. — «Геотектоника», 1965, № 1, с. 51—60.
91. Косыгин Ю. А., Соловьев В. А. Проблема усовершенствования геологического языка и «математизация» геологии. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1967, № 11, с. 157—163.
92. Косыгин Ю. А., Соловьев В. А. Статистические, динамические и ретроспективные системы в геологических исследованиях. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1969, № 6, с. 9—17.
93. Крамбени У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. М., «Мир», 1969, 398 с.
94. Кузнецов Ю. А. Магматические формации и некоторые общие вопросы геологии. — «Геология и геофизика», 1963, № 5, с. 3—16.
95. Ланжевэн П. Избранные произведения. М., ИЛ., 1949, 439 с.
96. Логика научного исследования. М., «Наука», 1965, 360 с.
97. Ляпунов А. А. О роли математики в современной человеческой культуре. — В кн.: Математизация знаний. (Материалы к конференции). М., Изд-во АН СССР, 1968, с. 24—31.
98. Малиновский А. А. Наука об организации науки. — «Природа», 1972, № 3, с. 42—49.

99. **Мандельштам Л. И.** Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М., «Наука», 1972, 439 с.
100. **Маркова Л. А.** Концепция развития науки В. Уэвелла.— В кн.: Учение о науке и ее развитии. М., «Наука», 1971, с. 194—231.
101. **Материалы** по тектонической терминологии. Ч. 1. Новосибирск, 1961, 156 с. (Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 12).
102. **Матерон Ж.** Принципы геостатистики.— В кн.: Карлье Э. Методика количественной оценки месторождений урана. М., «Атомиздат», 1966, с. 315—330
103. **Матерон Ж.** Основы прикладной геостатистики. М., «Мир», 1968, 408 с.
104. **Мельников Г. П.** Азбука математической логики. М., «Знание», 1967, 104 с.
105. **Метод Дж.** Минеральные богатства океана, М., «Прогресс», 1969, 440 с.
106. **Методологические проблемы естествознания и общественных наук.** (Материалы заседания Президиума АН СССР).— «Вестн. АН СССР» 1963, № 11, с. 4—70.
107. **Мётч А. Д.** Критическая оценка классификации рудных месторождений магматического происхождения.— «Новости зарубежной геологии», 1960, вып. 19, с. 29—52.
108. **Миллер Р. Л., Кан Дж. С.** Статистический анализ в геологических науках. М., «Мир», 1965, 482 с.
109. **Морозов К. Е.** Математическое моделирование в научном познании. М., «Мысль», 1969, 212 с.
110. **Мушкетов Д. П.** Физическая геология. Т. I. Изд. 4-е. М.—Л., ОНТИ, 1935, 908 с.
111. **Наливкин Д. В.** Будущее советской геологии.— «Природа», 1961, № 10, с. 67—74.
112. **Немец В.** Основные проблемы подсчета запасов полезных ископаемых.— В кн.: Вопросы математической геологии. Л., «Наука», 1968, с. 272—273.
113. **Николаев А. Б.** Производственные исследования и разработка в условиях современного капитализма (на материалах США).— В кн.: Организация научной деятельности. М., «Наука», 1968, с. 314—339.
114. **Новик И. Б.** Моделирование и роль в естествознании и технике.— В кн.: Диалектика в науках о неживой природе. М., «Мысль», 1964, с. 521—555.
115. **Общие вопросы применения математики в экономике и планировании.** Т. 1. Изд-во АН СССР. М., 1961, 296 с.
116. **Оже П.** Современные тенденции в научных исследованиях. М., Изд-во АН СССР, 1963, 293 с.
117. **О некоторых вопросах современной математики и кибернетики.** М., «Просвещение», 1965, 531 с.
118. **Онопrienко В. И.** Общие принципы математизации геологического знания.— «Геол. ж.», 1972, т. 32, вып. 1, с. 84—93.
119. **Онопrienко В. И.** Основные направления методологических исследований в геологии.— «Геологический журнал», 1972, т. 32, вып. 2, с. 3—12.

120. Опыт анализа и построения геологических классификаций на основе представлений конечной математики. Новосибирск, 1964, 119 с. (Тр. ИГиГ СО АН СССР).
121. Орир Дж. Популярная физика. М., «Мир», 1969, 556 с.
122. Петрашень Г. И. О применении математических и машинно-вычислительных методов к некоторым проблемам геологии и геофизики. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1967, № 2, с. 3—12.
123. Платт Дж. Метод строгих выводов. — «Вопросы философии», 1965, № 9, с. 68—78.
124. Платт В. Информационная работа стратегической разведки. М., ИЛ, 1958, 341 с.
125. Поспелов Г. Л. О характере геологии как науки и ее место в естествознании. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1960, № 11, с. 13—19.
126. Поспелов Г. Л. Проблемы метода познания в геологии. — В кн.: Материалистическая диалектика и методы естественных наук. М., «Наука», 1968, с. 473—488.
127. Применение математических методов в геологии. (Решение научной конференции по применению мат. методов в геологии). — «Вестник АН КазССР», 1968, № 12, с. 63—64.
128. Применение математических методов и ЭВМ при поиске полезных ископаемых. Сборн. научн. трудов. ВЦ СО АН СССР. Новосибирск, 1972, 284 с.
129. Применение математических методов и ЭВМ при поиске полезных ископаемых. Сборн. научн. трудов ВЦ СО АН СССР. Новосибирск, 1973, 260 с.
130. Проблемы развития советской геологии. Л., 1972, 336 с. (Труды ВСЕГЕИ, нов. сер., т. 177).
131. Программа и методические разработки к курсу «Применение математических методов и ЭВМ при поисках и разведке полезных ископаемых». Алма-Ата, 1973, 70 с.
132. Пустовалов Л. В. К вопросу о путях развития геологической науки. — «Бюлл. МОИП. Отд. геол.», т. XXXIX, вып. 2, 1964, с. 120—129.
133. Пустовалов Л. В. О состоянии и основных направлениях дальнейшего развития геологической науки. — «Сов. геология», 1964, № 8, с. 3—35.
134. Рейтман У. Познание и мышление. М., «Мир», 1968, 400 с.
135. Реньи А. Диалоги о математике. М., «Мир», 1969, 96 с.
136. Решение первого Сибирского совещания по применению математических методов и ЭВМ в геологии. 10—14 дек. 1965. Новосибирск, 1966, 20 с.
137. Рузавин Г. П. О природе математического знания. М., «Мысль», 1968, 302 с.
138. Сарманов О. В. О применении математики в геологии. — В кн.: Взаимодействие наук при изучении Земли. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 312—320.
139. Сачков Ю. В. Введение в вероятностный мир. М., «Наука», 1971, 208 с.
140. Соболев С. Л., Ляпунов А. А. Кибернетика и естествознание. — В кн.: Философские проблемы современного естествознания. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 237—267.

141. Соболев С. Л. Мудрость знаков.— В кн.: Математизация знаний. (Материалы к конференции). М., Изд-во АН СССР, 1968, с. 5—23.
142. Созановский В. И. О некоторых тенденциях развития геологии.— В кн.: Диалектика развития и теория познания в геологии. Киев, «Наукова думка», 1970, с. 75—84.
143. Со́йер У. У. Прелюдия к математике. Изд. 2. М., «Просвещение», 1972, 190 с.
144. Соловьев В. А. Формализация понятий — необходимое условие применения математики в тектонике.— «Сов. геология», 1968, № 1, с. 152—156.
145. Сидоренко А. Б. Геология и технический прогресс.— «Экономическая газета», 1962, 28 июля.
146. Сидоренко А. В. Развитие минерально-сырьевой базы страны и задачи науки.— «Вестн. АН СССР», 1964, № 7, с. 12—24.
147. Сифоров В. И. О некоторых особенностях развития современной науки.— «Вопросы философии», 1962, № 2, с. 151—153.
148. Смирнов В. А. Уровни знания и этапы прогресса познания.— В кн.: Проблемы логики научного познания. М., «Наука», 1964.
149. Субботин А. Л. Идеализация как средство научного познания.— В кн.: Проблемы логики научного познания. М., «Наука», 1964, с. 357—374.
150. Таванец П. В., Швырев В. С. Логика научного познания.— В кн.: Проблемы логики научного познания. М., «Наука», 1964, с. 3—22.
151. Теоретическая и математическая биология. М., «Мир», 1968, 448 с.
152. Тимофеев И. С. Методологическое значение категорий «качество и количество». М., «Наука», 1972, 216 с.
153. Уемов А. И. Некоторые тенденции в развитии естественных наук и принципы их классификации.— «Вопросы философии», 1961, № 8, с. 66—75.
154. Уемов А. И. Аналогия и модель.— «Вопросы философии», 1962, № 3, с. 138—145.
155. Успенский В. А. К проблеме построения машинного языка для информационной машины.— В кн.: Проблемы кибернетики. Вып. 2. М., Физматгиз, 1959, с. 39—51.
156. Успенский В. А. Предисловие к книге Ю. А. Шихановича «Введение в современную математику». М., «Наука», 1965, с. 5—24.
157. Федоров Е. С. Курс кристаллографии. Изд. 3-е. Спб., 1901, 438 с.
158. Фотиади Э. Э., Лаврентьев М. М., Воронин Ю. А. О некоторых принципиальных вопросах, связанных с изменением программы математической подготовки студентов геолого-геофизических факультетов университетов.— «Геология и геофизика», № 3, 1967, с. 93—96.
159. Фотиади Э. Э., Воронин Ю. А., Конторович А. Э. Методологические вопросы внедрения математических методов и ЭВМ в практику геологических исследований.— «Геология и геофизика», 1965, № 12, с. 15—20.
160. Фотиади Э. Э., Воронин Ю. А., и др. Опыт построения и использования альбомов алгоритмов и программ для обработки геологических данных.— «Геология и геофизика», 1966, № 10, с. 10—16.

161. Фресс П., Пнаже Ж. Экспериментальная психология. Вып. 1 и 2. М., «Прогресс», 1966, 429 с.
162. Фролов И. Т. Методологические принципы теоретической биологии. — «Природа», 1972, № 1, с. 2—10.
163. Хаттет П., Чорли Р. Дж. Модели, парадигмы и новая география. — В кн.: Модели в географии. М., «Прогресс», 1971, с. 7—28.
164. Хемминг Р. В. Численные методы. М., «Наука», 1968, 400 с.
165. Чавчанидзе Л. И. Модели науки и кибернетика. — В кн.: Кибернетика, мышление, жизнь. М., «Мысль», 1964, с. 365—394.
166. Четвериков Л. И. Роль геологического анализа при применении математики в геологии. — В кн.: Философия и естествознание. Воронеж, 1965, с. 151—167.
167. Четвериков Л. И. Теоретические основы моделирования тел твердых полезных ископаемых. Воронеж, 1968, 152 с.
168. Шанцер Е. В. Современная геология и ее место в естествознании. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1961, № 10, с. 24—35.
169. Шаратов И. П. Применение математической статистики в геологии. — М., «Недра», 1965, 260 с.
170. Шафрановский П. И. История и пути развития математической кристаллографии. — В кн.: Математические методы в геологии. — «Зап. ЛГИ», т. 50, вып. 2, 1966, с. 7—16.
171. Шолпо В. Геология—геометрия — геоматика? — «Знание—сила», 1971, № 12, с. 32—35.
172. Шнильман В. П. Обзор методик подсчета прогнозных и перспективных запасов и обоснование подсчетных параметров. — В кн.: Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 53, 1972, с. 5—12.
173. Шрейдер Ю. А. Наука — источник знаний и суеверия. — «Новый мир», 1969, № 10, с. 207—226.
174. Штофф В. Л. Гносеологические функции модели. — «Вопросы философии», 1961, № 12, с. 53—65.
175. Штофф В. А. Моделирование и философия. М.—Л., «Наука», 1966, 302 с.
176. Штофф В. А. Знаковая модель как особый вид знаковой теории. — В кн.: Проблемы знака и значения. М., Изд-во МГУ, 1969, с. 122—131.
177. Шурыгин А. М. К вопросу о формализации геологических понятий. — «Сов. геология», 1966, № 12, с. 129—132.
178. Шурыгин А. М. К вопросу о значении моделей в геологических задачах. — «Сов. геология», 1968, № 9, с. 132—139.
179. Шурыгин А. М. Задачи статистической классификации в геологии. — «Сов. геология», 1972, № 4, с. 75—87.
180. Щербаков Д. И. Актуальные задачи современной геологии. — «Вестн. АН СССР», 1962, № 1, с. 16—23.
181. Щербаков Д. И. Об особенностях современного состояния и тенденциях развития наук о Земле. — В кн.: Взаимодействия наук о Земле. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 7—10.
182. Щербаков Д. И. Состояние и общее направление развития геологической науки в СССР. — «Изв. АН СССР, Сер. геол.», 1963, № 1, с. 9—18.

183. **Щиголев Б. М.** Математическая обработка наблюдений. М., Физматгиз. 1962, 344с.
184. **Экономисты и математики за круглым столом.**— М. «Экономика», 1965, 207 с.
185. **Born M.** Symbol und Wirklichkeit.— «Physikalische Blätter», 1965, Hf. 2, S. 53—63.
186. **Thierygärtner Hannes.** Prognose der Beziehungen zwischen Geologie und Mathematik.— «Ber. Dtsch. Ges. Geol. Wiss. Berlin, 1968, H. 4, Bd. 13, S. 493—503.
187. **Thomson J. A.** The outline of Science: a plain story simply told. Waverley Book co, 1922, p. 400.
188. **Thomson J. A.** Introduction to Science. N. Y., Holt, 1911.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
§ 1. Толкование понятия «геология»	6
§ 2. О толковании понятия «математика» и условиях ее применимости	16
§ 3. О роли математических методов в геологии	24
§ 4. Причины недостаточного влияния математических методов на развитие теоретических представлений геологии.	32
§ 5. Сравнение методологических основ геологии и физики на базе представлений о задачах и моделях	36
§ 6. Современные теоретические представления геологии	45
§ 7. Классы геологических задач, решаемых с помощью математических методов	51
§ 8. Об эффективности и основных трудностях использования математических методов и ЭВМ в геологии	63
Заключение	74
Литература	76

Юрий Александрович Воронин
Эрик Аршавинович Еганов

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ
ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ
В ГЕОЛОГИИ**

Ответственный редактор

Эпaминoнд Эпaминoндoвич Фoтиaди

Редакторы О. З. Каганова, С. А. Садко

Художественный редактор В. И. Шумаков

Художник С. М. Кудрявцев

Технический редактор А. В. Семкова

Корректоры В. К. Михайлова, Г. И. Кравцова

Сдано в набор 24 мая 1974 г. Подписано в печать 9 октября 1974 г. МН 02272. Формат 60×84^{1/16}. Бумага типографская № 1. 5,5 печ. л.=5,1 усл. печ. л.+1 вкл., 5,1 уч.-изд. л. Тираж 3000 экз. Заказ № 110. Цена 37 коп.

Издательство «Наука», Сибирское отделение, 630099. Новосибирск, 99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука», 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

**В СИБИРСКОМ ОТДЕЛЕНИИ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**

готовятся к выпуску следующие книги:

- Панченков А. Н.** Теория потенциала ускорений.
- Чинакал Н. А., Момот П. М.** Щитовая система разработки рудных месторождений.
- Кутателадзе С. С., Рубинов А. М.** Двойственность Минковского и ее приложения.
- Савельев Л. Я.** Комбинаторика и вероятность.
- Лазерные доплеровские измерители скорости.**
- Куркин Ю. Л., Уточкин Б. А.** Элементы и узлы транзисторных скоростных осциллографов.
- Арцимович Г. В.** Влияние забойных условий и режима бурения на эффективность проходки глубоких скважин.
- Скуба В. Н.** Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты.
- Термопластическое упрочнение конструкционных сталей, работающих при низких температурах.**

Книги высылаются наложенным платежом. Заказы направляйте по адресу: 630090, Новосибирск, 90, Морской проспект, 22. Магазин «Наука».

Цена 37 коп.

1113