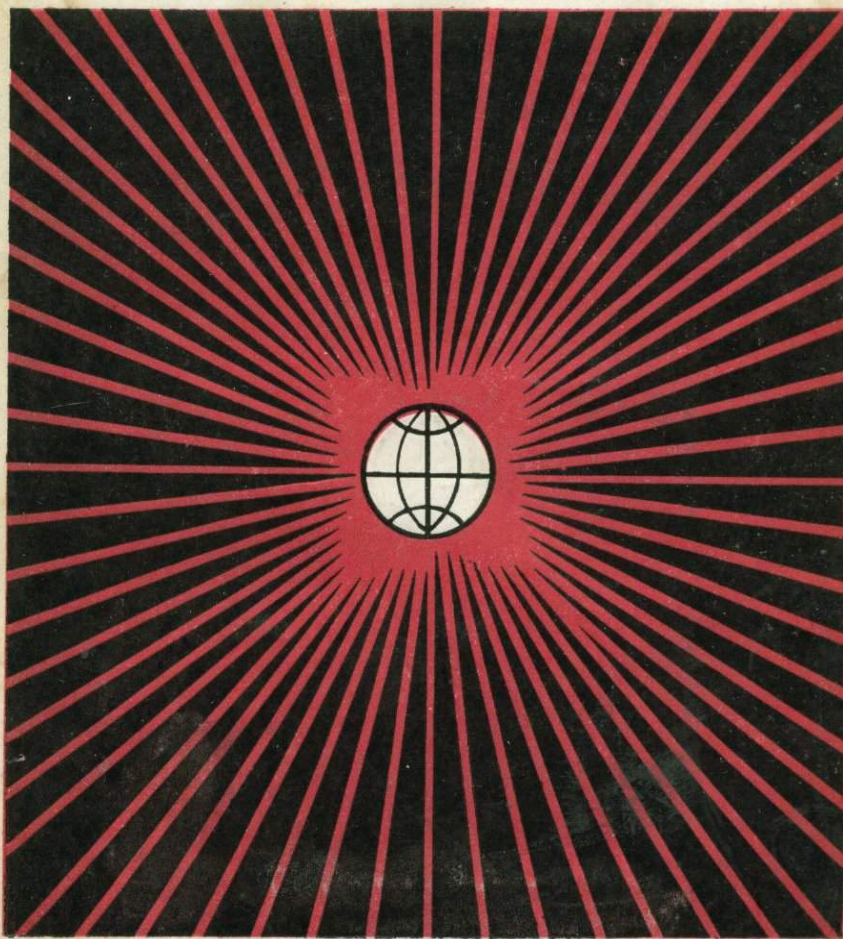


В. Н. Шолпо

**ЗЕМЛЯ
РАСКРЫВАЕТ
СВОИ ТАЙНЫ**



В. Н. Шолпо

ЗЕМЛЯ РАСКРЫВАЕТ СВОИ ТАЙНЫ

550

2954



МОСКВА «НЕДРА» 1979



Шолпо В. Н.

Ш 78 Земля раскрывает свои тайны. — М.: Недра, 1979. — 160 с., 25 ил.

Автор, известный советский геолог, в популярной форме рассказывает об актуальных проблемах современной геотектоники — науки о строении земной коры. На примере остродискуссионных вопросов обсуждаются различные методические подходы к решению проблемы складкообразования и общему развитию подвижных поясов земной коры — геосинклиналей. Дается оценка современных гипотез, рассматривающих эволюцию эндогенных процессов, в результате которых сформировался современный облик Земли.

Ш $\frac{20802-453}{043(01)-79}$ 99-79. 1904030000

551.1

© Издательство «Недра», 1979

ИБ № 3415

ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ ШОЛПО

ЗЕМЛЯ РАСКРЫВАЕТ СВОИ ТАЙНЫ

Редактор издательства Е. К. Семилеткова
Обложка художника Н. И. Шевцова
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
График-иллюстратор Б. А. Руденко
Технические редакторы Л. Г. Лаврентьева, В. В. Соколова
Корректор Е. В. Наумова

Сдано в набор 31.05.79. Подписано в печать 17.08.79. Т-14122. Формат 84×108^{1/32}.
Бумага № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 5,0.
Усл.-печ. л. 8,4. Уч.-изд. л. 8,57. Тираж 100 000 экз. Заказ 30/3415-1.
Цена 25 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

О ЧЕМ ХОЧЕТ РАССКАЗАТЬ АВТОР

Вначале она представлялась людям плоской и не очень большой, лежащей на трех китах, а купол неба, как огромная хрустальная чаша, был опрокинут над нею. Уютный, замкнутый мир. И хотя многие давно подозревали, что это не так, а иные даже пытались доказать это, не было острой потребности в другом представлении о мире. Только 450 лет назад удалось неопровержимо доказать, что Земля круглая. На первое кругосветное плавание потребовалось 3 года, и Земля показалась огромной и неведомой. Началась эпоха бурных исследований дальних стран и морей.

В наше время, когда сверхзвуковой лайнер за несколько часов облетает половину земного шара, а искусственный спутник делает полный оборот за полтора часа, Земля снова представляется нам не слишком уж большой. Весь мир обошли фотографии Земли из космоса, недавно составлен подробный атлас географических карт всей ее поверхности, исследователи проникают в самые далекие и труднодоступные ее уголки. Сменяют друг друга дрейфующие станции «Северный полюс», работают постоянные экспедиции в Антарктиде. И сегодня нам может показаться, что мы достаточно хорошо знаем свой дом: Земля как будто раскрыла нам все свои тайны. Но так ли это на самом деле?

Опыт повседневной жизни убеждает нас в том, что Земля — символ незыблемости, устойчивости. Мы, не задумываясь, едем на работу привычным маршрутом, уверенные в том, что и мост через реку, которую надо пересечь по пути, и расположение кварталов города не изменились со вчерашнего дня. Отправляясь в отпуск, мы твердо рассчитываем на то, что Черное море, как и в прошлом году, будет по-прежнему омывать берега Кавказа и Крыма. Предпринимая даже далекие путешествия — в Австралию или, допустим, в Америку, — мы уверены, что пилот самолета обязательно найдет нужный аэропорт на своем месте.

Но вдруг... Радио и газеты приносят сообщение о крупном землетрясении. Твердь земная сдвинулась с места, разрушены при этом города и поселки, изменился рельеф поверхности в непосредственной близости к эпицентру.

А вот где-то происходит извержение вулкана и вокруг меняется привычный ландшафт. Так было, например, несколько лет назад у берегов Исландии, когда в океане возник новый остров.

Такие события заставляют нас задуматься, — а так ли уж постоянно и неизменно лицо нашей планеты? Жители Северной Европы — Бельгии, Голландии — знают, что без системы дамб огромные территории прибрежных равнин, давно обжитые людьми, были бы поглощены морем. У нас на глазах отступает Каспий, наращивая полосу прекрасного приморского бульвара в Баку и в то же время затрудняя судам подход к порту.

Если же заглянуть в глубь веков и тысячелетий, то мы увидим, что на памяти людей земная суша во многих местах не раз меняла свои очертания. Известный и часто упоминаемый, но очень яркий пример — древний храм Юпитера на берегу Неаполитанского залива, построенный во II в. до н.э. Полуразрушенные колонны этого храма высотой 12 м находятся на берегу, но на высоте от 3,5 до 6 м они источены морскими моллюсками. Значит за два тысячелетия этот участок суши сначала опустился не меньше чем на 6 м, а затем вновь поднялся. Город Упсала в Швеции, выстроенный на берегу моря и бывший в X—XII в. столицей, сейчас находится в 60 км от берега. Заметные изменения рельефа и ландшафта происходят не только по берегам современных морей. Знаменитый Вороний Камень, с которого Александр Невский руководил Ледовым побоищем, в 1242 г. возвышался над окружающей местностью, а сейчас он скрыт под водами Чудского озера, очертания берегов которого стали совершенно иными за прошедшие 700 лет. Итак, исторический опыт показывает, что вовсе не столь устойчива и неизменна наша Земля.

А легендарная Атлантида Платона? Кто не слышал об этом внезапном исчезновении с лица Земли целого государства? Была ли она на самом деле? Скорее всего была, и вряд ли такое подробное, сопровождаемое мно-

жеством конкретных деталей описание построек, жизни и быта атлантов, которое дает Платон, целиком выдумано. Даже в основе самых фантастических сказаний часто лежат вполне реальные события. В легенду надо поверить, как Ф. Шлиман поверил в реальность Трои. Но если Атлантида и была, то где? В первую очередь хочется искать ее в Атлантическом океане, — там, где достаточно пространства для крупного массива суши, да и название наталкивает нас на это. Но может быть правы те, кто считает остатками Атлантиды остров Тира в Эгейском море? Во всяком случае есть много и геологических, и исторических свидетельств того, что совсем недавно, на памяти людей, здесь произошли крупные опускания суши. С вулканом Санторин на острове Тира связано одно из самых крупных извержений, известных на Земле, и случилось это примерно в ту же эпоху, когда происходили опускания суши — около 12 000 лет назад.

Методами подводной археологии установлено, что следы многих древних и древнейших культур захоронены под водами не только внутренних морей, но и уходят в океаны. Это сейчас известно для окраин Атлантического, Индийского и даже для Тихого океана.

Если же обратиться к геологической истории нашей планеты, возникшей 4,5 млрд. лет назад, то нам откроются такие грандиозные преобразования ее облика, что станет ясной необычайная сложность эволюции на всем ее пути. На месте обширных современных равнин некогда были моря, возникали и разрушались горы. Пространства, скрытые сегодня водами морей и океанов, в прошлом были заняты сушей. А современные горные цепи — такие как Кавказ, Урал, Альпы, Гималаи и многие другие — начали подниматься с геологической точки зрения не так уж давно, всего 25—30 млн. лет назад. По масштабам человеческой жизни и даже времени существования человека на Земле — срок огромный, но это всего лишь одна стопятидесятая часть жизни самой Земли.

Геологическими методами удается восстановить географию прошлых геологических эпох, с большей или меньшей достоверностью разумеется, и главным образом на территориях современных континентов, где мы можем довольно далеко заглянуть в глубь истории Земли. Во всяком случае с некоторой долей уверенности

мы можем судить о распределении суши и моря за последние 600 млн. лет (опять заметим, что это всего лишь одна седьмая часть возраста Земли), а события более ранних этапов вырисовываются с гораздо меньшей определенностью. Но так или иначе геологи могут реконструировать некоторые части истории Земли и сказать, что происходило на ее поверхности, а в некоторых случаях и как. Однако ответы на вопрос почему большей частью остаются спорными, неоднозначными.

В чем причина движений земной коры? Каковы движущие силы процессов, изменяющих облик Земли? Что лежит в основе преобразований, которые происходят в самой верхней оболочке нашей планеты — земной коре? Вокруг этих и подобных вопросов разгораются жаркие споры, кипят страсти. Выдвигаются и отбрасываются разные гипотезы, постепенно через борьбу мнений, столкновение разных, нередко противоположных, взглядов продвигается геология к установлению причинно-следственных связей различных явлений и процессов, определяющих развитие Земли. Далеко не все ясно в этих сложных вопросах и сегодня. О многом можно высказать только более или менее вероятные предположения. Но тем не менее какие-то главные закономерности эволюции и строения Земли можно считать установленными и сейчас.

Всякое научное исследование — и область геологии не исключение — можно сравнить с работой детектива. По отдельным, часто разрозненным данным — «следам» надо составить цельную, связную картину происшедшего. По имеющимся данным строится версия — гипотеза, которая обязательно должна проверяться «на прочность»; выдвигаются альтернативные гипотезы, из ряда гипотез выбирается наиболее вероятная, правдоподобная, и тогда для ее проверки целенаправленно собираются новые факты. Но на какой-то стадии поиска нужно сделать окончательный вывод.

Поиск геолога, как и всякого естествоиспытателя, никогда не может кончиться. Тайна никогда не может быть раскрыта до конца, а каждый решенный вопрос порождает тысячи новых, которые предстоит решать. От других естествоиспытателей геолога отличает то, что он с трудом может воспользоваться «следственным экспериментом». И в си-

лу того, что время, которым он располагает в лаборатории, мало и несоизмеримо с продолжительностью процессов, протекающих в природе, и что многие исходные данные о свойствах и характере участвующих в процессе веществ утрачены безвозвратно и навсегда — переработанные более поздними процессами, горные породы необратимо меняют свой облик и свойства. Но тем не менее эти трудности приходится, и просто необходимо, преодолевать. Атмосферу непрерывного поиска, азарта в погоне за ответом на сложные вопросы, которые задает нам природа, автору и хотелось передать.

Поверхность планеты меняется не сама по себе, это обусловлено какими-то процессами, происходящими в ее недрах — земной коре, и еще глубже — в верхней мантии. Кое-что нам известно об этих процессах, но вряд ли кто осмелится утверждать определенно, что именно происходит в глубоких недрах.

О том, что мы знаем и чего не знаем о строении и развитии Земли, и написана эта книга. Однако не следует искать в ней систематического изложения основ общей геологии или какой-либо другой геологической дисциплины. Здесь нет даже попытки дать сколько-нибудь полный перечень главных проблем, решением которых заняты геологи. Для того чтобы получить представление о сложном здании современной науки о Земле, о методах исследования, которыми пользуются геологи в разных областях науки, можно рекомендовать другие книги, в том числе и популярные. Здесь же автору хотелось в доступной и, по возможности, занимательной форме рассказать только о некоторых, наиболее спорных с точки зрения автора, «горячих» проблемах, стоящих перед геотектоникой — наукой, вскрывающей основные закономерности движений земной коры и пытающейся в то же время понять механизм и причины этих движений. Поскольку геотектоника использует данные всех других отраслей геологии и объединяет их, сочетая с собственными методами исследования, выводы ее носят достаточно общий характер, а решение основных проблем часто лежит на стыке многих геологических наук. И в свою очередь результаты, которые мы получаем в геотектонике, имеют значение не только для нее самой, но и для многих отраслей геологии, в том числе и прикладных, чисто практических ее ветвей.

Иногда бывает полезно, оторвавшись от повседневности привычных дел и обязанностей, задуматься об общем состоянии твоей науки в целом. Не претендуя на полноту и глубину такого анализа, автор хочет поделиться своими размышлениями на темы, которые, может быть, имеют более общее значение, выходящее за рамки наук о Земле.

Не скованный рамками строгой научной публикации, автор считает возможным дать кое-где некоторую свободу своей фантазии и помечтать о будущем развитии наук о Земле, при этом всемерно стараясь ни в коем случае не вводить читателя в заблуждение, всякий раз отмечая, что действительно известно, что можно с большой вероятностью предположить, а о чем можно только догадываться. Поэтому предлагаемая читателю книга расскажет только о некоторых разгаданных и неразгаданных тайнах Земли, а также о том, как их раскрывают геологи.

ЧТО ИЩЕШЬ, ГЕОЛОГ?

КАЖДЫЙ ДОЛЖЕН ИСКАТЬ...

Как только новые знакомые или просто случайные попутчики узнают, что я геолог, обычно сразу же спрашивают: «Что ищете?» И чаще всего на этот вопрос ждут такого же краткого и конкретного ответа — уголь или нефть, полиметаллы или железо, золото, наконец. Считается естественным и даже необходимым, что геолог должен искать месторождения, открывать новые запасы полезных ископаемых. Практическая задача геологии — увеличивать и расширять запасы пригодных для использования минеральных богатств Земли — совершенно ясна, общеизвестна и понятна. Но лишь немногие геологи смогут так просто и кратко ответить на поставленный вопрос, потому что непосредственно поисками месторождений полезных ископаемых занимаются только некоторые из них. И, вероятно, со временем таких геологов будет становиться все меньше. А почему? — Об этом как раз и поразмышляем.

Огромная армия геологов изучает разные районы нашей страны, все больше и больше увеличивая детальность изучения (рис. 1): В результате этой работы составляются геологические карты различных масштабов. Только после того, как составлена детальная геологическая карта, можно грамотно и эффективно вести поиски полезных ископаемых. Большой частью эти два направления деятельности геологов — геологическое картирование и поиски — настолько тесно связаны между собой, что обе задачи выполняются одними и теми же геологами. Эти задачи имеют непосредственное отношение к производственной деятельности человека и образуют главную сферу действия прикладной геологии.

Эта сфера включает в себя не только практические приемы и постоянно накапливающийся опыт, но и самые различные методические разработки и исследования. Комплексное использование и сочетание разных методов — от традиционной работы геологов в маршрутах



Рис. 1. Обнажение песчано-сланцевых пород в ущелье Горного Дагестана

с молотком и компасом в руках до аэро- и космосъемок земной поверхности— актуальная задача прикладной геологии.

В сферу прикладной геологии, кроме того, входят задачи, не связанные с поисками и разведкой полезных ископаемых. Это геологическое обслуживание крупных строительных объектов, прогноз сейсмической опасности там, где развиваются промышленность и строительство. Сюда же относится предсказание результатов любого вмешательства человека в природу: например при строительстве плотин и каналов, оценке физических свойств горных пород, используемых в различных промышленных областях и т. д. Таким образом, перед прикладной геологией встает огромное число разнообразных вопросов,

«Геолог, который проводит долгие годы наедине и интимно с природой, всегда поставлен беседовать с ней с глазу на глаз, причем природа в этой беседе постоянно оказывается более разумной», — писал известный немецкий геолог Ганс Клоос. Ответы, которые получает геолог в этой беседе, и картина, которую он создает в результате, зависят от задаваемых вопросов. «Имеющийся материал молчит, когда его не спрашивают», — в этом образном выражении суть работы любого геолога, чем бы он ни занимался.

Многие геологи на вопрос «Что ищете» часто не смогут ответить сколько-нибудь вразумительно человеку, совсем не знакомому с геологией. Но это не значит, что они ничего не ищут. Геологи, конечно же, ищут всегда, хотя не обязательно месторождения. Часто цель поисков — решение проблем теоретической геологии. Среди многообразия таких проблем главнейшей представляется создание теории внутренних (эндогенных) процессов, управляющих развитием Земли. Такая теория должна связать воедино данные о поверхностном геологическом строении нашей планеты с данными об устройстве ее глубин. Но это только первая часть задачи. Вторая — заключается в том, чтобы дать цельную, непротиворечивую картину развития Земли, показать движущие силы и процессы, меняющие облик планеты, и объединить их в стройную систему. В задаче создания теории внутренних процессов, управляющих развитием Земли, умещаются все ветви и побеги многочисленных геологических дисциплин, и она составляет сферу приложения теоретической геологии. (Здесь нет места только для тех направлений, которые склонны

считать главными и определяющими для развития Земли силы, воздействующие на нее извне, из космоса, — это так называемые астрогеологические концепции. Они занимают особое место среди геологических наук и, может быть, вовсе не должны к ним относиться.)

О различных проблемах теоретической геологии тоже можно рассказать много увлекательного. Но сейчас нас интересует, каковы взаимоотношения между двумя крупными разделами геологии — практической и теоретической.

ОТВЕТ НА ВОЗМОЖНЫЕ ВОЗРАЖЕНИЯ

Кто хоть немного знаком с геологией, может задать вопрос: «Не будет ли разделение геологии на прикладную и теоретическую схоластической, искусственной схемой?» Действительно, в своей практической деятельности любой геолог, чем бы он ни занимался, использует всю сумму накопленного геологией опыта. Очень часто ему приходится опираться и на интуицию. Уже на первых стадиях обобщения собранных данных привлекаются методы научного анализа и синтеза. В любой сфере деятельность геолога оказывается сложным сочетанием ремесла, искусства и науки. И не всегда можно точно установить пропорции этих компонентов. Любые классификации геологических дисциплин (а их предлагалось очень много) обнаруживают, какие сложные, многосторонние связи существуют между ними, как сложна иерархия всех многочисленных разветвлений единой науки о Земле — геологии (рис. 2). Часто такие классификации изображают на диаграммах. Когда рассматриваешь такую диаграмму, видно, насколько трудно отделить ветви чисто практического направления от теоретического. А некоторые, например металлогению и учение о рудных месторождениях, просто придется ломать при таком делении.

Однако если судить по результатам работы, то разделение геологии на прикладную и теоретическую вполне правомерно. В первой — результат обычно реален, осязаем. Это всегда нечто вещественное: какое-либо месторождение, геологическая карта какой-то террито-

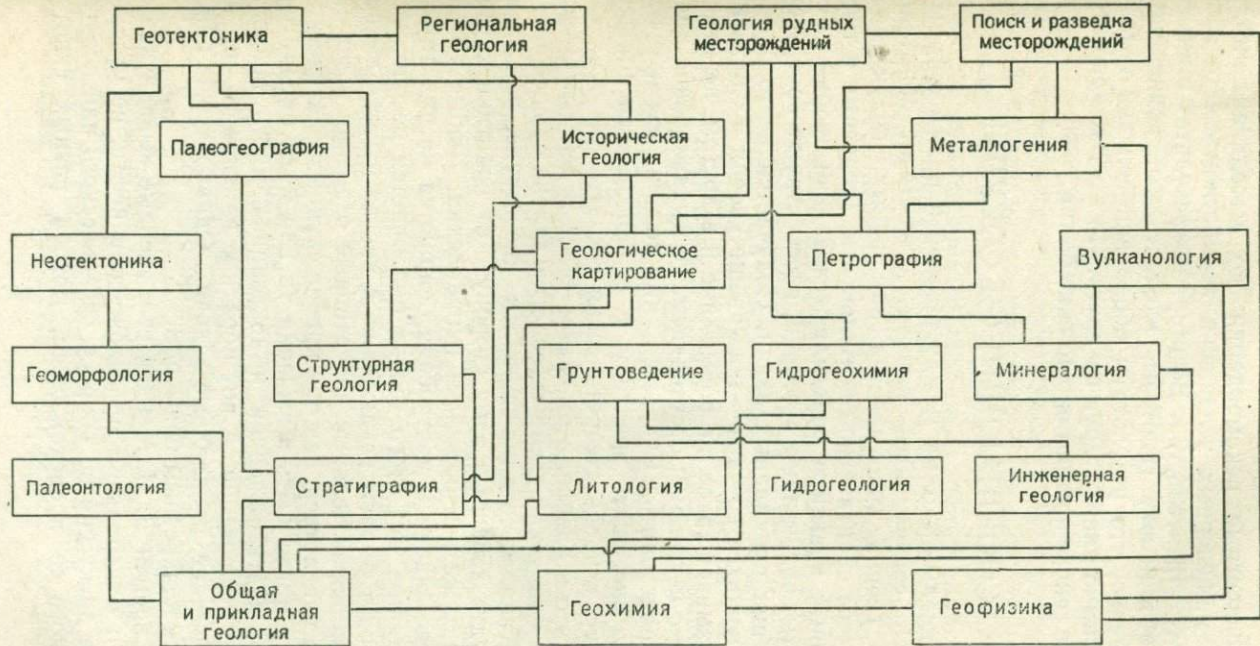


Рис. 2. Схема взаимоотношений различных ветвей геологической науки

рии, конкретные рекомендации по методике поиска, оценка инженерных условий в конкретном месте для какого-то строительства. Во второй — результаты иные. Это — обобщения, гипотезы, идеи, схемы, концепции. Естественно, что результаты обоих направлений геологии взаимно влияют друг на друга. Но как? Каково это влияние сейчас и каким оно должно быть?

СООБЩАЮЩИЕСЯ СОСУДЫ

В идеальной схеме между теорией и практикой, выражаясь современным языком, существует обратная связь. Теория основывается на данных, полученных в процессе практической деятельности; запросами и требованиями практики определяются задачи теории. Результаты, полученные в теории, способствуют прогрессу в решении прикладных задач. Получается нечто вроде сообщающихся сосудов — повышение уровня в одном из них вызывает такое же повышение и в другом, не мгновенное, с некоторым отставанием, но выравнивание должно происходить. Считается, что теория должна несколько опережать практику, т. е. пополняться должен в первую очередь «теоретический сосуд».

Но это в идеале, а на самом деле? В действительности на деле такая схема в геологии далека от совершенства. Каналы, соединяющие эти два сосуда, работают как будто хорошо в одну сторону — от практики к теории, и хуже — в обратном направлении. Любые теоретические задачи и построения опираются на практические данные. Без этого теория оказывается бесплодной. Хотя и тут бывают исключения, а иногда мы наталкиваемся на поразительные интуитивные озарения и можно только удивляться, как при крайне скудных фактических данных могла быть высказана та или иная смелая гипотеза, подтвержденная и доказанная много позднее. Но это исключения. А вот обратное влияние теории на практические, прикладные задачи... Однако лучше обратимся к конкретным примерам.

Со времен Д. И. Менделеева, впервые выдвинувшего идею о минеральном происхождении нефти, не утихает острая дискуссия по вопросу органического или неорганического ее происхождения. Борьба разных гипотез

полна драматизма и напряжения, доводов в пользу той или другой концепции приводится очень много. Однако ни та, ни другая гипотезы не имеют решающих аргументов, и, думается, спор и сейчас не разрешен окончательно.

Наиболее сложным в обоих случаях остается вопрос о химической эволюции первичного вещества, дающей в конечном счете сложную смесь углеводов. Изотопный состав элементов говорит как будто целиком в пользу органического (биогенного) происхождения нефти, а размещение нефтяных месторождений и приуроченность нефтепроявлений к определенным типам геологических структур как будто бы легче понять, если принять ее неорганическое (абиогенное) происхождение.

А как же влияют споры о происхождении нефти на практику поисков, разведки и разработки нефтяных месторождений? Да почти никак. На наших глазах нефтяная геология достигла выдающихся успехов: открыто второе Баку в Поволжье, превосходящее первое по запасам, а месторождения в Западной Сибири по запасам превышает многие ранее известные месторождения. Открыты месторождения в кембрийских отложениях Восточной Сибири. И все это сделано независимо от того, каких взглядов придерживались геологи-открыватели — органического или неорганического происхождения нефти. Сами исполнители этих работ будут, наверно, возмущены таким заявлением автора, поскольку считают, что успехи доказывают правоту той или иной гипотезы. А сторонники органического происхождения нефти — в большинстве. Но хорошо известно, что в науке спорные вопросы никогда не решаются большинством голосов.

Почему же создалась такая ситуация — кардинальный вопрос теории не решен, а для практики это не имеет большого значения? Дело в том, что нефть своеобразное полезное ископаемое. Это легкое, очень подвижное вещество, которое не остается на месте своего зарождения, а мигрирует в толще горных пород, используя трещины, поры и образуя скопления в специфических природных ловушках. Районы с благоприятными условиями для образования скоплений нефти более или менее похожи друг на друга — это районы, где развиты

куполовидные вздутия в слоях земной коры. Иногда такие структуры обнаруживаются на поверхности, иногда скрыты на глубине. Таким образом, задачи практической нефтяной геологии сводятся к тому, чтобы понять закономерности миграции нефти, уметь отыскивать перспективные ловушки, обнаруживать и прогнозировать пласты, способные впитать нефть, — так называемые коллекторы. А откуда она пришла, где и как зародилась, — оказывается сейчас не так уж и важно.

Другой пример. Борьба вокруг гипотез о движущих силах и причинах тектогенеза, т. е. образования и развития структур земной коры. Дрейф континентов, гигантские горизонтальные перемещения континентальных плит или вертикальные колебания отдельных блоков земной коры при относительно стабильном положении континентов на поверхности планеты? Короче говоря, это спор между «мобиристами» и «фиксистами», возникший достаточно давно и разгоревшийся в наши дни с новой силой. Доводы за и против обсуждаются на многих научных конференциях, симпозиумах, совещаниях. Дискуссия находит свое отражение в многочисленных научных публикациях: в статьях и книгах и на страницах научно-популярной литературы эта дискуссия освещается достаточно широко. Геологическое общественное мнение не раз склонялось в пользу то одной, то другой точки зрения. Очевидно, приверженцы ни той ни другой концепции не располагают исчерпывающими доказательствами, которые позволили бы отбросить одно и безоговорочно принять другое. А ведь от решения этого спора зависят очень многие важные представления. Какова связь поверхностных структур земной коры с глубинными? Устойчивы и закономерны эти связи или изменчивы и непостоянны? Какими силами и как сформированы складчатые пояса на поверхности Земли? Закономерен или случаен рисунок поверхности нашей планеты?

Но так ли уж важно сейчас знать ответы на эти вопросы, чтобы успешно разведывать то или иное месторождение, вести поиск каких-то полезных ископаемых? С некоторым смущением надо признать, что нет, не так уж важно. Геологи ищут и находят залежи руды, угля, строительных материалов независимо от того, какие «приливы» и «отливы» происходят в этой дискуссии.

Тогда, может быть, надо пойти дальше и признать, что эти и подобные вопросы, которые занимают многих геологов, являются предметом чистой науки? Есть, может быть, и в геологии «башня из слоновой кости», где существует «наука для науки». Она удовлетворяет естественный, свойственный человеку инстинкт познания, а к развитию человеческой цивилизации все это отношения не имеет. Так ли это?

ФАНТАСТИКА И РЕАЛЬНОСТЬ

«...Земной шар представляет следующую картину. Верхний его покров состоит из застывших гранитов и диоритов, толщиной от пяти до двадцати пяти километров. Эта корка снаружи покрыта морскими отложениями и слоями погибшей растительности (уголь) и погибших животных (нефть). Кора лежит на второй оболочке земного шара — из расплавленных металлов — на Оливиновом поясе...

2954
...В расплавленном Оливиновом поясе нужно различать три слоя: ближайший к земной коре — это шлаки, лава, выбрасываемая вулканами; средний слой — оливин, железо, никель, то есть то, из чего состоят метеориты, падающие в виде звезд в осенние ночи, и, наконец, третий — нижний слой — золото, платина, цирконий, свинец, ртуть...» Это дневники горного инженера Манцева из романа А. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина». На этих теоретических представлениях об устройстве глубин Земли основывал жестокий авантюрист Гарин свои планы покорения мира. Теория здесь двигала практику. Другое дело, что строение земного шара, предложенное Манцевым, неверно и схематично, хотя и отвечает некоторым представлениям, существовавшим в начале века. Сейчас мы знаем о строении Земли много больше, и еще больше возникает новых вопросов. Главное здесь заключается в том, что представление о глубинном строении Земли, об устройстве нашей планеты в целом рождает грандиозный проект, охватывающий тоже всю Землю. Другой вопрос, какие цели у этого проекта и способы его осуществления. Не это фантастика. А реальность?

«Всемерно развивать фундаментальные и прикладные научные исследования... Обеспечить проведение ис-

следований в области геологии, геофизики и геохимии для выявления закономерностей размещения полезных ископаемых, повышения эффективности методов их поиска, добычи и обогащения...» — записано в «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы», утвержденных XXV съездом КПСС, и это — реальность. Фундаментальные как раз и означает теоретические, и те дискуссионные проблемы, которые мы упоминали, имеют к этому прямое отношение. И та задача, вокруг которой объединяются теоретические направления геологии, — создание теории эндогенных процессов — становится насущной, злободневной задачей сегодняшнего дня.

СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

Из приведенных примеров мы видели, как мало влияет сегодня на практику состояние этих и подобных им теоретических вопросов. Но уже в самые ближайшие годы ситуация должна коренным образом измениться. Поверхность суши на Земле изучена (за немногими исключениями) довольно детально, и открывать крупные месторождения на поверхности становится все труднее. Поиски должны уходить на глубину, что сильно усложняет и удорожает их. Если раньше можно было позволить себе роскошь искать почти наугад, когда поиск месторождений был связан только с трудными, но все же осуществимыми маршрутами по поверхности Земли, то теперь наудачу бурить дорогостоящие скважины а тем более проводить капитальные горные выработки, невозможно. А проникать все глубже в недра люди будут вынуждены, чтобы обеспечить минеральным сырьем развивающуюся промышленность, поддерживать на необходимом уровне энергетическую базу. Уже сегодня актуальной задачей стало освоение шельфовых областей, где обнаружены нефтяные месторождения, россыпные залежи металлов. На очереди — глубины океанов.

Для успешного, эффективного решения этих задач становится необходимым решение кардинальных проблем геологии — так ответ на вопрос о происхождении нефти может дать правильную оценку перспективности акваторий. Если нефть — продукт дифференциации глу-

бинного вещества Земли, то надо трассировать и прощупывать на морском дне крупные расколы в земной коре и районы вблизи них. Если же нефть органического происхождения, то надо реконструировать условия жизни прошлых эпох и установить места скопления остатков живых организмов. В этой связи тот факт, что нефтью пропитаны некоторые магматические гранитные массивы в Венесуэле, хотя и не приобретает практического значения, но важность его в решении вопроса о происхождении нефти трудно переоценить. Легкая светлая нефть (почти бензин!), которая откачивается из отложений кембрия в Восточной Сибири, т. е. прямо из тех осадочных пластов, которые лежат непосредственно на кристаллическом фундаменте, тоже приобретает значение факта первостепенной важности.

В происхождении такого сложного природного образования, как нефть, вполне возможно принимают участие как органические вещества, продукты жизни, захороненные в осадочных породах, так и вещества, поступающие в верхние горизонты коры из глубоких недр. Подобно тому, как состав газов и солей во многих минеральных источниках является сложной комбинацией глубинных и поверхностных компонентов.

Точно также совсем не безразлично, если иметь в виду стоящие перед нами практические задачи, как решается вопрос об источниках сил, управляющих процессами развития Земли, формирования структур земной коры. Если полагать, что первопричиной преобразований на поверхности являются гигантские горизонтальные перемещения континентальных масс, мы представим себе строение глубинных частей земной коры одним образом. Если же признать первичность вертикальных движений и в этом видеть источник деформаций и иных преобразований пород на поверхности, то глубинное строение коры и мантии Земли представится совсем иначе. По-разному будет выглядеть и расположение глубинных разломов в земной коре, по-разному будут двигаться поднимающиеся магматические расплавы и сопровождающие их рудоносные растворы, разное положение они займут в поверхностной структуре. От концепций, которых мы придерживаемся, зависит в какой-то мере признание тех или иных закономерностей в раз-

мещении месторождений. Хотя на первый взгляд кажется более правильным обратное утверждение — закономерности распределения месторождений должны влиять на наши концепции, но мы часто видим, когда одни и те же факты интерпретируются совершенно различными способами в зависимости от убеждений исследователей. А завтрашний день прикладной геологии заставляет нас решать теоретические вопросы сегодня.

Практическая геология вслед за теоретической будет в ближайшие годы уходить все глубже в недра Земли. Это потребует не только теоретических основ, но и новой сложной техники аппаратуры для получения информации с далеких глубин. Поэтому со временем будет становиться все меньше и меньше геологов, которые смогут коротко и просто ответить на вопрос: «Что ищите?»

ЕЩЕ НЕМНОГО ФАНТАСТИКИ

Электронно-вычислительная машина, вобравшая в себя всю информацию о геологическом строении приповерхностной части какого-либо участка земной коры и способная выдать серию исторических карт, где словно кадр за кадром можно проследить последовательные стадии геологического развития этого участка — это не фантастика. Такие машины уже есть сегодня. Результативная, суммирующая карта даст прогноз о глубинном строении земной коры в данном месте гораздо более строгий и объективный, чем это получается при обычных умозрительных экстраполяциях геологической карты. Понятно, что деятельность таких реконструкций зависит от детальности исходных фактических данных.

Существует простое правило: чем более крупную структуру мы рассматриваем на земной поверхности, тем более глубокие корни она должна иметь, а следовательно, тем более глубокие части земной коры мы можем реконструировать. Если представить себе теперь, что мы имеем возможность перерабатывать с помощью ЭВМ геологическую информацию о строении крупных регионов, целых континентов или обширных площадей океанов, то, вероятно, нам удастся получить представление о строении глубоких частей земной коры с той же

степенью детальности, с какой мы знаем строение поверхности. Достаточно ясно, что, овладев таким или подобным способом познания земных недр, мы будем с минимальными побочными затратами и максимальной эффективностью брать из них все, что нам нужно. Само собой разумеется, что в программу такого анализа должны быть заложены наши теоретические модели о процессах, формирующих структуры в земной коре. Машине должно быть известно, какие преобразования в недрах возможны, а какие запрещены.

До 1900 г. доля потребления нефти была едва заметна по сравнению с углем, а к концу 60-х годов XX в. нефть вместе с горючими газами составляет около 70% в общем балансе энергетических ресурсов мира. Это знаменательно. Однако запасы горючих ископаемых ограничены, даже если включить в общий баланс площади шельфов. Кроме того, уже и сегодня ясно, что использовать уголь и нефть только в качестве энергетического сырья — крайне расточительно. Ведь эти ценнейшие природные образования могут служить отличным сырьем для химической промышленности. При этом более полно будет перерабатываться само вещество, а атмосфера Земли не будет загрязняться продуктами их сгорания. А это, как известно, тоже одна из насущных проблем, которую человечество должно решать в ближайшее время.

Уголь и нефть в энергетике должны быть чем-то заменены. Сейчас ученые видят пять основных источников энергии, способных удовлетворить потребности человека в будущем: солнечная энергия с прямым использованием, солнечная энергия с косвенным использованием (ГЭС), энергия приливов, ядерная энергия, геотермальная энергия. Разумеется, очень трудно определенно предсказывать, какую роль будет играть каждый из этих источников в энергетике будущего. Но к геологии непосредственное отношение имеют два последних из них. Ядерная энергия — это прежде всего вопрос сырья и месторождений. А вот термическая энергия земных недр используется уже и сейчас для выработки электроэнергии или непосредственно для отопления. В основном это тепловая энергия вулканов и горячих источников. Однако эта энергия используется еще незначительно. Действующие установки для отбора геотермической энер-

гии в Исландии, на Камчатке, в Калифорнии, в Италии имеют пока чисто местное значение. Кажется совершенно ясным, что для более полного использования энергии земных недр недостаточно просто знать геотермический режим в том или ином месте. Для этого нужна разработанная теория физико-химических процессов, происходящих в земной коре, т. е. теория эндогенных процессов.

Очень важные и сложные задачи перед теорией эндогенных процессов встают в связи с проблемой воды. Баланс поверхностных вод уже сейчас во многих районах не удовлетворяет развивающуюся цивилизацию. Использование водоносных горизонтов осадочной толщи тоже не всегда может спасти положение. Видимо, в обозримом будущем наряду с опреснением вод океана надо будет решать вопросы происхождения воды на Земле вообще, проблемы ювенильных или глубинных вод, запасов воды в глубоких частях коры и мантии Земли. А это снова приводит нас к теории эндогенных процессов.

Общие закономерности размещения месторождений могут решаться на научном уровне только в глобальном масштабе. Замечено, что рудные месторождения приурочены к горным складчатым поясам (это не означает, разумеется, что только там мы их и видим). Причем те из них, которые протягиваются в меридиональном или близком к нему направлении, относительно богаче по видам полезных ископаемых и по их запасам, чем широтные горные пояса. Это наблюдаемая, но еще не объясненная закономерность. Для того чтобы понять в чем здесь дело, опять-таки нужна разработанная и максимально отвечающая природе концепция развития Земли. Может быть, это тот пробный камень, который должен будет разрешить спор «мобилистов» и «фиксистов».

Каждая из схематично очерченных здесь проблем будущего приводит нас к тому, что разрешена она может быть только на основе разработанной геологической теории. Не в таком уж далеком будущем грани между теоретической и практической геологией сотрутся и разделить сферы их деятельности даже искусственно будет невозможно.

Пользуясь открытыми и познанными закономерно-

стями развития и строения Земли, мы будем брать из недр то, что нам нужно. На службу человечеству будут поставлены изученные процессы преобразования земных недр, и, если дать волю фантазии, то можно себе представить, что люди смогут управлять хотя бы некоторыми из грандиозных глубинных процессов. И все это будет достигнуто на основе единой комплексной науки о Земле — геологии, объединившейся вновь с геохимией и геофизикой. Такую науку принято называть геонимией. Нет, однако, сомнения в том что на какую бы высокую ступень развития ни поднялась геология, природа в диалоге с геологом всегда останется неисчерпаемой и в этом залог прогресса.

ЗАГАДКИ СКЛАДОК

ГОРЫ И СКЛАДКИ

Каждый, кому доводилось бывать в горах, наверняка обращал внимание на то, что слои осадочных горных пород в стенах скалистых ущелий редко лежат горизонтально. Чаще всего чередующиеся пласты разного состава — песчаники, известняки, мергели — залегают наклонно или, как говорят геологи, «падают» под тем или иным углом к горизонту. А когда угол поверхностей напластования с горизонтом составляет 90° , то говорят, что пласты стоят «на головах». В каких-то случаях удастся увидеть сами перегибы пластов — иногда простые и пологие, иногда причудливые, крутые и сложные. Это и есть складки в осадочных горных породах. Необычайно велико разнообразие их форм и размеров: от простых и пологих изгибов слоев до сложных фестонов, многократно изогнутых в разных направлениях, и от складок, измеряемых сантиметрами и даже долями сантиметра до складок на многие километры и даже десятки километров в поперечнике. И если небольшие по размерам единичные складки можно часто увидеть в одном обнажении — стенке горного ущелья, то более крупные иногда удастся установить только при картировании большой территории (рис. 3, 4, 5, 6).

Приходится по-разному и называть различные по размеру и по сложности складки. Изгиб слоев, обращенный выпуклостью вверх, называют антиклинальной складкой или антиклиналью; изгиб, обращенный выпуклостью вниз, — синклиальной складкой или синклиалью*. Система или серия складок, их сочетание, при котором слои образуют в целом выпуклую в поперечном разрезе или приподнятую в осевой части структурную форму, называется антиклинорием, а такое же сочетание обратной формы называется синклинори-

* В основе этих терминов греческие корни: слои в антиклинали падают в разные стороны и поэтому «анти», в синклинали слои наклонены навстречу друг другу — «син», а «клинос» — угол.

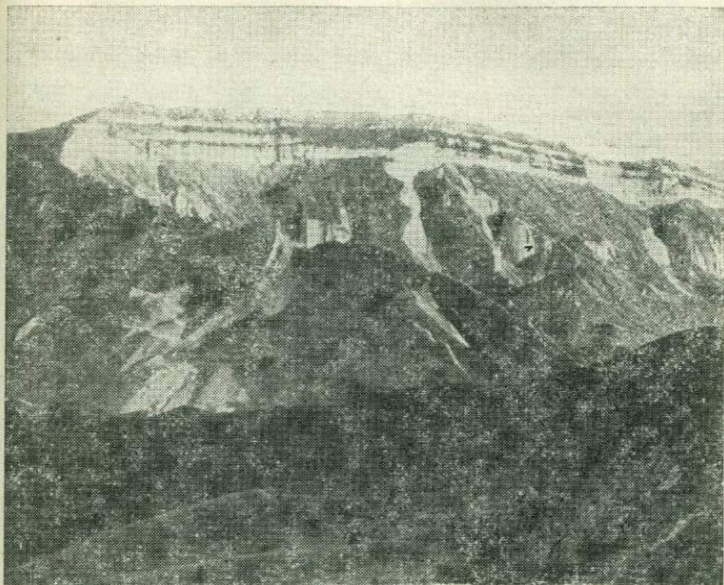


Рис. 3. Коробчатая антиклиналь, сложенная слоями известняков, в долине р. Кара-Койсу в Известняковом Дагестане

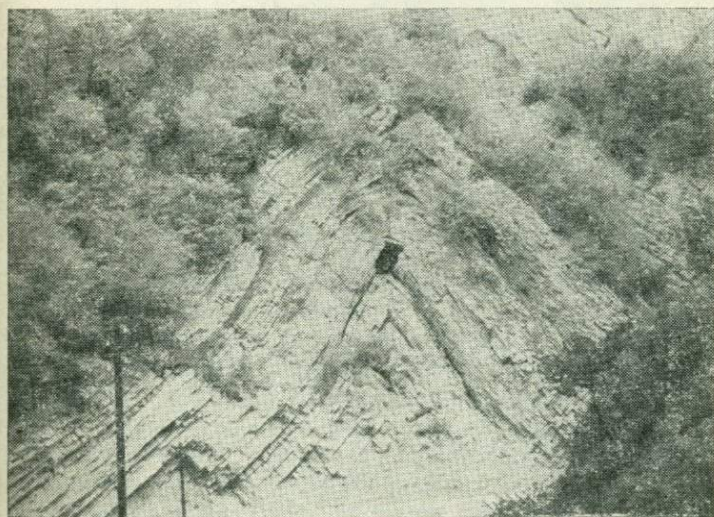


Рис. 4. Складки в стенках ущелья р. Рис-ор в Дагестане, образованные слоями песчаников



Рис. 5. Симметричная антиклинальная складка в ущелье р. Тутхун на Малом Кавказе

ем. Огромные по площади, но очень пологие изгибы слоев на равнинах называются антеклизмами и синеклизмами. Иногда гигантские антиклинории, такие как вся горная система Главного Кавказского хребта, состоящая в свою очередь из целого ряда антиклинорий и синклинорий, называются мегантиклинорием.

Не случайно мы начали этот разговор с упоминания о горах. Именно горные страны, такие как Кавказ, Карпаты, Альпы, Урал, горные цепи Средней Азии, образуют на поверхности современной Земли складчатые области, составляющие целые складчатые пояса. На обширных пространствах равнин (Русская равнина, Западно-Сибирская низменность) слои осадочных пород большей частью лежат почти горизонтально; лишь изредка такое спокойное залегание пластов нарушено изгибами, однако, как правило, гораздо более простыми, чем те, которые наблюдаются в складчатых облас-

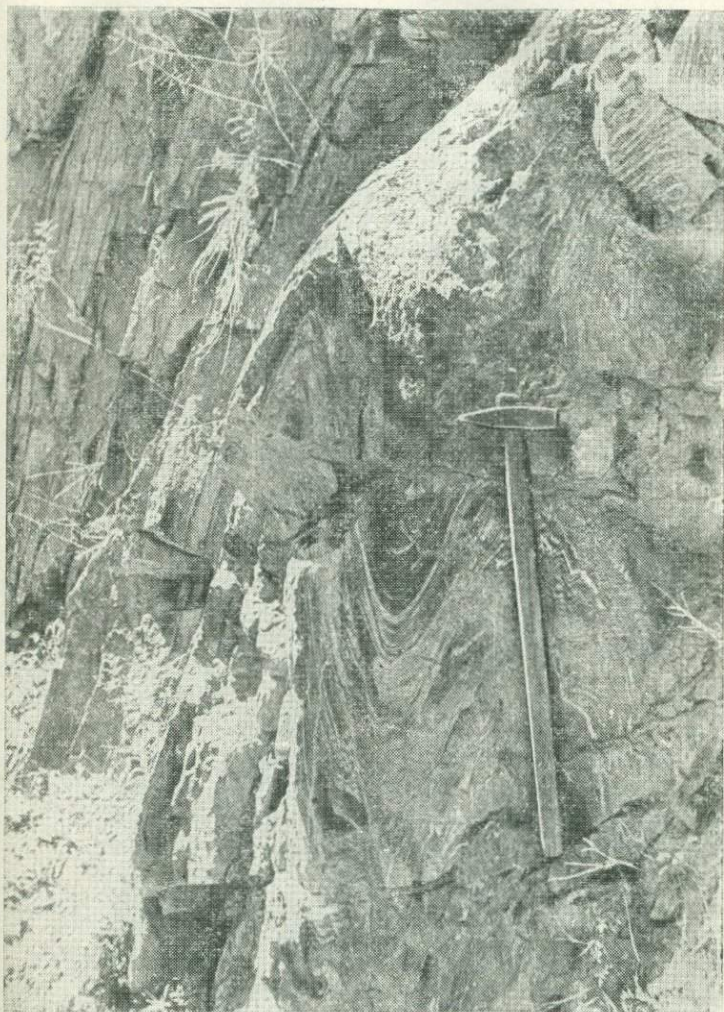


Рис. 6. Мелкие складки в метаморфических сланцах. Сванетия

тях. Под практически горизонтальным осадочным чехлом равнин залегает древний кристаллический фундамент, породы которого смяты обычно в очень сложные складки. Следовательно, складки в горных породах распространены повсеместно на Земле, по крайней мере на континентах. Но только в горных областях они оказываются на поверхности Земли, а на равнинах скрыты под молодыми осадочными толщами.

Ну, а почему все-таки — загадки складок? В чем их загадочность? Давайте задумаемся. Ведь перед нами толщи каменных горных пород, часто это огромные скальные массивы. С детства мы привыкли слышать «крепкий как камень», «твердый как скала». Камень — символ прочности, жесткости, но и хрупкость его — свойство, к которому мы привыкли в обыденной жизни. И вдруг мы видим, что каменные слои, прочные и твердые сегодня, оказываются смятыми, образуют причудливые изгибы так, словно это гигантские нагромождения слоеного теста. Как это могло произойти? В результате действия каких сил и процессов сдвинулись с места эти огромные массы горных пород, образовав целые складчатые системы и пояса? Это как раз и есть одна из загадок, которые вот уже почти двести лет волнуют геологов и порождают острые дискуссии. Бурные споры, столкновения различных точек зрения не затихают и в наши дни. До сих пор нет общепризнанного однозначного ответа на эти вопросы. В зависимости от ответов на эти вопросы исследователи разделяются на группы, отстаивающие часто прямо противоположные точки зрения на происхождение складок.

СКЛАДКИ — ОСТАТОЧНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Прежде чем говорить о различных гипотезах происхождения складчатости, стоит задуматься, а почему эта проблема относится к числу тех «проклятых» вопросов, над разрешением которых бьются поколения геологов уже много десятков лет. Дело все в том, что, наблюдая складки в природе, геолог видит только конечный результат процесса — остаточную деформацию, запечатленную в горных породах. Единственное, достаточно

точно и определенно известное, это то, что первоначально слои осадочных горных пород лежали горизонтально, поскольку чаще всего это осадки, образовавшиеся в морских водоемах. Слой за слоем миллионы лет они накапливались на дне морей, постепенно формируя пакки огромной толщины, или мощности, как говорят геологи. Мощность осадочных толщ в горных областях измеряется многими сотнями и часто тысячами метров. Все остальное, кроме того, что эти мощные осадочные толщи были первоначально горизонтальными, надо представить себе, восстановить по каким-то признакам. По облику складок надо понять причины, вызвавшие деформацию, и попытаться выяснить весь ход процесса. А очень важные факторы, имеющие прямое отношение к развитию и результатам процесса деформации, остаются совсем или почти неизвестными. Это в первую очередь — величина, характер и направление действовавших сил, продолжительность процесса складкообразования, физические свойства подвергающихся деформации веществ горных пород и многое другое. Достаточно очевидно, что до деформации и во время ее свойства пород были существенно иными, чем те, которые мы можем измерить в них сейчас. Но оценить, какие именно, — не так-то просто.

На первый взгляд может показаться, что нужно воспользоваться достижениями соответствующих разделов физики, где есть хорошо разработанные и установленные законы физики твердого тела, теории деформаций; могут оказаться полезными также более сложные разделы, учитывающие вязкость и пластичность вещества, — прежде всего реология. Но и тут все оказывается не так легко: большая часть параметров, входящих в уравнения деформации, оказывается неизвестной. И дело не только в этом. В теоретической физике достаточно хорошо разработаны решения, пригодные для сравнительно простых двух- и трехслойных моделей, составленных из однородных слоев. А перед нами сложная много- и даже тысячеслойная модель с нерегулярно меняющимися свойствами. Теоретически такие задачи надо решать заново, а это связано с решением громоздких нелинейных уравнений, из которых даже если и удастся выбраться, то опять окажется, что мы не очень хорошо знаем, какие значения следует поставить на

место символов, обозначающих жесткость, вязкость, плотность деформируемого вещества.

Может прийти на помощь лабораторный эксперимент на образцах из разных подходящих веществ. И это делается в нескольких лабораториях. Деформируя разными способами составленные в соответствии с теорией физического подобия лабораторные образцы, стараются получить структуры, похожие на природные складки и даже на системы складок — антиклинории и синклинории. И действительно, иногда удается получить очень сходные с природными деформированные слоистые пачки. Однако очень похожие складки на таких моделях могут быть получены разными способами — раздавливая слоистую толщу вертикально, сжимая ее горизонтально или просто давая ей возможность растекаться подобно смоле или стеарину. Так что и таким способом мы не имеем однозначного ответа на вопрос о причинах, формирующих складчатость. При всей перспективности этих методов моделирования «они еще долго, — по выражению Р. ван Беммелена, — не смогут служить доказательством, что в природе процесс происходил именно так, а останутся более или менее удачной иллюстрацией наших представлений о природных процессах».

Может быть теперь читателю стало яснее, почему так трудно добраться до окончательного, однозначного ответа в проблеме происхождения складчатости. Геолог располагает очень большой, но все же далеко не полной информацией, из которой надо все-таки как-то составить связную, непротиворечащую основным законам природы, наиболее вероятную картину процесса развития складчатой области. Но строить ее приходится качественным путем, путем умозаключений и логических построений.

Естественно, что отсутствие строгих доказательств порождает споры, особенно вокруг вопроса о направлении действующих сил, вызывающих деформацию и приводящих к складчатости. По тому, как решается этот вопрос, все гипотезы о происхождении складчатости делятся на две большие группы.

ДВА ВЗГЛЯДА НА ПРОИСХОЖДЕНИЕ СКЛАДЧАТОСТИ

Представления одной группы ученых основываются на том, что ведущими, первичными в складкообразовании силами являются горизонтальные силы сжатия, действующие вдоль поверхности Земли. Поскольку поверхность эта не плоская, то такие силы часто называют тангенциальными, т. е. касательными. Эти представления восходят к контракционной гипотезе, т. е. гипотезе сжатия, разработанной французским геологом Эли де Бомоном (1798—1874). Согласно этой гипотезе, первоначально горячая и даже огненно-жидкая Земля постепенно охлаждается и сжимается. Ее верхняя оболочка, земная кора, охладившаяся прежде всего, оказывается слишком просторной для продолжающих сжиматься внутренних частей, поэтому она коробится и сминается в складки. Наиболее распространенный пример, поясняющий этот процесс, — это кожа на печеном яблоке. Контракционная гипотеза владела умами многих ученых весь прошлый век и первые десятилетия нынешнего. Действительно, тогда думали, что Земля родилась как расплавленное огненно-жидкое тело, и все казалось очень естественным и согласованным в этой гипотезе. И причины складкообразования находили объяснение в общей концепции: коробление коры, сжатие более мягких, податливых осадочных толщ между более жесткими плитами — платформами. Наиболее подробно процессы складкообразования с позиций гипотезы контракции были рассмотрены швейцарским геологом А. Геймом на примере Альп. Он же первый попытался количественно рассчитать размеры горизонтального сокращения земной коры, используя прием «распрямления» складок. В самом деле, если мы совершенно точно знаем, что пласты при своем образовании залегали горизонтально, то смятые в складки они занимают гораздо меньшую ширину на поверхности, чем раньше. Стоит измерить длину слоев в складках и нам станет известна ширина того ложа, на котором они накапливались. Очень естественные и простые представления. И действительно, глядя на складчатые слоистые толщи,

прежде всего в голову приходит, что их смяли, как будто сгребли каким-то гигантским бульдозером, и сжали между жесткими упорами. А сами слои были при этом мягкими и пластичными, словно слоеное тесто.

Эти представления развивались и дополнялись в конце прошлого и начале нашего века многими известными европейскими и американскими геологами, в том числе М. Бертраном, Б. Виллисом, Э. Арганом, Г. Штилле, Л. Кобером и др.

И в наши дни, хотя большинство геологов не поддерживают контракционную гипотезу, многие исследователи по-прежнему считают ведущими в процессе складкообразования горизонтальные сжимающие силы. Хотя причины, порождающие эти силы, в современных концепциях совершенно иные (дрейф континентов, столкновение литосферных плит, о чем речь пойдет дальше), основная схема деформации осадочных пород в складчатых поясах остается примерно той же самой — сжатие осадочных толщ между более жесткими упорами. Эти представления продолжают развиваться и сейчас за рубежом и у нас в стране — П. Н. Кропоткиным, О. Г. Сорохтиным, С. А. Руженцевым и др.

Другая группа исследователей основывает свои взгляды на том, что ведущими в процессе деформации являются вертикальные, направленные вверх силы. Эти идеи ведут свое начало от гипотезы, предложенной в XVIII в. англичанином Дж. Геттоном (1726—1797), который объяснял возникновение изгибов в слоях ростом поднятий на поверхности Земли: первоначально направленная вверх сила в сочетании с силой тяжести и сопротивлением пород создает те условия, в которых образуется складчатость. Надо сказать, что довольно близкие взгляды на деформацию слоев и происхождение складчатости высказывал еще раньше М. В. Ломоносов (1711—1765). В своем знаменитом сочинении «О слоях земных» он писал: «Наклоненное положение камней диких к горизонту показывает, что оные слои сворочены с прежнего своего положения, которое по механическим и гидростатическим правилам должно быть горизонтальным. И так, когда горы со дна морского восходили, понуждаемые внутреннею силой, неотменно должныствовали составляющие их камни выпучиваться, трескаться, производить расселины, наклонные положения, стремнины, пропасти разной

величины и фигуры отменной». Как ярко и красочно представлял себе М. В. Ломоносов формирование гор и образование складок!

Позже гипотеза поднятия была подробно разработана немецкими учеными Леопольдом фон Бузом и А. Гумбольдтом, а в применении к складкообразованию наиболее полное развитие она получила в работах швейцарского геолога Б. Штудера. Согласно этим представлениям, причиной деформации горных пород и образования складчатости является подъем магматических масс из глубоких внутренних зон земного шара к поверхности в осадочную оболочку Земли. Магма приподнимает и раздвигает встречающиеся ей на пути породы. Осадочные толщи соскальзывают с растущего поднятия и сминаются в складки. Таким образом, горизонтальные силы, приводящие к смятию слоев в складки, хотя и возникают в земной коре, но они являются вторичными и производными от ведущих вертикальных сил.

Гипотеза поднятия была вытеснена во второй половине XIX в. контракционной гипотезой, однако представления о ведущей роли вертикальных сил в процессе складкообразования не были забыты и позже получили свое развитие в работах О. Амферера, Э. Хаармана, Р. ван Беммелена. Особое место занимают в этом ряду работы советского тектониста М. М. Тетяева, рассматривавшего складчатость как результат раздавливания осадочных толщ под действием вертикальных сил, и во многом интуитивно предвосхитившего современные представления. Взгляды М. М. Тетяева были развиты и существенно дополнены исследованиями В. В. Белоусова и его учеников.

Как видно, обе группы гипотез имеют в числе сторонников имена известных крупных ученых, внесших свой вклад в развитие науки о Земле, и каждая группа насчитывает десятилетия и даже столетия своей истории. Но спор продолжается, и хотя каждому исследователю порой кажется, что вот, наконец, он нашел самые веские, самые убедительные аргументы, они почему-то убеждают только его самого и его сторонников. Где же та сумма фактов и доказательств, которая сможет убедить и противников?

Из нашего краткого и очень неполного обзора представлений о происхождении складчатости все же видно,

как кажется, что основные идеи о движущих силах складкообразования всегда были тесно связаны с общими представлениями о развитии Земли или по крайней мере о развитии земной коры и подстилающей ее оболочки — верхней мантии. Складчатость и складкообразование в большинстве случаев рассматривались с позиции этих более общих идей и представлялись как важное, но тем не менее поверхностное и подчиненное более общему процессу явление.

А если посмотреть на складки и складчатость в крупном плане и очень детально? Вместо общего взгляда на Землю из космоса посмотрим на нее гораздо ближе — с высоты полета орла, и еще ближе — пойдем с молотком и компасом к скалистым обрывам, где обнажаются складки. Может быть, стоит рассмотреть внимательно сами складки и то, как они сочетаются, образуя целую складчатую область? Тогда, возможно, мы увидим в них кинематику их образования, следы деформации и только после этого посмотрим, к какой обобщающей геотектонической гипотезе приведет нас этот фактический материал, т. е., вместо того, чтобы идти от общего к частному, пойдем от частного к общему. И тот и другой путь в науке возможен, но коль скоро на первом пути мы не можем никак выбраться из дискуссий, то, может быть, второй окажется плодотворней. Для этого надо прежде всего отправиться в экспедицию — «в поле».

«ПОЛЕ» В ГОРАХ

В любом исследовательском институте, изучающем Землю, летом пустеют лаборатории: геологи, метеорологи, магнитологи и другие специалисты уезжают в экспедиции. И куда бы ни вели маршруты — в пустыни, горы или тайгу, геологи называют этот период емким словом «поле».

Больше двадцати лет работает Кавказская тектоническая экспедиция Института физики Земли АН СССР. Каждой весной начинается подготовка к очередному сезону — планирование маршрутов, получение оборудования, комплектование отрядов. В начале лета экспедиция отправляется в самые высокогорные районы Кавказа.

Может показаться удивительным, что экспедиция из года в год работает на Кавказе, хорошо освоенном, ис-

хоженном и изученном. Вроде бы геологов больше должны привлекать дикие малоизвестные места. Действительно, мечтать о сенсационных открытиях новых месторождений на Кавказе не приходится (хотя и здесь не все до конца известно). Но нас интересуют не месторождения сами по себе. В задачи экспедиций входит исследование тектонических процессов — движений земной коры, природы сил, формирующих горную складчатую область, механизма деформации горных пород и образования складок, изучение геологических условий возникновения землетрясений, — в общем-то чисто теоретические вопросы, но в основе своей именно они тесно связаны с практикой.

Кавказ не только очень удобная, но и в некотором отношении уникальная область для подобных исследований. Во-первых, он хорошо изучен геологически, что необходимо, когда задаешься целью решать какие-то специальные задачи; во-вторых, сравнительно легко доступен. Но главное, Кавказ — единственная в пределах нашей страны цельная структура горного пояса Южной Европы. Другие складчатые области этого пояса — Карпаты и Крым — только частично расположены на территории Советского Союза.

Геологи кавказской экспедиции работают в Дагестане, Кахетии, Сванетии, Азербайджане, водораздельной части Главного хребта на Северо-Западном Кавказе. Задачи изучения складчатости в осадочных толщах земной коры привели нас сначала в горные районы Дагестана, где мы работали несколько полевых сезонов, а затем — в Сванетию. Почему были выбраны именно эти места? Чтобы был понятен ответ на этот вопрос, напомним, что такое складки и какими они бывают в природе.

Горная система Большого Кавказа является колоссальной сложной единой складкой, или мегантиклинорием. Она простирается от Черного моря до Каспийского на 1 200—1 300 км и имеет ширину от 100 до 250 км. В ее центральной осевой части располагаются Дагестан (на востоке) и Сванетия (на западе). В этих местах наиболее приподнятая часть гигантской складки Большого Кавказа совпадает с самыми высокими горными цепями и вершинами системы Главного Кавказского хребта. Ущелья рек глубоко врезаются в молодые растущие горы. Вблизи водораздельной части Главного хребта глубина

ущелий иногда достигает полутора-двух километров. Здесь можно наблюдать складки в разрезе, видеть изменение их формы в вертикальном сечении, сочетания разных изгибов пластов вдоль и поперек складчатой области. И эти наблюдения становятся основой всех дальнейших попыток получить ответы на вопросы: как образовались складки, каким образом и почему деформировались горные породы?

Работая в поле, геологи должны подробно и как можно ближе к природе зафиксировать в полевых дневниках и на фотопленках деформации горных пород, запечатленные в складках. Ради этого и приходится преодолевать в течение нескольких летних месяцев десятки километров по горным тропам и дорогам, подниматься на перевалы, переходить вброд горные речки, обходить водопады. Не всегда это легко. Ведь не всюду геолога ждет дорога или тропа, да и не всякая хоженная тропа бывает удобной. Но обычно горы вознаграждают за все...

Сванетия. С севера ее ограничивает цепь Главного Кавказского хребта со знаменитыми «альпинистскими» четырехкилометровыми вершинами (двуглавый пик Ушбы, рис. 7, похожая на замок Шхара, правильная треугольная пирамида Тетнульда). Южнее тянется гребень Сванетского хребта. Между этими хребтами лежит продольная часть долины р. Ингури, где на широких террасах раскинулись селения Верхней Сванетии. Дома, как всегда в горах, плотно жмутся друг к другу, плоские пространства — горизонтальные террасы и относительно пологие склоны — заняты полями картофеля, ячменя, кукурузы. В самой широкой части продольной долины, на притоке Ингури р. Мулхура стоит Местия — столица Верхней Сванетии. Неповторимое своеобразие пейзажу придают высокие четырехгранные башни из светлого камня. Как вечные стражи, похожие на огромные шахматные ладьи, они охраняют каждое селение Верхней Сванетии. Эти башни, построенные в IX—XVI вв. для защиты от многочисленных врагов, свидетельствуют о сравнительно недавнем родовом строе в Сванетии. На южном склоне Сванетского хребта в широкой части долины р. Цхенискали разбросаны поселки Нижней Сванетии. С юга от долин Равнинной Грузии ее ограждает горная цепь Лечхумского хребта. Так вот и спрятана вся Сване-



Рис. 7. Вид с юга на вершину Ушбы и долину р. Мулхура в Сванетии

тия среди горных ущелий, выбраться из которых можно только по узким каньонам крупных рек.

Как свидетельство изолированности от мира, как некий курьез XX в. в учебниках географии еще недавно сообщалось, что сваны до сих пор не знают колеса. Это не совсем так. И сегодня можно встретить в горах быков, запряженных в сани, с возом дров, сена или строительного камня. Но не потому, что местные жители не знакомы с колесом, а просто по крутым травянистым склонам и по горным тропам удобнее перевозить груз на санях, а не на телеге. Раньше автомобиля в Местии появился первый самолет. Теперь этот город связан регулярными воздушными рейсами с Сухуми, Кутаиси и Зугдиди. В связи со строительством на Ингури ГЭС, плотина которой сооружается у выхода реки на равнину, потребовалось реконструировать дорогу в Местию. Ее ведут вдоль будущего водохранилища значительно выше прежней, делают более широкой и прямой. Поэтому теперь уже не скажешь, что Сванетия изолирована от внешнего мира.

Если Сванетия навсегда оставляет в памяти сторожевые башни на фоне залесенных гор, увенчанных снежными вершинами, то для Дагестана очень трудно найти столь же выразительный символ. Дагестан — страна гор, раскинувшаяся почти по всему северному склону восточной половины Большого Кавказа. Здесь очень разнообразны и природные условия, и ландшафты, и даже краски.

Главный Кавказский хребет ограничивает Дагестан с юга. Горы, постепенно снижаясь гряда за грядой, спускаются к Предкавказской равнине. В высокогорной части — скалы и снежные вершины, которые ниже по склонам сменяются альпийскими лугами. Богат красками ландшафт этой части Дагестана: черные скалы, зеленый бархат лугов, белые снежники. Севернее острые хребты уступают место обширным столовым плато, где начинается Нагорный Дагестан. Он сложен главным образом известняками, и скалы меняют свой цвет от белых и палевых до бурых и серых. Поражает необыкновенный простор, бесконечные дали, хотя это необычно для гор. В этих местах всегда видишь, и не только видишь, но и чувствуешь над собой громадный купол блеклого, неяркого дагестанского неба.

Развитая сеть дорог — одна из отличительных особенностей Дагестана. Только у самого водораздела Главного Кавказского хребта остались небольшие селения, куда можно добраться лишь вьючной тропой. Все остальные связаны автомобильными дорогами с основными трассами, районными центрами, Махачкалой. Дагестан по протяженности дорог занимает первое место на Кавказе, а может быть, и не только на Кавказе. В Дагестане вообще много «первого» и «самого». Здесь самое высокое в Европе постоянное селение. Это — Куруш, забравшийся на высоту 2 500 м в долине р. Усук-Чай (Восточный Дагестан). Именно здесь трудятся знаменитые далеко за пределами нашей страны художественные артели чеканщиков в Кубачах и мастеров инкрустации и выжигания по дереву в Унцукуле. В Дагестане самое многоязычное население на Кавказе. На сравнительно небольшой площади территорию Дагестана можно сравнить со Швейцарией или Ирландией) соседствуют семь только письменных языков, на которых ведутся передачи по радио и издаются газеты. А диалектов и наречий тут ве-

ликое множество. Дагестан разнообразен во всем. Но есть в нем и нечто, присущее только ему и отличающее его от других районов Кавказа. Дагестан суров, скупа его красота; от этого она, пожалуй, еще более притягательна.

Эффектные пейзажи и другие красоты природы лишь неотъемлемая часть нашего кавказского полевого сезона. На фотопленках, которые мы привозим с собой, селения, архитектурные памятники, люди — это единичные кадры. А многие десятки и сотни снимков — это геологические структуры, складки, разрывы, трещины, мелкие деформации отдельных пород пластов. Подчас многокилометровые панорамы занимают несколько кадров, иногда это только фрагменты и детали сложных структур. И каждый кадр точно зарегистрирован: что снято, где, с какой точки. Такие фотодокументы, хотя и чрезвычайно важны, не составляют самого главного, что мы привозим с «поля». Основной документ геолога — полевой дневник. В нем подробно описан каждый маршрут, детально зарисованы все структуры, указаны их размеры, проставлены углы наклона или, как говорят геологи, углы падения горных пластов. Рисунки ориентированы по странам света, а места, где сделаны наблюдения, обозначены на карте. В полевом дневнике содержится весь фактический материал, по которому составляется, вычерчивается геологический разрез, или профиль, а если нужно — и геологическая карта. Ради этого геологи совершают пешие и конные переходы, поездки по горным дорогам, подъемы на перевалы, разбивают палатки на берегах горных рек.

Разрозненные зарисовки из полевого дневника, сделанные в разной последовательности и в разное время, связываются в единое цельное изображение структурного геологического профиля. На нем можно увидеть закономерности сочетания структур разных порядков, разнообразные типы складок, зоны различной интенсивности деформаций. Геологический профиль или целая серия их в разных частях складчатой горной области составляют первую стадию обработки материала полевых наблюдений. Эту работу лучше всего делать еще в поле, когда все, что должно быть на профиле, рядом, и можно вновь и вновь рассмотреть какую-то непонятную деталь, разобраться и проверить на месте. Итак, профили

построены, вычерчены. Теперь наступает следующая фаза исследования — изучение условий образования структур, обобщение данных, проверка гипотез. Но это уже работа за письменным столом.

КАК УСТРОЕНА СКЛАДЧАТАЯ ОБЛАСТЬ

Когда впервые попадаешь в новую, незнакомую горную складчатую область, то даже геолога вначале может охватить чувство, что нет никакой возможности разобраться в беспорядочном нагромождении самых разных пластов, глыб, складок. Первозданный хаос! Но, шаг за шагом распутывая структуру, связывая между собой отдельные обнажения, прослеживая складки от одного ущелья к другому, обычно удается даже в самых сложных случаях разобраться в том, как устроена складчатая область, каково ее общее строение. И тогда выясняется, что оно вовсе не хаотично; напротив, наблюдаются очень определенные закономерности.

Рассмотрим эти закономерности на конкретном примере того же Большого Кавказа. Возьмем вначале пересечение через его восточную половину, где располагается Дагестан. Прежде всего бросается в глаза, что на поперечном разрезе-профиле складки распределены очень неравномерно. Их больше в центральной осевой зоне мегантиклинория, хотя они здесь сравнительно невелики по размерам. Складки имеют острые резкие перегибы — замки, как называют их геологи, и крутые углы падения слоев на крыльях. В обе стороны от осевой зоны складки постепенно упрощаются — углы падения слоев становятся положе, а перегибы — плавнее. Ближе к окраинам появляются участки почти горизонтального залегания; наконец, на соседних с Большим Кавказом равнинах — Куринской низменности и в Предкавказье — осадочные толщи практически недеформированы, лишь кое-где их горизонтальное залегание осложняется складками (Терский и Сунженский хребты в Предкавказье).

Еще одна важная особенность может быть отмечена для этого профиля. В центральной части области, т. е. там, где деформации пород максимальны, на поверхности обнажаются наиболее древние слои осадочных пород,

которые перекрываются все более и более молодыми при удалении к окраинным частям складчатой области.

Эти закономерности достаточно типичны, их можно увидеть не только на Кавказе, но и в других складчатых областях — в Верхоянье, в Южном Тянь-Шане, на Урале.

Несколько иначе выглядит структура Большого Кавказа в его западной половине на Центральном Кавказе. Но если рассматривать только Сванетию, то можно увидеть, что она очень похожа на Восточный Кавказ по распределению типов складок, по возрасту пород и даже по составу осадочных толщ. Но Сванетский антиклинорий значительно меньше по размерам, чем Восточный Кавказ, и выглядит как его маленькая модель.

Обнаруженные закономерности строения складчатой области уже позволяют поставить вопрос о том, где искать источники сил и причины, вызвавшие деформацию пород. С какой гипотезой лучше согласуются эти данные? Очевидно, как ни заманчиво представлять себе, что все изгибы пластов, все складки вызваны горизонтально направленными сжимающими усилиями, приложенными с флангов к складчатой области, от этого придется отказаться. В этом случае распределение интенсивности складчатых деформаций должно было бы быть обратным наблюдаемому. Если бы дело обстояло таким образом, то именно по краям складчатой области, т. е. возле жестких упоров, сдавливающих ее, должна была бы наблюдаться максимальная деформация пород и наиболее интенсивная складчатость. В природе же, как мы видели, существуют обратные соотношения.

Идее внешнего горизонтального сжатия, кроме того, противоречат другие факты. Не все складчатые области вытягиваются так прямолинейно, как Кавказ или Урал. Многие образуют в плане сложно изогнутые дуги, подобно Карпатам. При такой конфигурации механизм горизонтального сжатия становится и вовсе невероятным — жесткие плиты, охватывающие складчатую область, со всех сторон должны давить на нее в разных направлениях. Физические свойства такой плиты невозможно реально себе представить, и еще труднее найти причины таких движений.

Но и с гипотезой поднятия согласовать наблюдаемую картину деформаций не так-то легко. Ведь в этом случае в центре складчатой области должен быть относительно

жесткий приподнятый кристаллический блок, который бы раздвинул осадочные породы и смял их в складки, либо с которого они соскользнули бы в стороны. Часто такие блоки действительно наблюдаются в складчатых областях. Есть такой блок и в центральной осевой части западной половины Большого Кавказа, к северу от Сванетии. Но, во-первых, здесь нет признаков того, что осадки соскользнули с этого блока или раздавлены им, а во-вторых, на Восточном Кавказе в осевой части наблюдается наиболее интенсивная складчатость в осадочных толщах, которую надо как-то понять и объяснить. Если даже считать, что здесь кристаллический блок приподнят недостаточно высоко и остался скрытым где-то на глубине, ниже дневной поверхности, то и тогда невозможно себе представить, как над поднимающимся блоком формируется складчатость, а не область растяжения слоев. Скорее всего, причины деформации в этом случае должны быть какими-то другими. Пока ясно только одно — вряд ли их стоит искать за пределами самой складчатой области, в соседних с ней относительно стабильных областях — платформах. Источники сил и движений, приводящих к деформациям пород в складчатой области, по-видимому, должны быть внутри нее самой. Однако одних только данных о структуре складчатой области недостаточно для того, чтобы сделать выбор между гипотезами или просто составить себе представление о том, как протекает процесс деформации пород. Изучение структуры дает нам статичную картину современного строения земной коры или по крайней мере верхней ее части. Нужно всегда помнить, что эта современная структура создана в процессе длительного развития, насчитывающего десятки и сотни миллионов лет. И если мы хотим понять динамику геологических событий — в данном случае механизм складкообразования, надо обратиться к геологической истории складчатой области.

РАЗВИТИЕ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Как же восстановить эту геологическую историю? И можно ли это вообще сделать? Оказывается можно. Всякое чередование пластов осадочных пород — геоло-

гический разрез, или колонка, содержащий много сведений об условиях их накопления; по такому разрезу можно расшифровать последовательную картину смены этих условий. Даже до того, как мы точно установили период времени, когда накопились эти отложения, известен их относительный возраст: каждый вышележащий пласт образовался позже лежащих ниже. А вещественный состав осадков обычно свидетельствует об определенных условиях их накопления, например песчаники — о размыве какой-то суши, глинистые толщи — о значительном удалении от области размыва, соленосные и гипсовые пласты — о том, что осадконакопление происходило в морских лагунах и т. д. Мощность или толщина пластов во многих случаях соответствует размеру прогибания земной коры в это время. Таким образом, геологический разрез — это запечатленная в камне история данного участка земной коры. Но нам надо конкретизировать эту историю, как можно более точно распределить события во времени, установить интенсивность движений земной коры.

Для этого нужна не одна колонка — разрез осадочных отложений, пусть даже самая характерная для данной области, а целые серии таких разрезов, с точным указанием места, где они находятся. И уже не относительный возраст нужен в этом случае — «древнее», «моложе», а точное распределение пачек пластов по интервалам геологической шкалы времени. В связи с интенсивным развитием радиометрических методов определения возраста пород в наше время возможно сопоставление разрезов и с абсолютной геохронологической шкалой. Располагая достаточным количеством разрезов отложений для интересующей нас территории, можно приниматься за реконструкцию истории геологического развития данного участка земной коры.

Результаты такого анализа удобнее всего представить в виде серии карт. Каждая карта — это как бы отдельный кадр кинофильма, показывающего развитие геологических событий. Изменение мощности отложений того или иного возраста, изображенное в изолиниях, дает возможность увидеть изменение интенсивности прогибания за соответствующий отрезок времени. Состав отложений характеризует условия накопления осадков и позволяет выявить местоположение для данного периода

времени суши и моря, т. е. областей размыва и сноса осадочного материала и областей накопления осадков.

К сожалению, сушу, поднимающуюся часть территории, мы не можем изобразить в тех же изолиниях, что и области прогибания, поскольку поднятие и размыв не оставляют в разрезе такого же вещественного следа, как прогибание и осадконакопление, т. е. пластов пород. Приходится показывать участки суши условно, устанавливая их по отсутствию отложений данного возраста, закономерному уменьшению мощностей при приближении к ним, по изменению состава осадков: обычно, чем ближе область размыва, тем более крупные и грубые обломки встречаются в осадочных породах.

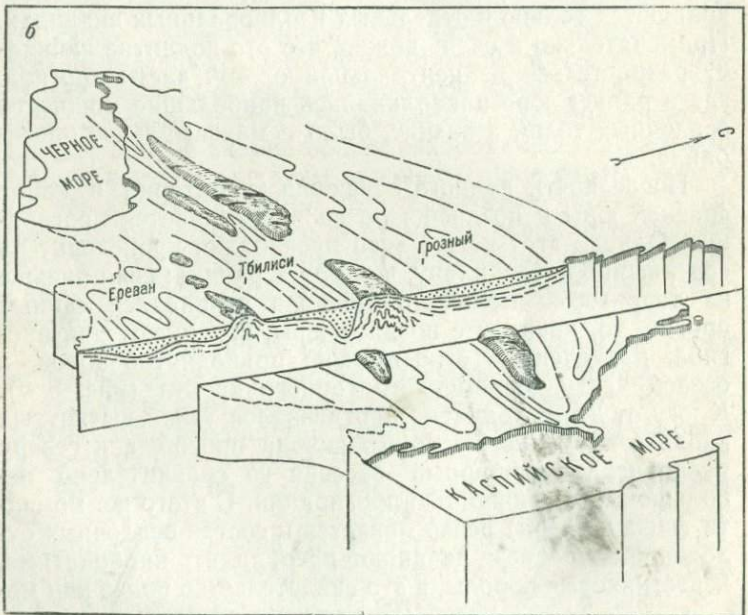
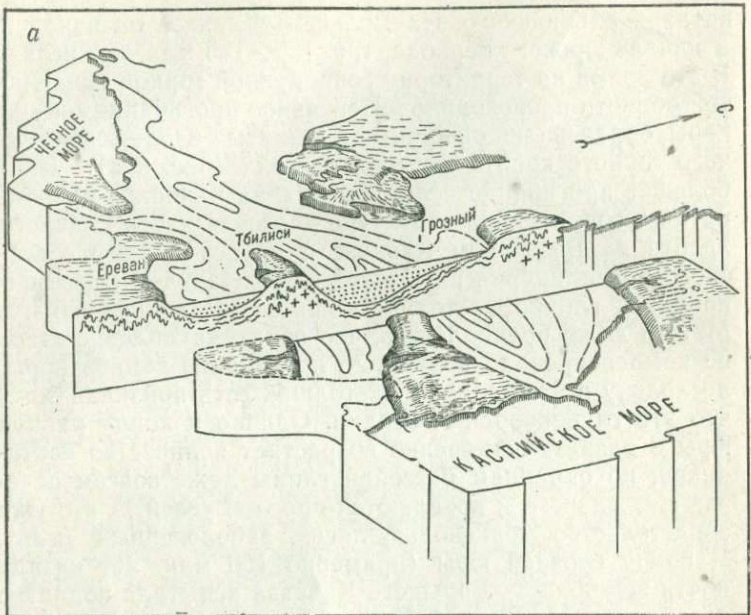
Серия таких карт-реконструкций позволяет «прочитать» геологическую историю, как раскрытую книгу. Однако не следует думать, что все это так просто и легко. Геологи никогда не имеют всех тех разрезов, каких им хотелось бы. Следы событий, происходивших давно, разрушаются, запутываются последующими событиями. Скажем, отложения определенного возраста могли попасть много позже в зону поднятия и быть размыты (денудированы) либо смещены во время деформаций с места своего первоначального залегания. Поэтому при построении таких карт часто приходится что-то домысливать, не только интерполировать, но и экстраполировать, в чем-то доверяться интуиции. Тут безусловно помогают опыт и знание общих закономерностей развития земной коры. Но по этим причинам такие карты не всегда бесспорны, особенно для складчатых областей, где произошли интенсивные деформации пород, а также для древних этапов развития, когда более поздние процессы как-то переработали и разрушили первоначальное распределение осадков.

Но так или иначе, преодолев все трудности, серию исторических карт удастся получить, разумеется, лишь с какими-то допущениями, с какой-то степенью точности. Какие закономерности развития складчатой области удастся на них увидеть?

Раз уж мы познакомились со складчатой структурой Большого Кавказа, то и историю развития удобнее всего рассмотреть для этой же области. Та структура, которую мы наблюдаем в этой складчатой области, сформировалась в течение последнего геотектонического цикла раз-

вития — альпийского. На Большом Кавказе он начался в начале юрского периода, т. е. 180—185 млн. лет назад. В это время на территории современной горной складчатой области происходило интенсивное прогибание земной коры, образовался обширный вытянутый вдоль современного горного хребта морской бассейн (рис. 8, а). Наибольшее прогибание испытывала зона наиболее приподнятая в современной структуре — осевая часть Главного хребта на Восточном Кавказе и полоса вдоль Сванетского антиклинория на Центральном Кавказе. Здесь накопились глинистые толщи мощностью до 5—5,5 км. Можно даже предполагать, что осадконакопление здесь не компенсировало полностью прогибание земной коры, поскольку в этих глинистых толщах есть признаки того, что это глубоководные осадки. Однако к концу ранней юры в разрезе постепенно возрастает количество песчаников, по окраинам бассейна глины даже совсем исчезают из разреза и появляются прослой углей. А это уже свидетельство мелководья, лагун, заболоченных дельт. К концу средней юры (примерно 150 млн. лет назад) почти вся область Большого Кавказа испытала поднятие и осушение — морские условия и накопление осадков сохраняются только в отдельных изолированных впадинах. Примечательно и очень важно, что это поднятие начинается разрастаться из центральной осевой части прогиба, где в ранней юре накапливались наибольшие мощности осадочных толщ, а значит, было и максимальное прогибание.

После почти полного осушения территории в конце средней юры в поздней юре вновь начинается прогибание. Однако этот новый этап прогибания происходит по совершенно иному плану, чем более ранний: если раньше на территории Большого Кавказа развивался единый прогиб, то, начиная с поздней юры, возникают два прогиба, разделенные относительно приподнятой зоной в осевой части современного горного хребта (рис. 8, б). К югу от этого поднятия протягивался узкий вытянутый вдоль современного южного склона прогиб, а к северу располагался обширный бассейн со сравнительно небольшой интенсивностью прогибания. С этого же момента (поздняя юра) резко меняется и состав осадочных отложений: в разрезе начинают преобладать карбонатные, известняковые породы, а это свидетельство более или ме-



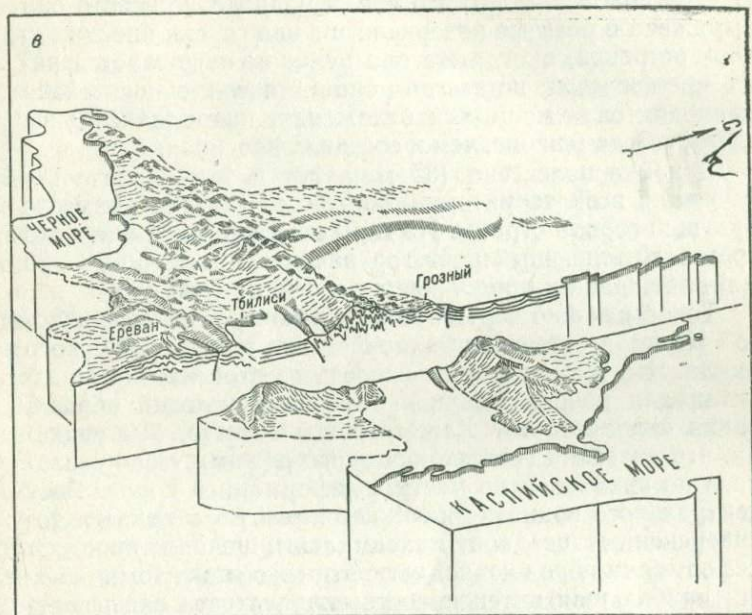


Рис. 8. Схематическая реконструкция последовательных стадий развития Кавказской геосинклинали в альпийском цикле:

а — конец раннеюрского времени; б — позднеюрско-меловое время; в — современная горная складчатая область

нее спокойных условий, отсутствия контрастного рельефа и значительных областей размыва поблизости. В это же время отмечаются и первые следы деформации пород, образование складок — пласты пород позднеюрского возраста ложатся на более древние с угловым несогласием, т. е. не параллельно более древним пластам, а составляя с ними некоторый угол.

Итак, этот момент в истории развития Большого Кавказа оказывается очень важным, переломным. Такие этапы, когда кардинально меняется план распределения поднятий и прогибов, принято называть инверсией геотектонического режима. Новое распределение поднятий и прогибов сохраняется длительное время — весь меловой период и почти весь палеогеновый, т. е. почти 100 млн. лет. Относительно приподнятая зона, разделяющая два прогиба, — центральное поднятие — сохраня-

ет свое положение все это время. Однако не всегда она выражена в рельефе поверхности в виде суши, иногда это цепь островов, иногда же она целиком погружается ниже уровня моря; но всегда она остается относительно приподнятой — мощности отложений, накапливающихся здесь, всегда меньше, чем в соседних прогибах.

В конце палеогена (35 млн. лет назад) произошло осушение всей территории Большого Кавказа на месте будущей горной страны. Но горы еще не возникают в это время. Интенсивный рост гор начался примерно 18—20 млн. лет назад и продолжается и сейчас (рис. 8, в).

Таковы общие черты геологической истории Большого Кавказа в течение альпийского геотектонического цикла. Что же мы можем извлечь из этой картины развития для нашей задачи — выяснения условий образования складчатости? Кажется, очень много. Мы увидели, что инверсия геотектонического режима тесно связана и по времени и по месту с деформацией пород. Рост центрального поднятия начинается там, где мощности доинверсионных осадков максимальны; начало процесса деформации пород совпадает с этим же моментом времени; наибольшая интенсивность складчатости оказывается тоже там, где возникает центральное поднятие и где оно больше всего приподнято, т. е. на поверхность выведены самые древние породы. Такая связь явлений характерна не для одного Большого Кавказа. Это достаточно четко установленная закономерность, наблюдающаяся во многих складчатых областях.

Значит, надо понять причины инверсии, найти те силы, которые приводят к тому, что единый прогиб, где накопились мощные толщи, начинает как бы выворачиваться — в центре, в наиболее прогнутой его части, начинается рост поднятия. И одновременно с этим здесь же происходят деформация пород и образование складчатости. Понятно, что не всегда одновременно означает и взаимосвязано, но в данном случае кажется очевидной тесная связь и взаимообусловленность геологических событий, и причина этих процессов, скорее всего, тоже должна быть одна.

ЕЩЕ О ГИПОТЕЗАХ

Теперь, когда мы представляем себе не только складчатую структуру Большого Кавказа, но и историю ее раз-

вития, полезно еще раз взвесить, с какой из противоборствующих гипотез лучше согласуются эти данные.

По-видимому, связать образование складчатой области с общим сжатием земной коры теперь становится еще труднее. В тот момент, когда начинают расти и развиваться центральное поднятие и вызванные этим деформации пород, эта зона окружена вовсе не жесткими плитами, которые могли бы ее сжимать, как тиски, а прогибающимися участки земной коры. Да и вообще вся история развития складчатой области приводит нас к мысли о том, что в целом — это зона высокой подвижности, испытывающая интенсивные контрастные движения, характерные для тех поясов Земли, где обычно формируются складчатые системы. Их принято называть геосинклиналями, противопоставляя их стабильным, относительно малоподвижным платформам. С геосинклиналями, естественно, связывается представление об относительно мягкой и пластичной земной коре в отличие от платформ, где кора, очевидно, более жесткая и хрупкая. Но надо иметь в виду всю условность и относительность этих понятий. Каждому известно, что многие вещества ведут себя то как пластичные и вязкие жидкости, то как хрупкие твердые тела; в случае земной коры в еще большей степени все зависит от условий, которые воздействуют на нее, и, главное, от продолжительности воздействия.

С гипотезой поднятия в ее классическом виде, как ее формулировали, начиная с М. В. Ломоносова и Дж. Геттона до начала XX в., также не очень просто связать наблюдаемые факты. Имеется интенсивное вертикальное воздымание осевой части складчатой области, и этим вызван процесс складкообразования. Все казалось бы так, как нужно. Но невозможно понять, почему складчатым оказывается сам воздымающийся блок, да еще там мы видим максимальную интенсивность деформаций.

Очевидно, в этих условиях, по мнению М. А. Гончарова, полезно смотреть не столько на то, что разделяет эти две группы гипотез, сколько попытаться понять, что их объединяет. Может быть, как раз здесь и окажется тот камень преткновения, который не дает разрешиться спору, найти однозначное решение проблемы?

А объединяет эти гипотезы или группы гипотез одно общее исходное положение, которое сводится к тому, что

осадочные толщи в складчатой области деформируются под воздействием внешних, сосредоточенных на каких-то границах сил; иначе во всех случаях задача деформации пород представляется как одна из стандартных задач из курса сопротивления материалов. На балку, брус, или другой какой-то предмет воздействуют продольные или поперечные силы, и он сжимается, растягивается, изгибается. В каких-то случаях аналогию с такими деформациями можно провести и в герологии, но справедлива ли она по отношению ко всей складчатой области? У нас в обоих случаях, будут ли это горизонтальные сжимающие усилия, приложенные с флангов к складчатой области, или вертикально направленные вверх силы, воздействующие на нижнюю поверхность (подошву) осадочных толщ, породы деформируются пассивно в результате действия сил, приложенных к ним извне.

А если отказаться от такой схемы и предположить, что перемещение и деформация пород обусловлены влиянием рассеянных объемных сил, приложенных к каждой материальной точке вещества горных пород? Примером таких объемных сил является сила тяжести, и, стало быть, надо предположить, что деформация пород происходит так или примерно так, как происходит движение воды или сползание ледников в горах. Под влиянием силы тяжести смещаются и горные породы, образуются оползни или обвалы. Но хорошо известны и понятны гравитационные процессы, когда движение происходит вниз по направлению действия сил гравитации. В нашем же случае мы должны получить перемещение снизу вверх, т. е. преодолеть силу тяжести, и не просто преодолеть, но еще и вызвать деформацию пород. Бывают ли такие ситуации, когда это возможно?

«ПО ЗАКОНУ АРХИМЕДА...»

Оказывается, нам с детства хорошо известны движения под влиянием объемных сил, направленные вверх. Стоит вспомнить воздушные шары или пузырьки газа в стакане нарзана. В школе мы учим закон Архимеда, и такие перемещения не кажутся нам фантастическими. Разумеется, эти силы действуют не против силы тяжести, а обусловлены ею, но, чтобы выталкивающая сила реализовалась, кроме нее самой нужно еще, чтобы всплы-

вающий объем был легче, т. е. меньше по плотности, чем среда, в которой он всплывает. Однако это все довольно привычно и обыкновенно, когда мы имеем дело с жидкостями или газами, а горные породы ведь как будто твердые тела. Тверже и не бывает! Но мы уже говорили, что применительно к земной коре понятия «твердый», «мягкий», «хрупкий», «пластичный» очень относительны. Для физика вообще понятие «абсолютно твердое тело» существует только теоретически. И горные породы тут не исключение. Все зависит от условий, в которых они находятся. А сами складки, когда мы просто, что называется, «держим в руках» пластическую деформацию? Разве это не свидетельство того, что горные породы в определенных условиях ведут себя как вязкие или очень вязкие жидкости? Разумеется, скорости перемещений или скорости деформаций при условии очень большой вязкости будут малы, очень медленно будет происходить такое течение или всплывание в природе. Да ведь и торопиться некуда — процесс продолжается десятки и сотни миллионов лет!

Примером течения или всплывания пластичных масс горных пород, хорошо известным геологам и хорошо изученным, могут служить соляные купола. Правда, масштаб их проявления невелик, но и не слишком мал. Здесь лишь важно подчеркнуть, что в принципе течение горных пород возможно. В этих структурах каменная соль, пласты которой залегают на какой-то глубине (иногда до 10 км, как в Прикаспийской впадине), внедряется вверх, прорывая толщу лежащих над ней пород, и образует на поверхности вздутие или купол, т. е. по существу антиклинальную складку. Структуры такого типа называют диапирами, а сам процесс диапиризм*. В редких случаях соль прорывается прямо на поверхность, чаще она останавливается на какой-то глубине, приподнимая вышележащие пласты над собой. В некоторых случаях верхняя часть соляного диапира расползается, расплывается под толщей не прорванных им пластов, принимая похожую на гриб или шляпу форму. Соляные диапиры редко встречаются поодиночке, чаще они образуют целые семейства, захватывая огромные территории, которые так и называют — области солянокупольной или просто соляной

* Диапиро — по-гречески протыкаю, пронзаю.

тектоники. Приурочены они чаще всего к предгорным прогибам и просто к глубоким впадинам, заполненным мощными толщами осадочных пород. Хорошо известные области развития соляных диапиров— это Прикаспийская низменность, район Мексиканского залива, Среднеевропейский бассейн. Надо сказать, что диапировые складки очень подходящие структурные ловушки для образования скоплений нефти, и очень часто соляные и нефтяные месторождения сопутствуют друг другу; между ними существует, как говорят, парагенетическая связь. Это, видимо, в значительной мере способствовало тому, что эти структуры очень хорошо изучены. Можно даже сказать сильнее: «во всем мире соляные структуры изучаются почти с единственной целью — с целью определения перспектив нефтегазоносности того или иного региона»*.

Какие же условия необходимы для того, чтобы образовался диапир? Ведь и соль не всегда образует диапировые купола, поэтому важно понять, когда они возникают, какие условия необходимы и достаточны для того, чтобы процесс диапиризма мог реализоваться. Очевидно, совершенно необходимо наличие менее плотного слоя, или пласта, залегающего ниже толщи более плотных пород. Нормальная обстановка в поле земного притяжения — это когда с глубиной плотность пород в разрезе постепенно нарастает; если же эта закономерность нарушается и более легкий слой оказывается ниже более тяжелых, то такое распределение слоев оказывается механически неустойчивым. Эта ситуация, кстати говоря, носит название инверсии плотностей. Но сама по себе инверсия плотностей без дополнительных условий привести к диапиризму не может. Если пласты строго горизонтальны и не меняют свою мощность, то нагрузка на более легкий пласт соли повсюду будет одинаковой и при этом будет существовать неустойчивое, но равновесие, которое может сохраняться сколь угодно долго. Для того чтобы начался процесс диапиризма, нужно нарушить равновесие. Возможностей для этого очень много:

* М. К. Калинин. Соленакпление, образование соленых структур и их влияние на нефтегазоносность. М., Недра, 1973, с. 113.

к нарушению равновесия могут привести различные геологические процессы и поверхностные — экзогенные, и глубинные — эндогенные. Скажем, поверхностная эрозия осадочных толщ, выработка рельефа неизбежно изменят равномерность нагрузки лежащих на легком пласте толщ, и тогда из области, где давление выше, материал начнет перемещаться туда, где давление понизилось. К такому же изменению равномерности нагрузки могут привести и вертикальные тектонические движения, в особенности резкие перемещения блоков фундамента. Специальные исследования в Прикаспийской низменности показывают, что моменты ускорения роста диапировых куполов здесь очень четко совпадают с усилением контрастности вертикальных движений. Это понятно, так как вертикальные движения нарушают горизонтальность залегания пластов и, стало быть, нарушают однородность и равномерность давления на относительно менее плотный пласт.

Но и этого мало. Нужно еще, чтобы относительно легкий пласт был способен течь и внедряться в вышележащие толщи, т. е. обладал достаточно высокой пластичностью и низкой вязкостью. В обычных условиях ведь каменная соль тоже «камень» со свойственной для горных пород хрупкостью и твердостью, может быть только на вес полегче других образцов. Однако оставленные надолго на воздухе четко ограненные кристаллы галита — минерала, составляющего основную массу залежей каменной соли, — через некоторое время становятся оплывшими, похожими на натек. Но на больших глубинах, куда попадают эти пласты, физические условия совсем иные, чем на поверхности. В первую очередь это относится к давлениям и температурам. А в условиях повышенного давления и температур соль становится пластичной и подвижной и ее свойства можно рассматривать как свойства вязкой жидкости. К тому же замечено, что в областях соляной тектоники наблюдается повышенной тепловой поток. Так что необходимые условия для «разжижения» соли, очевидно, здесь существуют. Ну, а результат — соляные купола, диапиры.

И последнее необходимое условие — объем способного к всплыванию и внедрению вещества должен быть достаточно велик. Не во всех известных соленосных бассейнах есть диапировые структуры; их нет там, где мощ-

ность соленосной толщи мала или невелика глубина ее залегания. Ведь и пузырьки газа в стакане минеральной воды могут не подниматься вверх, а мелкими шариками покрывать дно и стенки стакана. Только в достаточно большом объеме выталкивающая сила достигает необходимой величины, чтобы преодолеть сопротивление окружающей среды, т. е. вышележащих пород.

Диапиры в осадочных толщах известны не только в соленосных отложениях. Хорошо изучены глинистые диапиры и связанные с ними грязевые вулканы, кстати сказать, тоже обычно расположенные по окраинам складчатой области. На Кавказе — это Апшеронский и Таманский полуострова. В некоторых местах наблюдаются диапировые купола и складки, связанные с внедрением известняковых, карбонатных толщ. Но пока все, что здесь говорилось, относится только к приповерхностной части осадочной толщи. Какое отношение имеет ко всему этому складчатая область? Возможно ли там осуществление такой схемы деформации и соблюдение всех необходимых условий?

ГЛУБИННЫЙ ДИАПИРИЗМ, КОНВЕКЦИЯ, АДВЕКЦИЯ

Во всяком случае полезно оценить, насколько реально возникновение и развитие процесса диапиризма в геосинклинальном прогибе, могут ли здесь сочетаться все необходимые условия, чтобы такой процесс оказался возможен. Самый важный и самый трудный вопрос — были ли когда-то породы, занимающие в современной структуре осевую часть складчатой области, в настолько пластичном состоянии, чтобы начать всплывать и внедряться в перекрывающие их толщи осадков? И какой могла быть их плотность в этот момент? Нам ведь нужно, чтобы породы в нижней части геосинклинального разреза были в какой-то момент менее плотными, чем в верхней части осадков.

Сегодня осевая часть складчатой зоны там, где мы видим наиболее интенсивную складчатость, сложена толщами глинистых сланцев, черных блестящих пород, распадающихся на тончайшие пластинки по поверхностям,

пересекающим первоначальную осадочную слоистость, — это явление называется кливаж (рис. 9). Такие породы иногда называют аспидные, или кровельные, сланцы, филлиты. И действительно, местные жители очень часто используют плиты таких сланцев для кровли своих жилищ. Да и сами дома строят из них. Сегодня это твердые и плотные породы, даже несколько выше средней плотности осадков, первоначально представленные глинами, глинистыми илами, накапливающимися на морском дне. А нельзя ли узнать исходный начальный состав этих глин и проследить историю их изменения до нынешнего облика?

Можно, конечно, однако это не такая легкая задача. Прежде всего потому, что превращение первичного ила в горную породу связано с целым рядом сложных физико-химических процессов, и не всегда удается однозначно установить последовательные стадии этого процесса. Особенно, когда мы имеем дело с глинистыми осадками. Поскольку минералогия глин и их химический состав очень сложны, и никогда нет полной уверенности, что одни и те же исходные материалы дадут в конечном итоге одинаковые горные породы, и, наоборот, одни и те же по облику и составу породы образовались из одинаковых исходных илов. Тем не менее основные этапы эволюции глинистого вещества все-таки удается установить.

Аспидные сланцы — результат длительного и сложного преобразования первоначально образующихся осадков, когда произошли изменения не только их физических свойств (уплотнение, переориентировка минеральных зерен и т. д.), но и химические превращения одних минералов в другие. Такие породы принято называть метаморфическими, а сам процесс — метаморфизмом. Далеко зашедший и сильно проявленный метаморфизм дает в результате разные виды кристаллических сланцев, гнейсы и даже граниты. В аспидных сланцах этот процесс проявился в очень слабой степени, только на самых начальных стадиях. Однако и при этом происходят очень важные преобразования вещества.

Во-первых, минералы теряют воду, химически связанная вода, входящая в состав молекул многих глинистых минералов, отделяется от этих молекул и переходит в свободное состояние. Это приводит к тому, что уже уплотнившийся осадок, превращенный в породу —

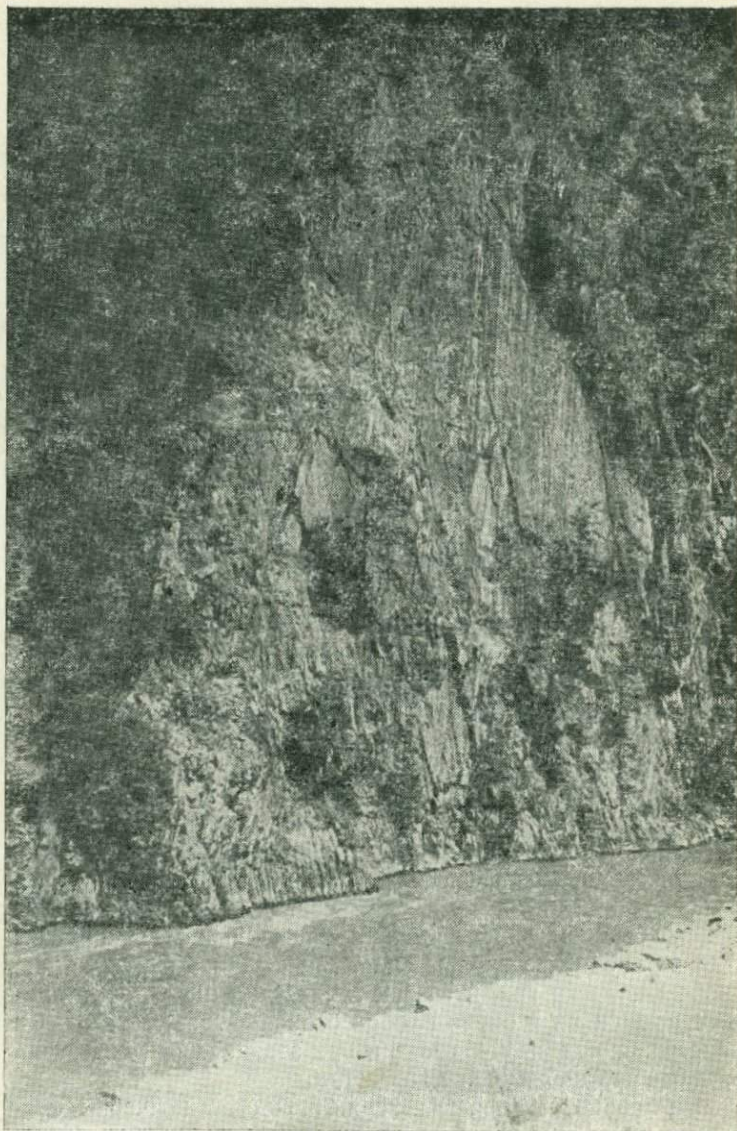


Рис. 9. Кливаж — тонкое расслоение горных пород по системе параллельных трещин — в аспидных сланцах, Ущелье р. Джурмут в Дагестане

глину, в данном случае вынужден разбухать, разуплотняться, поскольку вода прежде всего заполняет пространства между минеральными зернами. Во-вторых, вновь образованные минералы содержат намного больше калия, чем его было в первоначальных исходных глинах. А взять этот дополнительный калий негде, можно только предположить, что он вынесен снизу, из глубоких горизонтов земной коры. Но калий не мог поступать оттуда в сухом виде, он мог быть принесен только растворами. Это должно было привести к еще большему разуплотнению пород. Эти процессы должны происходить в условиях повышенных температур, в интервале от 320 до 400°. Таким образом, как будто самое главное и необходимое условие соблюдается — глинистые породы, попавшие на большие глубины в условиях повышенного теплового потока, неизбежно будут разуплотняться, т. е. понизят свою плотность и увеличат объем. Обстановка инверсии плотностей, необходимое начальное условие диапиризма, создается самой эволюцией первичного вещества.

Обилие свободной воды при этом, заполняющей межзерновые пространства в породе, снижает вязкость и увеличивает пластичность всего объема вещества, попавшего в эти условия.

Привести в действие весь процесс диапиризма, нарушив неустойчивое равновесие в условиях контрастных движений геосинклинали, могут многие причины. Это и собственное разбухание пород, подвергающихся преобразованиям, если оно вызовет изгиб вышележащих толщ. Тогда немедленно нарушится равномерность нагрузки на пластичные подготовленные к всплыванию толщи. Возможно, к тому же результату приводят и неравномерные движения в подошве глинистых толщ, фундаменте, связанные с преобразованиями вещества в более глубоких горизонтах коры.

Так или иначе, все необходимые условия для того, чтобы в геосинклинальном прогибе начался процесс диапиризма, здесь есть. И очень заманчиво предположить, что именно так все и происходит в природе. В отличие от соляных и других диапиров в осадочных толщах этот процесс, связанный с внедрением и восходящим течением метаморфизованных осадков, называют глубинным диапиризмом.

Теперь, когда у нас есть новое предположение — гипотеза о движущих силах и причинах деформации пород и образования складчатости, необходимо еще раз обратиться к фактам, чтобы попытаться по-новому осмыслить их и проверить выдвинутую гипотезу. Прежде всего, требует объяснения наиболее интенсивная складчатость в осевой зоне, сложенная породами аспидных сланцев, т. е. именно той активной толщей, которая внедряется в ядро глубинного диапира. С позиций этой гипотезы образование таких складок совершенно естественно. Пластичные толщи не просто свободно текут в канале, составляющем ядро диапира, а с силой нагнетаются туда, испытывая растяжение в вертикальном направлении и сжатие в горизонтальном. При этом эти слои были скорее всего растянуты предварительно на глубине, при перемещении к основанию ядра диапира. То же самое происходит и с соленосными толщами в обычных диапирах, и там в ядре диапировых куполов в соли отмечается сложная интенсивная складчатость, следы неравномерного течения материала, обусловленного жестким обрамлением вмещающих пород.

Кливаж при данных условиях, эта наиболее характерная черта аспидных сланцев, должен рассматриваться как следы течения — траектории частиц воды, заполнявших прежде массу пород. И действительно, есть много неоспоримых данных, подтверждающих это. Вода оставила следы на поверхностях кливажа в виде тонких пленок отложившихся солей, растворенных в ней прежде. Кливаж оказывается развитым только в тех толщах, которые испытали активную деформацию и нагнетались в ядро диапира. За пределами этого ядра, где упрощается складчатость, кливаж, пронизывающий всю толщу пород, исчезает. Складки в этих зонах, обрамляющих ядро глубинного диапира, должны рассматриваться как пассивная деформация примерно по той схеме, которая известна еще со времени классической гипотезы поднятия, т. е. отчасти сползание с растущего поднятия, отчасти сжатие под влиянием распирающего действия ядра диапира (рис. 10).

Количественные подсчеты, сделанные для проверки такой схемы в некоторых частях складчатой области, в Сванетии, показали, что распирающее действие ядра диапира вполне может обеспечить складчатость, наблюдающуюся в окружающих это ядро зонах, а объем веще-

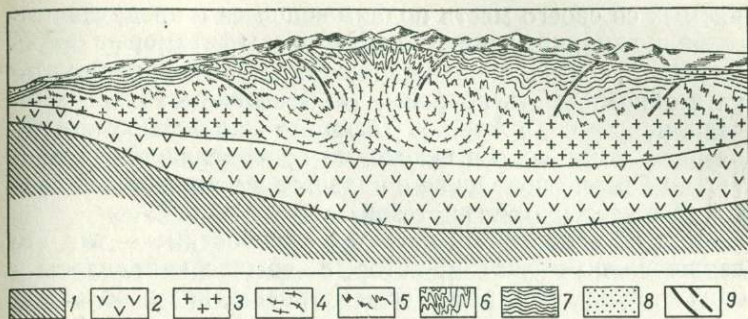


Рис. 10. Схематический разрез земной коры через типичную складчатую область

1 — верхняя мантия; 2 — «базальтовый» слой земной коры; 3 — «гранитный» слой земной коры консолидированный; 4 — активизированный «гранитный» слой; 5 — метаморфические породы; 6 — складчатые осадочные породы в ядре глубинного диапира; 7 — складчатые осадочные толщи; 8 — молодые осадки во впадинах, обрамляющих складчатую область; 9 — разрывы

ства горных пород, выжатых в ядро и образовавших поднятие, компенсируется прогибом соседних впадин. Таким образом, кажется, что наблюдаемая картина складчатых деформаций хорошо согласуется с гипотезой глубинного диапиризма.

Стало быть, нет никаких противоречий между выдвинутой гипотезой и наблюдаемыми фактами, все хорошо объясняется, и проблему складкообразования можно считать решенной? Это, конечно, не совсем так. Есть у этой гипотезы трудности мнимые и действительные. На первый взгляд с позиций глубинного диапиризма кажется непонятным возникновение крупных надвигов и тектонических покровов, часто осложняющих структуру складчатых областей. Эти структуры образуются в результате значительных горизонтальных перемещений целых пачек осадочных пород. Есть такие структуры и на Большом Кавказе, расположенные, главным образом, вдоль его южного склона, на южном крыле мегантиклинория. Однако мы уже отмечали выше, что и в соляных диапирах в некоторых случаях происходит растекание верхней части внедрившегося материала с образованием козырьков и грибообразных шляп. Вероятно, и в случае глубинного диапира образуется нечто подобное — расползание в стороны верхних горизонтов осадочных толщ скорее всего под влиянием гравитационных сил либо просто вытес-

няемых со своего места поднимающимся и внедряющимся в ядро диапира веществом. Часто сам метаморфический материал, составляющий ядро диапира, может растекаться и образовывать покровы. Такое явление хорошо изучено, например, в Альпах. Тогда это еще больше похоже на растекание соли в некоторых приповерхностных диапирах. Так что появление и надвигов и покровов как будто объясняется этой гипотезой.

Что по-настоящему остается непонятным — так это движения по надвигам, которые обычно направлены в одну сторону, т. е. резко асимметричны, как в большинстве случаев в целом асимметрично строение многих складчатых областей. И конфигурация складчатых областей в плане остается в этой гипотезе за пределами объяснений — она заранее задана распределением геосинклинальных прогибов. Но что определяет расположение самих прогибов?

Вероятно, можно задать еще очень много вопросов, на которые сразу нельзя найти ответ. Но сегодня гипотеза глубинного диапиризма наилучшим образом объясняет большую часть наблюдаемых факторов и может считаться наиболее вероятной, ближе всего подошедшей к истинным причинам формирования складчатости в осадочной толще. Само по себе течение и пластическая деформация горных пород не должны теперь вызывать у нас удивления. При определенных условиях это не только нормальный, но и неизбежный процесс. Перемещение, обмен материала при глубинном диапиризме не только в самом активном внедряющемся веществе, но и вместе с окружающими его породами может быть уподоблено хорошо известному в физике процессу тепловой конвекции. В самом деле, жидкость или газ, нагретый в нижней части какого-то объема, немедленно стремится подняться вверх, где, охлаждаясь, вытесняется новыми порциями поступающего снизу вещества. Охладившиеся же сверху порции опускаются вниз. И такое перемешивание будет происходить до тех пор, пока мы не уберем источник тепла. В этом процессе образуются замкнутые конвективные ячейки, по которым происходит циркуляция вещества.

Сопоставление процессов диапиризма с тепловой конвекцией очень перспективно. Оно может послужить основой для теоретических расчетов процесса и для экспе-

риментального воспроизведения образующихся структур в лаборатории. Но как всякая аналогия и эта тоже не очень точна.

Дело в том, что при тепловой конвекции каждая частица вещества неоднократно происходит по траектории конвективной ячейки, — попав снизу вверх и охладившись, она снова стремится вниз, где вновь попадает в зону нагревания и снова вынуждена подниматься. Когда же мы имеем дело с твердыми веществами в геологической природной обстановке, то такой кругооборот, как правило, вряд ли возможен. Попав наверх и охладившись, горные породы теряют насыщавшую их воду и летучие компоненты, а вместе с ними и пластичность. И нет такого механизма, который заставил бы их вновь погрузиться на большие глубины в этом цикле развития. Таким образом, вещество не совершает здесь полного конвективного цикла, а только половину его — легкое попадает наверх, а более тяжелое опускается. Для того, чтобы отличать этот процесс от настоящей конвекции, В. В. Белоусов предложил называть его адвекцией, а сами движения адвективными. Нам еще придется встретиться с ними в дальнейшем, при обсуждении более общих проблем тектоники.

ВСЕ ЛИ «ЗА»?

Теперь будем надеяться, что читателю стали гораздо понятнее проблемы складкообразования и формирования складчатой области. Рассмотрены причины и движущие силы самого процесса, почти все наблюдаемые факты хорошо укладываются в предложенную схему. Складки больше не представляются случайным нагромождением пород, хаосом, что само по себе связано с каким-то неприятным ощущением — не может быть, не должно быть хаоса в природе. Скорее всего должен быть какой-то порядок, иначе она будет непознаваема. Есть непознанное, но непознаваемого быть не должно. Просто, может быть, нами еще не до конца изучены могие природные явления.

Так что же, проблема складкообразования снята с повестки дня? Дискуссия окончена и все геологи согласились с найденным решением? Это, конечно, не так. Споры продолжаются и едва ли не с большим накалом

страстей. Почему все-таки нет решающего аргумента, который сделал бы дискуссию бессмысленной? Главное, вероятно, заключается в том, что сам процесс мы все-таки не видим с такой впечатляющей очевидностью, как рост современных осадочных диапиров на дне некоторых морских впадин. Предлагаемая же схема слишком грандиозна по масштабам, переносит известное явление на объекты другого порядка, поэтому в это трудно сразу поверить. В каких-то частях в предложенную схему действительно надо поверить — не всюду логическая схема процесса глубинного диапиризма строго доказана и тем более проверена численно (математически). Это предстоит еще сделать.

Поэтому многие геологи проявляют известный скептицизм, консерватизм, отнюдь не в плохом смысле слова. Ведь всякое противодействие новой идее помогает выявить слабые места предлагаемой концепции, стимулирует разработку именно этих слабых мест, поиск ответов на самые «коварные» вопросы.

К тому же во многих случаях трудно отказаться от традиционного взгляда, или скорее традиционного подхода к складчатости как поверхностному явлению, которое надо рассматривать с точки зрения общих глобальных концепций. Разумеется, складчатость — явление поверхностное и локальное, но она может и должна изучаться сама по себе, поскольку это очень важный индикатор более общих глубинных процессов, изучение ее должно внести свою лепту в общие геотектонические концепции.

Психологически трудно отказаться и от традиционного взгляда на деформации горных пород как явление пассивное, возникающее под действием внешних сил. В конце концов, такой подход воспитывался десятилетиями, и этому же учит распространенный житейский опыт и здравый смысл. Убеждение, что твердые тела — твердые, распространено значительно шире, чем обратное — твердые тела пластичны. А здравый смысл в науке приходится преодолевать довольно часто, хотя это всегда происходит с большим трудом. К тому же и в природе во многих случаях деформации действительно обусловлены именно внешними силами, что вытекает и из схемы глубинного диапиризма. Но бывает и то и другое: и пассивная деформация, и активная под влиянием объ-

емных сил. И надо научиться отличать одно от другого.

Кажется все же, что сама идея адвективных движений все-таки выводит нас из тупика бесплодных споров, продолжающихся уже достаточно долго. Бесплодных — это, конечно, не совсем справедливо, в каждом споре в конце концов рождается что-то рациональное, даже правильная постановка вопроса часто необычайно важна.

Еще есть и такой аспект этой проблемы, которая на первый взгляд кажется частной. Адвективные движения в соляных и других приповерхностных диапирах известны давно и не вызывают сомнений, известны диапироподобные поднятия огромных масс вещества в гранито-гнейсовых куполах. Не вызывает сомнений, что с механизмом адвекции связаны внедрения многих магматических тел. Сейчас мы получаем все больше и больше геофизических данных о глубоких недрах Земли, из которых следует, что адвективные перемещения — основная форма обмена материалом и энергией между земной корой и подстилающей ее верхней мантией. Тогда метаморфические диапиры уже не выглядят каким-то странным экзотическим явлением, а, напротив, занимают свое законное место в этом ряду.

ГЕОЛОГИЯ, И МАТЕМАТИКА

В НОГУ С ВЕКОМ

Еще будучи студентом, я попал как-то случайно домой к одному чудаку, не геологу, но страстно увлеченному науками о Земле. Он действительно немало размышлял над закономерностями рисунка рельефа земной поверхности. Комната его была завалена, завешана картами, заставлена глобусами разных размеров. На мне была форма, которую в то время носили студенты геологических вузов и факультетов, и хозяин с первой фразы начал атаку:

— Вы геолог? Учитесь? Ну и чему же вас там учат?

— Геологии. Наукам о Земле.

— Но ведь геология не наука! Это просто сумма практических приемов и навыков, которые передаются от дедов к внукам, и с помощью этих сведений вы ищите полезные ископаемые. Вы тычетесь по Земле, как слепой щенок по комнате: нашел молоко — хорошо, попал в банку с ваксой — плохо.

— Ну, это не совсем так. (Я был тогда студентом только первого курса.)

— Нет, это так, и геология не наука, а ремесло. Подобно шитью сапог. Тут тоже могут быть свои таланты, художники, но к науке это отношения не имеет.

— Но есть же в геологии связь явлений, закономерности. Нефть надо искать только в одних местах, а руды полиметаллов — в других. И выбор места для поисков определяется всей суммой сведений о геологическом строении того или иного района. Что же тогда наука?

— Наука — это когда ищут не так, как это делаете вы, геологи. Нужно аналитическим путем, сидя за столом с карандашом и бумагой, точно устанавливать, что где лежит.

— Это же нереально. В природе все очень сложно, запутано. Как это все можно вычислить?

— Но вы ведь не отрицаете того, что в этой сложности должна быть система. Нет? Ну, а если все в природе подчинено каким-то закономерностям, а не пребывает в хаосе, то надо просто найти ключ. Представьте, вы попали в библиотеку, где собраны миллионы томов, и вам надо найти определенную книгу. Вы знаете, что книги стоят в каком-то порядке, но вы не знаете, в каком, и каталога у вас нет. Если искать эту книгу без всякой системы, то вы рискуете бродить по такой библиотеке всю жизнь и не найти того, что хотите. Но если потратить какое-то время на разгадку системы, по которой поставлены книги, и составить каталог...

Этот разговор происходил лет двадцать назад, когда попытки применить точные методы в геологии были очень немногочисленны, а опубликованных на эту тему работ почти не было.

«Геология и математика», «применение математических методов в геологии» — такие и подобные сочетания слов можно слышать в последнее время все чаще и чаще. В геологических журналах печатаются статьи, посвященные математическим методам, выходят книжки, специальные сборники, проводятся совещания по применению математических методов и электронно-вычислительных машин в геологии.

Что же происходит? Не присутствуем ли мы при начале нового этапа в развитии геологии?

Все мы свидетели гигантских успехов точных наук, наглядно показавших, как далеко в тайны природы способен проникнуть человеческий разум, вооруженный математикой. Мы видим, какие огромные, даже сенсационные открытия происходят на стыках разных наук: достаточно назвать хотя бы одну кибернетику. Так, может быть, теперь настал черед геологии? И может быть, математические методы и применение электронно-вычислительных машин приблизят разгадку «главных» тайн нашей планеты — рождения гор, извержений вулканов, землетрясений и закономерностей формирования месторождений полезных ископаемых.

Видимо, и в самом деле, настала очередь геологии. Но на практике все и сложнее, и проще. Возникла довольно странная ситуация. У представителей обычной «классической», или «традиционной», по выражению сторонников математизации, геологии чаще всего нет доста-

точных знаний математики, чтобы оценить в полной мере попытки внедрения математики в геологию. Большей частью при этом чувствуется скрытое или явное сопротивление такому внедрению, порожденное убеждением, что такая сугубо описательная, сложная по огромному разнообразию изучаемых объектов наука, как геология, не может быть втиснута в жесткие рамки сухих формул и уравнений. У сторонников же математизации геологии, как правило, даже если и есть специальное геологическое образование, то нет достаточного опыта, нет глубокого понимания существа геологии. Зато есть полемический задор и очень энергичное желание «вытащить» геологию на уровень авангардных наук XX в. Это подкрепляется твердым убеждением, что «человеческие знания лишь постольку могут считаться наукой, поскольку в них присутствует число». В результате возникает непонимание между этими двумя группами исследователей и даже порой антагонизм. Разумеется, между двумя крайними, противоположными точками зрения существует гамма всех возможных переходных, промежуточных взглядов, отражающих стремление к компромиссу.

Что же предлагают сторонники «математизации»? В нарастающей лавине работ, посвященных этому вопросу, можно увидеть два принципиально разных подхода. Первый — различные методы и приемы, разработанные в разных областях математики, просто предлагается использовать для обработки и интерпретации геологических данных. Взгляд исследователей в первую очередь обращается к математической статистике и к теории вероятностей, поскольку именно эти разделы математики кажутся наиболее пригодными для описания сложных, зависящих от влияния многих факторов естественных процессов и явлений. Дело не ограничивается только этими разделами математики — для решения геологических задач привлекается теория множеств, некоторые разделы топологии, методы распознавания и другие математические дисциплины. Уже видны определенные успехи на этом пути, в особенности в тех отраслях геологии, где первичные геологические данные с самого начала имеют количественную форму. Это геохимия, литология, подсчет запасов полезных ископаемых, некоторые задачи гидрогеологии.

В основе второго направления математизации геологии лежит идея пересмотра всех исходных положений этой науки. Пересмотр предполагается предпринять для выработки строгих формальных определений основных понятий геологии, таких как «геологические границы», «геологические тела» и т. д., из которых затем строго логическим путем, поддающимся математическому описанию, можно было бы получить формализованные понятия всех явлений, с которыми имеет дело геология. Предлагается перестроить все геологические классификации по математическим законам. И дальнейший прогресс геологии, по мысли сторонников этого пути, должен состоять в математическом развитии этого формализованного фундамента, заключенного в математические символы и формулы описания всех геологических явлений. Предполагается по существу создать новую науку, которая была бы математической по форме и геологической по содержанию. По аналогии с другими, родившимися вновь науками (скажем, бионикой) эту, может быть, следует называть «геоматикой».

Во втором направлении, подспудно присутствует идея о том, что геологическим объектам и геологическим процессам присуща какая-то своя новая организация материи — «геологическая форма движения материи», которая не сводится к элементарным физическим и химическим процессам, так же как не могут быть к ним сведены биологические формы существования материи. Одно время эти вопросы широко обсуждались на страницах научных журналов. Однако такой подход к геологии кажется преувеличением. Сложность геологических объектов еще не означает, что все процессы в них определяются какими-то иными не известными нам законами природы. Никому же не приходит в голову выделять какую-нибудь «паровозную форму» движения материи, хотя паровоз довольно сложная машина, в которой происходят разнообразные и многократные превращения энергии.

Первый путь математизации геологии можно назвать симбиозом этих наук. Для второго пути больше подходит определение «синтез». Трудно сразу отдать предпочтение какому-либо из этих путей. Все, что написано дальше, посвящено тому, чтобы оправдать и обосновать выбор первого пути — симбиоза.

КАК БЫТЬ С ИНТУИЦИЕЙ?

У читателя, вероятно, уже возникли кое-какие вопросы. И первый из них наверняка — что же такое классическая геология и ее традиционные методы? Прежде всего — один пример, который, как нам кажется, наглядно демонстрирует если не методы геологии, то характер и методы мышления геолога.

Рассматривая в предыдущем очерке вопросы складкообразования, нам уже пришлось столкнуться с существованием в структурной геологии и геотектонике понятия «интенсивная складчатость». Понятие это очень неопределенно в буквальном смысле, так как оно не имеет строгого научного определения. Но тем не менее геологи довольно часто пользуются им, пытаясь с его помощью подчеркнуть степень деформированности пластов, степень сложности складок. При этом обычно употребляются сравнительные прилагательные «менее», «более», «очень интенсивная» и т. д. Никаких способов измерения интенсивности складчатости нет, хотя неоднократно предпринимались попытки разработать приемлемую методику для этого, и геолог судит об интенсивности складчатости, просто глядя на облик складок, на их форму (рис. 11).

Однажды автор предложил разложить 30 карточек, на каждой из которых была нарисована одна складка, в ряд по возрастанию интенсивности. Этот пасьянс раскладывало несколько геологов и один физик. Оказалось, что ряды складок в каждом варианте, найденном геологами, близки между собой. Некоторые отличия заключались лишь в том, что иногда менялись местами две соседние складки. Но было ясно, что все геологи интуитивно вкладывают в понятие интенсивности складчатости один и тот же смысл. Физик же, который хорошо представлял, что такое складки и с которым неоднократно обсуждали, как попытаться количественно оценить интенсивность складчатости, разложил 30 складок в ряд, ничем не похожий на ряды, предложенные геологами. Никакой закономерности с точки зрения геолога в таком ряду не было.

Из одного этого эксперимента вряд ли можно делать далеко идущие выводы. Но все же, как мне кажется, описанный случай обнаруживает одну очень существен-

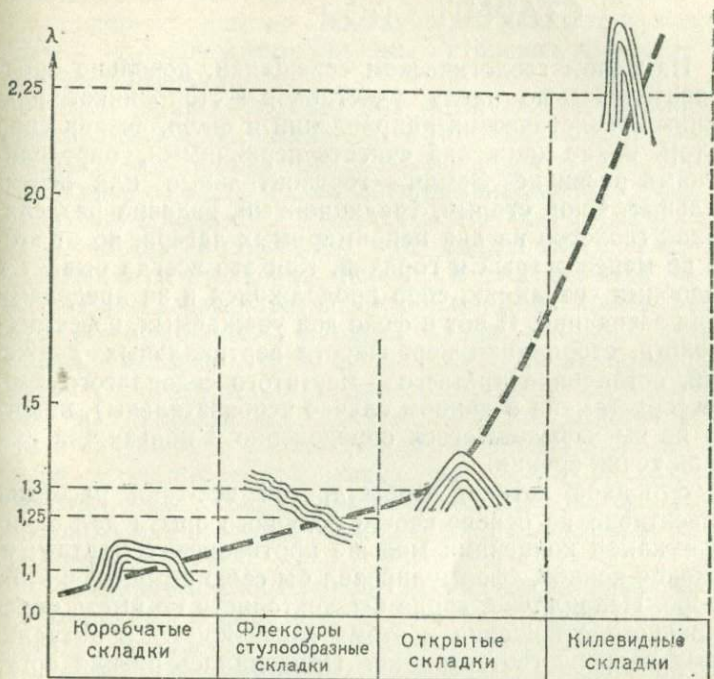


Рис. 11. Зависимость коэффициента избыточной длины слоев λ от формы складок

λ — отношение длины слоя по складке к его горизонтальной проекции может служить условной характеристикой интенсивности складчатых деформаций

ную черту подхода геолога к объектам своего изучения. Совершенно очевидно, что важную роль при оценке явлений у геологов играет специфическая профессиональная интуиция, обусловленная опытом и воспитанная средой. И очень часто такие интуитивные оценки, понятия и определения с большим трудом поддаются не только формализованному, но и вообще логичному описанию. Я не собираюсь ставить это обстоятельство в заслугу геологам или считать это каким-то достоинством геологии. Скорее наоборот. Однако так или иначе с этой спецификой геологии необходимо всегда считаться и полезнее, не отвергая всего накопленного опыта, понять природу особенностей этой науки.

СТАРЫЙ СПОР

На одном геологическом совещании, довольно представительном по числу участников — сторонников различных геологических направлений и школ, возник спор о том, какие движения считать первичными, определяющими развитие Земли — горизонтальные или вертикальные. Спор старый, традиционный, издавна разделяющий геологов на два непримиримых лагеря, но от этого не менее острый и горячий. Как это всегда бывает в подобных ситуациях, спор продолжался и за пределами зала заседаний. И вот в фойе два уважаемых, известных геолога, сторонники первичности вертикальных движений, остановили третьего — маститого седовласого профессора (имена в данном случае необязательны), никогда не высказывавшегося определенно в пользу той или иной точки зрения.

Эти двое хотели, чтобы третий все-таки рассудил объективно на основе своего большого опыта дал оценку — какая концепция меньше противоречит фактам, и, в конце концов, сформулировал бы свою позицию в этом споре. Неприлично, вроде бы, тектонисту не иметь определенного отношения к этому главнейшему и актуальному вопросу геотектоники. Приводилась разная аргументация в пользу вертикальных движений — от фактов до методических концепций.

Профессор яростно отбивался и старательно уходил от ответа на главный вопрос. Он апеллировал к геологическому строению разных областей земного шара, блестяще показывая, что есть факты, подтверждающие одни взгляды, а есть другие, не менее ярко свидетельствующие в пользу противоположных. При этом он очень наглядно, образно «рассказывал» геологию самых разных и далеких районов, в которых ему довелось побывать, я подчеркиваю — рассказывал. Это очень трудно сделать не показывая, без помощи рисунка. Для этого необходимо действительно хорошо знать и очень ясно представлять себе геологическое строение территории. Атакующие продолжали требовать четкого ответа на основной вопрос. И вот прижатый к стене (и буквально и фигурально) профессор вдруг серьезно сказал:

— Знаете, друзья, я думаю, что и те и другие не правы. Геология в основе своей наука развивающаяся, в

природе может встретиться все, что угодно, и задача наша не строить какие-то обобщающие концепции, а заниматься изучением геологического строения каждого конкретного региона.

Руки опустились, спор был окончен. Неожиданно и странно было это слышать из уст известного крупного геолога. И не стоило бы об этом говорить, если бы высказанное отноше́кче к геологии принадлежало бы только этому профессору. Подобные взгляды очень распространены среди геологов, хотя, может быть, и не высказываются столь решительно и определенно. И эти взгляды основываются на том вполне реальном факте, что каждая область, каждый район обладает своими специфическими индивидуальными особенностями геологического строения, полного сходства никогда нет. Нет двух абсолютно одинаковых пластов или пачек, нет двух совершенно похожих друг на друга складок, нет двух полностью совпадающих по составу и структуре магматических тел. В этом состоит одна из существеннейших черт объектов исследования, с которыми имеет дело геолог.

И все же первоочередная задача науки заключается в том, чтобы искать и устанавливать черты сходства в разных явлениях, а уж затем на этом фоне фиксировать различия. «То, что мышь и жираф — животные разные, скажет любой смертный, а вот что оба они — млекопитающие и обладают массой сходных черт, скажет только ученый», — так неоднократно говорил мне тот чудак, с которым мы вели беседы.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ЗЕМЛЯ

Генетики для своих опытов и наблюдений предпочитают иметь дело не с китами или жирафами, а с насекомыми или бактериями — таким образом они «снимают время». Быстрая смена поколений позволяет гораздо быстрее выявить законы наследственности, общие для всего живого. У геологов такой возможности нет. А ведь и им тоже нужно определить законы «геологической наследственности». Геология не меньше, чем биология, наука историческая. Все многообразие геологических тел, структур, вся та сложная картина геологического строения, которую геолог наблюдает на земной поверх-

ности, есть результат сложного и длительного развития земной коры, продолжающегося миллионы, десятки и сотни миллионов лет. Шкала геологического времени относительна. Геолог еще 60 лет назад находился, как писал И. Вальтер, «в положении историка, который может доказать совершенно точно, что за Юлием Цезарем следовал Август, потом Карл Великий, Карл V, Фридрих II, Наполеон I и Вильгельм I, но не обладает никаким средством, чтобы установить, сколько лет протекло со времени начала царствования одного правителя до воцарения другого»*.

Только в последние годы мы получили возможность измерять геологическое время в абсолютных величинах, да и то пока довольно приблизительно. Вместе с тем влияние фактора времени на все геологические процессы и явления огромно. Подчас невозможно даже предположить, хотя бы приблизительно, как будут проявляться и изменяться физические свойства вещества горных пород при длительно (в геологическом смысле) действующих нагрузках, к чему могут привести микроскопические изменения каких-либо свойств или количеств за колоссальной длительности промежутки времени.

Эта особенность геологии лишает исследователей возможности ставить прямые эксперименты в лаборатории. О трудностях экспериментальных исследований различных тектонических, геохимических и других явлений мы уже говорили раньше, обсуждая проблемы складкообразования. Главнейшей лабораторией для геолога остается сама природа, но, к сожалению, мы можем наблюдать один краткий миг в бесконечной истории ее развития. Поэтому одним из важнейших методов геологии является сравнительно-исторический метод. Только он позволяет выявить эволюционные ряды структур земной коры и установить направленность процесса ее развития, что позволит в конечном счете разработать научно обоснованную теорию.

Историзм настолько неотъемлемое свойство геологии, что без какого-либо представления о последовательности событий, об истоках тех или иных явлений невозможно

* И. Вальтер. История земли и жизни. Пер. Г. И. Кваша. СПб, 1912, с. 176.

расшифровать наблюдаемую структуру. Поэтому все попытки сторонников создания формализованной математической геологии на время абстрагироваться от фактора времени, от всех вопросов генезиса и описать формально наблюдаемую статическую картину неизбежно приведут к большим ошибкам и искажениям. Вместе с водой при этом выплескивается (пусть хоть на время) и «геологический ребенок» — самая суть геологии.

Неизбежно, что в этих условиях мышление геолога во многом вынуждено основываться на воображении и даже, как это ни кажется не совместимым с наукой, на выдумке. Ограничения накладываются наблюдаемыми геологическими фактами и общими для всего реального мира физическими законами, хотя границы их применимости в геологии далеко не всегда ясны. Подчас разобраться в истинности или ложности того или иного положения оказывается очень нелегко — ведь геология все еще наука описательная. Часто правым оказывается тот, кто красноречивее, хотя он, может быть, и дальше от истины. В наше время любому исследователю-ученому очень трудно справиться со все нарастающей лавиной фактов, он неизбежно должен их сортировать. Без строгих объективных критериев для такой сортировки вполне возможен или даже неизбежен неосознанный субъективный подбор их.

КАК ЖЕ МАТЕМАТИЗИРОВАТЬ ГЕОЛОГИЮ?

В отличие от биологии в нашей науке сами объекты исследования грандиозны по масштабам, и это приводит к большому различию методов, используемых этими двумя науками. Геологические структуры всегда огромны. При наблюдениях в поле геологические объекты просто напросто подавляют даже опытного геолога, гипнотизируют его своими масштабами, размером, величием. От этого эмоционального воздействия, чаще всего неосознанного, не так легко отвлечься при анализе собранного фактического материала. Однако для строгого научного подхода все же необходимо вырабатывать объективные критерии, которые лучше всего было бы основывать на числе и мере. Подобно тому, как в биологии с

привлечением математической статистики возникла биометрия, так и в геологии, видимо, должна развиваться на основе союза со статистикой новая ветвь, позволяющая объективно и строго классифицировать все объекты исследования геологов. Поскольку геометрия — термин, используемый уже давно, эту ветвь можно было бы назвать «геометрикой» или как-то в этом роде.

Тут не нужно ломать традиции и создавать какие-то новые формализованные понятия, которыми на основе формальной логики пытаются описать все объекты и явления геологии. Скорее наоборот, надо стараться среди разноречивых существующих в геологии определений находить, какое-то среднее, пусть условное, наиболее употребительное и распространенное понимание того или иного термина. И в соответствии с этим классифицировать, искать границы между классами в самих объектах, а не ломать копыя из-за разнобоя в терминологии. К примеру упоминавшееся понятие «интенсивность складчатости» — очень неопределенное и неясное по существу, но часто употребляемое. Как показывает анализ геологической литературы, касающейся этого вопроса, большинство авторов возрастание интенсивности складчатости связывают с увеличением угла наклона пластов на крыльях складок, характером перегиба пластов, увеличением амплитуды складок. Все это касается геометрии, формы складок, и, таким образом, понятие интенсивности складчатости является мерой сложности формы складок, мерой отклонения пластов от их первоначально горизонтального положения. А это уже поддается количественной оценке. Получив формализованную по всем правилам строгую шкалу интенсивностей складок, с помощью той же математической статистики можно попытаться решить и коренной вопрос: от чего и в какой мере она зависит. Широкий простор для союза геологии с математикой!

Однако при этом не следует терять чувство меры, на каждом этапе необходимо ясно представлять себе, что означает для геологической задачи та или иная математическая операция. Количественные параметры могут создать иллюзию большой точности данных, которой на самом деле нет. Кроме того, сложные математические построения и преобразования должны оправдываться задачей, ради которой они делаются.

Как-то раз автор обратился к специалисту, занимающемуся вопросами математической обработки геофизических данных, с просьбой помочь найти количественные показатели, различающие складки разных типов. Тот ответил вопросом: «Ну а вы, геологи, сами умеете их различать?» — «Да, конечно. — «Тогда зачем обращаться к математике и машинам? Не следует надеяться, что машина сможет классифицировать складки лучше, чем это делают сами геологи. Машину можно научить делать только примерно то, что делает специалист-геолог, причем ценой привлечения громоздких математических построений. Стоит ли? Не получится ли стрельбы из пушек по воробьям?»

Математические методы могут оказаться полезными и в такой геологической задаче. Непосредственному наблюдению геолога доступна тонкая верхняя пленка земной коры (10—12 км), покрывающая всего лишь 29% поверхности земного шара — такова площадь суши. Обо всем остальном еще вчера приходилось судить по неполным и косвенным геофизическим данным, а сейчас еще по немногим пока буровым скважинам в океане. А ответы и решения, которые стремится дать теоретическая геология, большей частью касаются всей Земли в целом. Неизбежные при этом экстраполяции и интерполяции данных делаются и здесь часто на глаз и зависят от вкусов и пристрастия того или иного исследователя. Поэтому достаточно очевидно, что «математическое сито» для оценки правомерности тех или иных умозаключений необходимо.

Как в любой естественной науке, в геологии большая роль принадлежит случайности; связи между разными явлениями не строго однозначны, т. е. влияние разных условий и одинаковых факторов не всегда ведет к одним и тем же результатам. Кроме того, нет и никогда не будет возможности с достаточной степенью точности оценить влияние некоторых факторов; скажем, мы никогда не сможем установить абсолютно точно направление и силу течения на дне палеоморей, переносивших и сортировавших осадочный материал. Но все это, конечно, не делает предмет геологии непознаваемым, и уже тем более не дает права считать эту науку эклектичной.

Мы далеки от мысли, что математика позволит геологии разрешить все сомнения, избавит геологию от

всех «проклятых» вопросов, которые служат предметом ожесточенных споров на протяжении всего развития геологической науки. Споры, не приводящие к положительным результатам, когда противники остаются на своих позициях, возникают обычно, если ощущается острый недостаток фактов. И этот недостаток фактов не восполнят никакие математические методы. Однако математические методы могут помочь оценить степень соответствия той или иной точки зрения имеющимся фактам. Хотя, разумеется, окончательное решение геологических проблем будет принадлежать геологическим методам, которые с помощью математики, возможно, поднимутся на более высокий уровень.

Итак, симбиоз... Следует заметить, что мы рассматривали всю проблему ограниченно, только с точки зрения геолога, и поэтому союз наук здесь представляется неравноправным: выгоды от этого союза получает только геология. Геология использует существующие математические методы, и это дает интересные результаты. Однако мне кажется, что если глубже рассмотреть некоторые конкретные геологические задачи (скажем, деформации горных пород в природных условиях) и дать им математическую оценку, то мы увидим, что сложность задачи не позволяет ее решать существующими методами математики, понадобится дальше развивать математический аппарат для решения подобных задач. Один пример такого плодотворного сотрудничества мы рассмотрим в следующем очерке.

Здесь как раз и требовалось, с одной стороны, преобразовывать геологические данные так, чтобы они могли быть обработаны математически, могли быть восприняты ЭВМ, с другой — сами способы и методы математической обработки пришлось приспособлять к оценке разнородных и неравноценных геологических фактов. В этом случае как раз образовался настоящий симбиоз геологии и математики.

Сложность, многообразие и неоднородность геологических объектов позволяют думать, что геология тоже способна поставить перед математикой проблемы, способствующие ее прогрессу. В этом случае симбиоз будет полным, т. е. будет взаимовыгодным сосуществованием.

ПОДЗЕМНЫЕ БУРИ

ВНИМАНИЕ! ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ!

«Сильное землетрясение сразу разрушает все наши старые представления: сама Земля, это воплощение устойчивости, вдруг начинает шататься под ногами, как легкий плотик на воде, за одну секунду в уме поселяется непривычная мысль о ненадежности нашего существования, мысль, которая не могла бы возникнуть даже после долгих часов размышлений», — так писал Чарлз Дарвин после пережитого им в Чили (во время своего кругосветного путешествия с капитаном Р. Фицроем на корабле «Бигл») землетрясения 1835 г. Землетрясения, наряду с извержениями вулканов, — это самые грозные проявления земных стихий, эти катастрофы оказывают сильнейшее воздействие на жизнь людей, их хозяйственную деятельность, их психику.

Весь мир в наше время облетают скупые строчки газетных сообщений о крупных землетрясениях — тысячи убитых и раненых, полностью разрушенные города и селения, ущерб, измеряемый в колоссальных цифрах. Особенно остро ощущаешь всю мощь этой стихии, когда видишь районы бедствия собственными глазами и официальное сообщение наполняется страшными деталями, которые никогда не увидишь в нормальных условиях. Картины, рожденные больным воображением: открытые улице интерьеры квартир, отнюдь не предназначенные для всеобщего обозрения, фрески старинных церквей на ярком солнечном свете, двери, ведущие в никуда, пирамиды камней на месте колоколен, нелепо освещенное изнутри окно собора, так как боковой стены его уже не существует (рис. 12). А по прошествии некоторого времени — пустыри на месте разрушенных или непригодных для жилья домов, усыпанные кирпичами, обломками труб и другими, уже никому не нужными атрибутами человеческого быта (рис. 13).

Таковы последствия крупных землетрясений, которые случаются ежегодно на разных континентах, в раз-



Рис. 12. Землетрясение в Италии 1976 г. в провинции Фриули, г. Венцоне

ных странах и которые будут происходить в следующем году, через год, через десятки лет (рис. 14).

В 1976 г. весь мир был потрясен сообщениями о сейсмических катастрофах в разных районах земного шара; Гватемала, Северная Италия, Северо-Восточный Китай, Индонезия, Филиппины, Восточная Турция — вот далеко не полный перечень тех районов, где сильные землетрясения привели к огромным разрушениям и гибели тысяч людей. Согласно статистике, каждый год от землетрясе-



Рис. 13. Здание начальной школы, разрушенное катастрофическим землетрясением 1964 г. на Аляске

ний погибает 10—15 тысяч человек. После 1976 г. эта статистика надолго утратила свой смысл: ведь при одном только катастрофическом землетрясении в китайской провинции Хэбэй (27—28 июля 1976 г.) погибло не менее 600 тысяч человек...

Вместе с тем сейсмологические бюллетени убедительно показывают, что ни по количеству, ни по силе землетрясения 1976 г. не был исключительным, просто несколько крупных землетрясений произошло в густонаселенных районах. Естественно, чем больше затронет землетрясение города и поселки, тем больше общественный резонанс, хотя по своей силе или интенсивности оно может быть средним. Так было в Ташкенте в 1966 г. В то же время сильное по энергии, но не коснувшееся населенных пунктов землетрясение остается неизвестным широкой публике. Такое землетрясение случилось в Черных горах на Кавказе в 1976 г. О нем знают только специалисты, хотя по энергии этот толчок был намного больше ташкентского. Для сейсмологов и геологов, которые изучают землетрясения, ставя перед собой



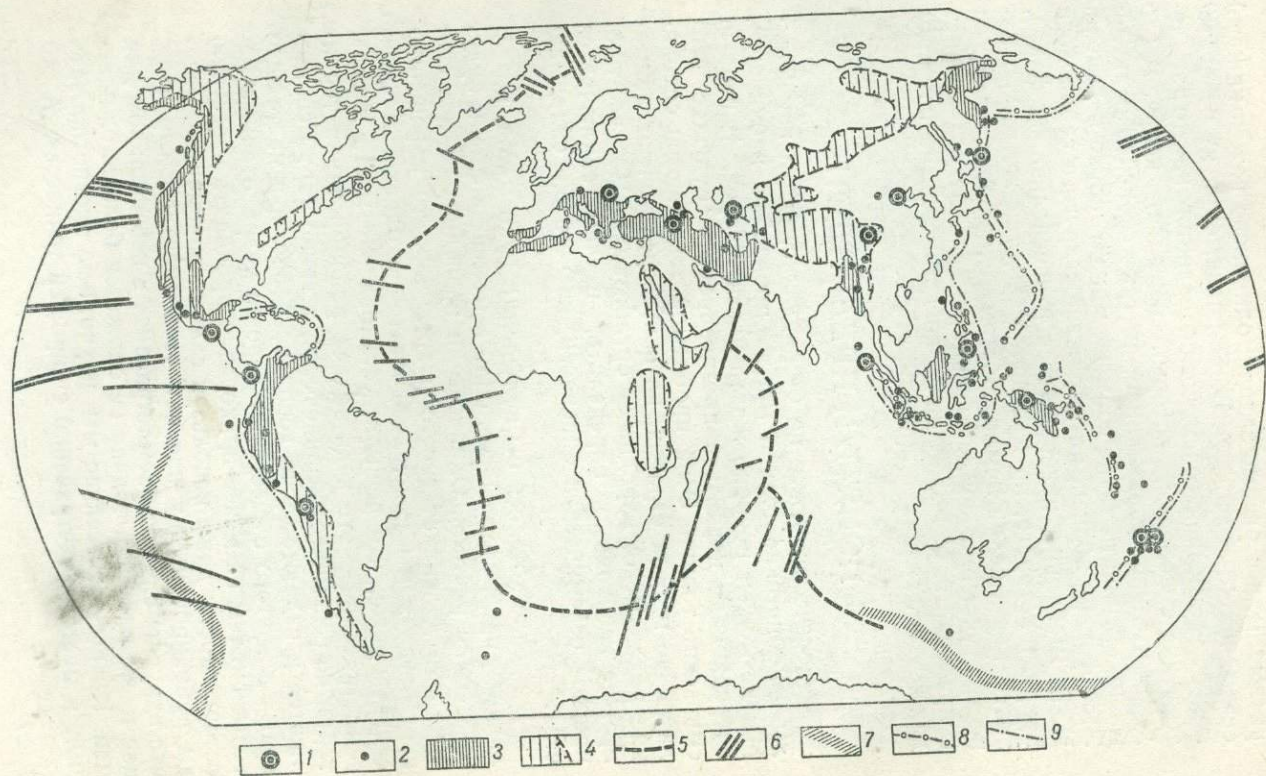
Рис. 14. Гора Уаскаран в Андах и г. Юнгай в Перу до землетрясения 31 мая 1970 г. (вверху) и после землетрясения (внизу).

разные цели и разные задачи, одинаково важен каждый сейсмический толчок. Б. Б. Голицын, один из основателей отечественной сейсмологии, сравнил как-то землетрясение с фонарем, который освещает недра. И это действительно справедливо, но так спокойно и академично оценивать такие события можно только издалека. Этот фонарь вблизи, по выражению другого сейсмолога Н. В. Шебалина, превращается в испепеляющий факел, природу которого, по меньшей мере, так же важно познать, как и недра Земли. Поэтому главной задачей для всех, изучающих землетрясения, всегда будет — понять и предвидеть. И может быть, когда-нибудь на повестку дня встанет задача — предотвратить.

ПОНЯТЬ И ПРЕДВИДЕТЬ

Человечеству вовсе не безразлично, где и какой силы сейсмические толчки могут произойти в будущем. Мы не можем покорно ждать новых ударов. В первую очередь надо научиться прогнозировать будущие сейсмические толчки. Этой проблемой занимаются специалисты во многих странах, на ней сосредоточено внимание ряда международных организаций. Но все-таки прежде необходимо определить, в чем заключается прогноз сейсмической опасности, из чего он складывается.

В идеале хотелось бы получить в руки метод, позволяющий предвидеть место, силу и момент времени будущих землетрясений. Однако если последняя задача еще довольно далека от своего разрешения, то к решению первых двух мы подошли достаточно близко. Хочется сказать даже, что решили; установление места и силы землетрясений — это ведь задача районирования территории по сейсмической опасности, а такие карты составляются и издаются уже довольно давно, и в настоящее время для этого существуют хорошо разработанные методы. Но тем не менее приходится проявлять известную осторожность: даже используя самые современные методы районирования, у нас нет стопроцентной гарантии, что вдруг не случится землетрясение в неожиданном для нас месте или сила толчка не окажется больше ожидаемой. Но все-таки сейчас мы научились прогнозировать силу и место землетрясений с хорошей точностью. А это



уже много. Тогда мы можем строить в соответствующих местах так, чтобы сейсмические толчки не наносили большого ущерба. Кроме того, такое районирование совершенно необходимый шаг на пути решения задачи прогноза времени. Прежде чем решать вопрос когда ожидать, надо знать, где и что ожидать.

Любая карта распределения землетрясений на земном шаре ясно показывает, что их районы тяготеют в пределах континентов к двум поясам: круговому Тихоокеанскому и Средиземноморско-Индонезийскому, а в океанах — к срединно-океаническим хребтам (рис. 15). Эти пояса замечательны тем, что они активны на протяжении последних этапов геологической истории Земли, активны они и в настоящее время: здесь главным образом сосредоточены ныне действующие вулканы и наблюдаются повышенные значения теплового потока, идущего из недр Земли. Эти же пояса отличаются контрастным горным или подводным рельефом и наибольшей неоднородностью различных геофизических полей, что говорит о большом разнообразии строения глубоких недр земной коры и верхней мантии. Поэтому сильные землетрясения не возникают где угодно: они закономерно связаны с определенными геологическими условиями. Из этого следует, что землетрясения тесно связаны с геологической жизнью Земли и являются лишь одним из ее проявлений. Недаром бытует выражение: «землетрясение — это пульс нашей планеты».

ГЕОЛОГИЯ И ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧНОСТИ

Не вызывает сомнений, что анализ сейсмичности и оценку сейсмической опасности не только возможно, но и необходимо проводить с помощью геологических методов исследования. На эту роль геологических исследований впервые с полной определенностью обратил вни-

Рис. 15. Эпицентры крупных землетрясений, происшедших в 1976 г.

1 — эпицентры землетрясений с магнитудой больше 7; 2 — эпицентры землетрясений с магнитудой больше 6; 3 — области молодой (альпийской) складчатости; 4 — области послеплатформенной активации; 5 — оси срединно-океанических хребтов с рифтовыми долинами; 6 — крупные разломы океанического дна; 7 — океанические хребты без рифтов; 8 — островные дуги; 9 — глубоководные желоба

мание один из основателей советской школы сейсмогеологов Д. И. Мушкетов, который писал: «Для всякого рода общих прогнозов, предубждений о той или иной степени безопасности или наоборот «угрожаемости, неблагоприятия по землетрясениям» основными, совершенно необходимыми отправными точками рассуждений будут всегда сеймотектонические»*.

Так почему же при решении прогностических задач, связанных с сейсмичностью, возможно использовать геологические методы анализа? Прежде всего потому, что сейсмичность — это не только показатель современной активности тектонических движений, но и в каком-то смысле продолжение и результат предшествующего геологического развития. Тектонические движения, изменяющие облик Земли, имеют направленный и долговременный характер: они влияют на облик складок и разрывов, наблюдаемых в обнажениях коренных горных пород, на особенности рельефа земной поверхности, на высоту речных террас, мощность аллювиальных отложений, на распределение геофизических аномалий. Поэтому тектонические движения нужно изучать в комплексе различными геологическими методами в широком понимании этого термина, т. е. включая в него геофизические, геоморфологические, геодезические и другие методы, все то, что позволяет выяснить геологическое строение и историю развития исследуемого участка земной коры.

Необходимость же использования геологических данных при оценке сейсмической опасности не столь очевидна, и отношение к этому вопросу не у всех одинаково. Некоторые сейсмологи утверждают, что уже накоплена достаточная статистика происшедших и зарегистрированных землетрясений, позволяющая судить о сейсмической опасности различных территорий только по ней. Действительно, во многих местах (например, в отдельных районах Индонезии, Филиппин, Японии) землетрясения настолько сильны и часты, что вывод о большой сейсмической опасности в этих районах очевиден. Опасными считаются и все другие районы, где когда-либо на человеческой памяти происходи-

*Д. И. Мушкетов. Опыт сейсмического районирования в СССР. — Труды сейсмолог. ин-та, № 33, вып. 1, 1933, с. 21.

ли сильные землетрясения. И все же для большей части Земли статистических сведений о сильных землетрясениях явно недостаточно. Накопление упругих напряжений перед землетрясением может продолжаться в течение сотен и тысяч лет. Поэтому вполне возможно, что многие очаговые зоны, постоянно действующие в геологическом масштабе времени, еще не проявились на глазах человека и, следовательно, не обнаружены. Многочисленные примеры из сейсмологической практики хорошо иллюстрируют это положение. Ашхабадское катастрофическое землетрясение 1948 г. произошло в одном из наиболее населенных районов Туркмении, обжитых достаточно давно; таким же неожиданным оказалось и Крымское землетрясение 1927 г. или некоторые землетрясения в Италии, Югославии, Греции.

Особенно плохо обстоит дело со статистикой землетрясений в малонаселенных местах, например, в пределах Восточной Сибири, если говорить о территории СССР. Специалистам понятен пример с катастрофическим Муйским землетрясением 1957 г., происшедшим в Забайкалье в тех местах, которые считались в сейсмическом отношении практически безопасными. Не менее поучительными оказались Газлийские землетрясения 1976 г., в полупустынных и пустынных районах Узбекистана. А ведь именно эти места являются в последнее время объектами интенсивного освоения: Забайкалье — это БАМ, Газли — это газ. У нас в стране теперь уже всем специалистам ясно, что на одной только сейсмостатистике действительного прогноза не получишь. Нужно искать новые пути оценки потенциальной сейсмической опасности.

Более 40 лет назад сейсмологи обнаружили очень интересную закономерность статистического распределения землетрясений по их энергии: количества землетрясений разных энергетических классов связаны между собой определенной зависимостью. Отсюда был выведен так называемый «закон повторяемости», из которого следует, что если известно количество (частота) слабых землетрясений, возникающих на той или иной площади за определенный промежуток времени (скажем, за год), то можно предсказать частоту (вероятность) возникновения сильных землетрясений. С помощью чувствительных сейсмографов можно зарегистрировать в

тектонически активном районе много слабых землетрясений за сравнительно короткое время, и, если принять такой подход, необходимость детального геологического изучения территории отпадает: все можно узнать на основании только сейсмологических наблюдений. Однако с геологической точки зрения такой подход оправдан лишь по отношению ко всему земному шару в целом или к крупным регионам, где имеются геологические ситуации, одинаково благоприятные как для слабых, так и для сильных землетрясений. А это далеко не всегда так. Довольно давно Д. И. Мушкетовым было подмечено, что для областей альпийской складчатости, скажем Кавказа, характерна бóльшая частота, но меньшая сила землетрясений, чем для молодых горных областей, возникших на месте платформ, таких как Тянь-Шань. Однако не только в этом слабость использования «закона повторяемости» на практике. Этот закон статистический, и его применение возможно только при очень высоком уровне фона слабых землетрясений, т. е. в тектонически весьма активных районах. В менее сейсмичных областях для увеличения статистики необходимо собирать ее с большей территории, в которую попадают районы с разной степенью сейсмической активности. Соответственно и прогноз в данном случае будет обобщенным, недостаточно детальным. Практика подтверждает, что статистический подход в любых его разновидностях мало пригоден для оценки потенциальной сейсмической опасности.

Таким образом, ясно, что привлечение геологических данных для оценки потенциальной сейсмической опасности необходимо. Однако не так легко ясно ответить на вопрос, как надо привлекать эти данные и что конкретно могут сделать геологи, работающие в этом направлении. Формулировка задачи прогноза очень проста: стоит изучить конкретные геологические условия мест возникновения землетрясений определенной силы (назовем их эталонными), найти в природе такие же точно районы, где землетрясения еще не произошли, и проблема прогноза места и силы землетрясений будет решена. Примерно так в конце 40-х — начале 50-х гг. известный советский сейсмолог И. Е. Губин сформулировал «сейсмотектонический метод сейсмического районирования», положивший начало традиционным методам прогноза

сейсмической опасности с привлечением геологических данных.

Легко заметить, что в этой задаче две части: 1) обучение—изучение геологических условий мест возникновения землетрясений определенной силы и 2) собственно прогноз — распознавание в природе таких же районов, где землетрясения еще не произошли.

КАК ИЗУЧАТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Для того, чтобы «фонарь» — землетрясение действительно что-то осветил, нам надо его свет уловить и зарегистрировать как можно более подробно и точно. Поэтому каждое крупное землетрясение необходимо обследовать — изучить и не только геологам, конечно, но и сейсмологам в первую очередь.

28 июля 1976 г. на Северном Кавказе в районе г. Грозного произошло сильное землетрясение... Впоследствии оно, как и некоторые другие грозные проявления сил природы, например тайфуны, получило собственное имя — «Черногорское». В этом выражается определенная дань «уважения» людей к тем событиям, которые особенно сильно влияют на нормальное течение человеческой жизни и могут считаться неординарными. Но в отличие от тайфунов, которым обычно присваивают женские имена — «Джесси», «Мэри», «Бетси» (чтобы были добрее, наверно), собственное имя землетрясения чаще всего связано с его географическим положением. Черногорское землетрясение обязано своим названием Черным горам в Чечено-Ингушетии, где был его эпицентр.

Для обследования Черногорского землетрясения была немедленно создана комплексная группа, состоявшая из сейсмологов — специалистов по сейсмической аппаратуре, по проведению инструментальных наблюдений и обработке их результатов, по обследованиям поврежденных и разрушенных зданий, а также из геологов, геоморфологов, геофизиков.

Терять время при обследовании землетрясений ни в коем случае нельзя по многим причинам. Сейсмологам — потому, что после главного сильного толчка-удара очаг обычно некоторое время продолжает излучать сейсмическую энергию в виде серии последующих более сла-

бых толчков — афтершоков — потрескиваний. Чем быстрее в районе очага расставить временные сейсмические станции, тем больше афтершоков удастся записать, а эти данные позволяют определить размеры очага, его развитие во времени, тип и характер среды, в которой он возник. Геологам — потому, что возникающие при землетрясении деформации земной поверхности (трещины, оползни, обвалы) быстро залечиваются природой, особенно в условиях горного расчлененного рельефа и влажного климата, что характерно и для Северного Кавказа. Любое промедление приведет к тому, что мы увидим первоначальную картину искаженной и восстановить ее уже будет невозможно. По той же причине нужно оперативно действовать и инженерам-сейсмологам: жители стремятся быстрее восстановить повреждения, вызванные в зданиях землетрясением. К тому же характер разрушений и деформаций земной поверхности часто могут быть усилены многочисленными повторными толчками.

29 июля 1976 г., на другой день после главного толчка, группа по обследованию Черногорского землетрясения существовала еще только на бумаге, ей еще только предстояло собраться в районе эпицентра, а специалисты, в нее входящие, занимались текущей работой — в Москве, Сочи, Тбилиси, Махачкале, Грозном, проводили полевые геологические исследования в Азербайджане. Тем не менее первая временная сейсмическая станция в районе очага Черногорского землетрясения начала работать с 1 августа, осмотр эпицентральной области с вертолета начался 3 августа, а геологи приступили к обследованию 5 августа. В данном случае (к сожалению, относящемуся к разряду исключительных) время упущено не было.

При обследовании крупных землетрясений перед геологами всегда стоят две задачи. Первая — отыскать места, где в результате землетрясения произошли изменения земной поверхности, тщательно описать их и сделать заключение о географическом положении эпицентра землетрясения и характере его очага. Вторая — выяснить геологическое строение района очага землетрясения, те характерные особенности поверхностной и глубинной структуры, истории ее формирования, которые связаны с возникновением данного землетрясения.

При первом же осмотре зоны Черногорского землетрясения с воздуха стало ясно, что значительные изменения облика поверхности произошли в Черных горах в долине р. Гехи, на небольшом участке размером $0,5 \times 1,0$ км. С вертолета были прекрасно видны свежие поверхности срыва коренных пород с крутых склонов, следы перемещения обвальных масс, проторившие широкие просеки в лесах, покрывающих расположенные ниже пологие склоны, многочисленные обвальные подпруды в долине р. Гехи и на ее притоках, образовавшие цепочки небольших озер, над поверхностью которых оказались полузатопленные деревья и кустарник, поваленный тут и там буковый лес с огромными стволами, разбросанными и повернутыми в разных направлениях, иногда с вывернутыми корнями, поломанными и расщепленными стволами, взмученное озеро с темной водой и обнажившимся коричневого цвета дном, ставшим теперь берегом. Вся эта картина производила впечатление нелепое и такое же по сути своей неестественное, как картины пострадавших при сильном землетрясении городов и поселков.

Нигде в других местах в районе Черногорского землетрясения таких заметных деформаций земной поверхности обнаружено не было.

Детальное изучение долины р. Гехи было проведено уже на земле. Оказалось, что все деформации поверхности на этом участке относятся к двум группам явлений. Во-первых, — это обвалы и отрывы коренных пород (конгломератов, и глин) на крутых незалесенных склонах, когда огромные массы породы перемещаются вниз по склону и образуют у его подножия конус осыпей из разнообразных по размерам обломков, в том числе глыб до нескольких метров в диаметре. Во-вторых, массовое оползание и растрескивание поверхностного слоя современных осадков, накапливающихся на пологих склонах в результате выветривания гор, так называемого делювия, сложенного глинистыми и суглинистыми породами. При таком оползании движение масс горных пород происходит вниз по склону. Горы как бы попытались «стряхнуть» с себя плащ делювия. В результате и без того довольно рыхлый делювиальный покров еще больше разрыхлился: в верхней части склонов образовались зияющие продольные и поперечные трещины глубиной

до 2—3 м, ниже по склону и во фронтальных частях оползней возникли валы скучивания пород высотой до нескольких метров. Во многих случаях соскальзывание поверхностного суглинистого слоя в верхних частях склонов привело к тому, что здесь породы оказались наклоненными назад и под тяжестью деревьев опрокинулись на 90° («встали на ребро»). В очень многих местах образовались почти непроходимые завалы, гладкие уступы поверхностей срывов, земляные торосы.

Оползни и обвалившиеся массы в ряде мест достигли русла р. Гехи и ее притоков, перегородив их небольшими плотинами, выше которых по течению образовались озера. К счастью для людей, все эти достаточно сильные изменения ландшафта произошли в ненаселенной местности и в будний день (перекосившееся после землетрясения озеро было излюбленным местом отдыха окрестных жителей). Поэтому никто не пострадал.

Естественно предположить, что именно район наиболее интенсивных остаточных деформаций земной поверхности соответствует эпицентру землетрясения по геологическим данным — «геологическому эпицентру». Однако такое заключение без дополнительных исследований было бы преждевременным: вдруг в долине р. Гехи существуют какие-то особенные условия, способствовавшие образованию описанных эффектов. Достаточно хорошо известно, что интенсивность землетрясения резко возрастает и на сравнительно далеких от его эпицентра участках из-за «неблагоприятных» грунтов, высокого уровня грунтовых вод и т. д.

В случае с Черногорским землетрясением дело обстоит не так. В соседних речных долинах в Черных горах были обнаружены в некоторых местах даже более благоприятные условия для возникновения обвалов и оползней. Однако они там не образовались; следовательно, наибольшие колебания земной поверхности были все-таки в долине р. Гехи, и именно здесь располагался «геологический» эпицентр Черногорского землетрясения.

Второй вывод, который был получен в результате обследования, не менее важен. С геологической точки зрения все остаточные деформации земной поверхности в долине р. Гехи были не очень сильными. Действитель-

но, они охватили не очень большую площадь. В результате землетрясения даже такие сравнительно неустойчивые рыхлые породы, как конгломераты, не были разбиты трещинами на отдельные блоки, срывы в них произошли только на крутых склонах, где обвалы часто происходят просто в силу их нормального развития и без влияния таких внешних причин, как колебания, вызванные землетрясением. Старые единичные обвалы коренных пород наблюдаются в Черных горах повсюду, не только в долине р. Гехи. Хорошо известно, что обвалы вообще типичны для горных областей.

Точно так же дело обстоит и с массовым оползанием поверхностного покрова. Оползни в Черных горах — довольно частое явление. Они происходили и раньше во многих местах, в том числе и в долине р. Гехи. Этому способствовало широкое распространение здесь глинистых отложений в условиях расчлененного средне- и низкогорного рельефа. Чаша старого озера, существовавшая в зоне землетрясения 28 июля и перекосившаяся после него, также обязана своим происхождением древнему оползнию.

Иными словами, землетрясение в данном случае сыграло роль спускового механизма, а остальные условия для образования обвалов и оползней уже были подготовлены. Остаточные деформации такого типа, как в долине р. Гехи, относятся к сейсмогравитационным. Для них характерно, что они всегда расположены в полном соответствии с рельефом местности, а перемещения масс горных пород всегда происходят по направлению действия силы тяжести. Эти признаки отличают сейсмогравитационные деформации от сеймотектонических, иногда возникающих при сильных землетрясениях. В этом случае деформации, как правило, не считаются с рельефом и смещение масс происходит часто в направлении против силы тяжести. Появление сеймотектонических деформаций отмечает выход очага землетрясения на поверхность Земли.

Анализ остаточных деформаций Черногорского землетрясения позволил заключить, что в данном случае его очаг на поверхность не вышел, а само землетрясение имело либо очаг небольших размеров (а следовательно, и небольшую энергию), располагавшийся неглубоко, либо крупный и глубокий очаг.

Решить этот вопрос можно было только сопоставив результаты геологического обследования с сейсмологическими данными. А они показали, что энергия Черногорского землетрясения большая — его магнитуда составляла 6,3, что вполне оправдывает присвоение ему собственного имени. В XX в. в таком сейсмическом регионе, как Кавказ, до этого события произошло всего пять землетрясений с $M=6,0$. Очаг землетрясения, околнуренный расположением его повторных толчков, занимал обширную площадь, проекция его оси на поверхность достигала нескольких десятков километров в длину. По инструментальным данным было установлено, что очаг располагался на глубине десятков километров.

И это в свою очередь хорошо согласовывалось с результатами макросейсмических исследований: изучение повреждений зданий дало оценку интенсивности землетрясения в 7—8 баллов. Глубокое положение очага обусловило сравнительно небольшую интенсивность землетрясения, несмотря на большую его магнитуду. Помимо сведений об очаге землетрясения важно было решить вопрос о положении его эпицентра — области наибольшей интенсивности колебаний поверхности Земли. В случае с Черногорским землетрясением ситуация оказалась достаточно типичной.

Плотность населения в зоне Черногорского землетрясения наибольшая на Чеченской предгорной равнине. Здесь по повреждениям построек можно было детально околнурить области, где землетрясение проявилось с различной интенсивностью, и составить карту изосейст, обычно показываемых в баллах.

Однако по малонаселенной горной области сведения были отрывочны и противоречивы. Если бы в долине р. Гехи не образовались остаточные деформации, позволившие определить местоположение «геологического эпицентра», провести границу истинной эпицентральной области точно не удалось бы. Это в свою очередь исказило бы расчеты соотношений между энергией землетрясения, его глубиной и балльностью. Такие расчеты, основанные на анализе обследования конкретных землетрясений, совершенно необходимы сейсмологической науке. И вот почему.

Хорошо известно, что инструментальные данные о происходящих землетрясениях начали накапливаться

сравнительно недавно, только с начала XX в., их явно недостаточно для заключений не только о характере сейсмического режима той или иной области, но и просто об основных характеристиках тех землетрясений, который происходили здесь в прошлом.

В то же время во многих сейсмически активных областях, давно и прочно освоенных людьми, в исторических хрониках сохранились подробные описания землетрясений, происходивших здесь даже в очень далеком прошлом. И было бы очень заманчиво и необходимо для увеличения объема сейсмической статистики, продляя ее в глубь веков, использовать эти сведения. Конечно, хотелось бы сравнивать современные и древние землетрясения, пользуясь одними и теми же единицами измерения, так сказать на одном уровне. Но энергия (магнитуда) землетрясения, глубина очага — понятия, выработанные сегодняшней наукой. Естественно, что в летописях таких характеристик не найдешь, а главное внимание там уделяется разрушениям зданий или, говоря современным языком, макросейсмическим данным. По ним можно попытаться восстановить интенсивность сотрясений на поверхности Земли, т. е. построить карту изосейст.

Имея эталонные описания современных землетрясений, когда установлены соотношения между балльностью, магнитудой и глубиной очага, можно восстановить по карте изосейст другие параметры старых землетрясений — их магнитуду и глубину очага. Однако сделать это можно при одном условии — если эталонное описание соответствует геологической обстановке старого землетрясения. Так, например, Кавказский эталон не годится для Средней Азии, а Байкальский — не может использоваться в Карпатском регионе. Более того, в пределах Кавказа Черногорский эталон (Северный Кавказ) будет непригодным для Чхалтинского землетрясения (Южный склон Западного Кавказа) или Зангезурского (Малый Кавказ). Слишком сильно во всех этих местах различается геологическая обстановка: меньше внутри Кавказа, больше при переходе с Кавказа в Среднюю Азию или в Байкальскую зону.

Поэтому всесторонние обследования сильных землетрясений, позволяющие создать набор эталонов, необходимы для качественного пополнения сейсмостатистики. Вот почему такую ценность представляют подробные

описания деформаций земной поверхности, выполненные выдающимися русскими геологами, К. И. Богдановичем, В. И. Вебером, А. В. Вознесенским, И. В. Игнатьевым, Б. Я. Корольковым, И. В. Мушкетовым, обследовавшими такие катастрофические землетрясения, как Верненское 1887 г., Каминское 1911 г., Танну-Ольские 1905 г. и ряд других. Скрупулезное описание характера деформаций земной поверхности, точная их геологическая привязка, детальные описания геологической обстановки зон возникновения землетрясений — все эти особенности давно уже сделали отмеченные описания русских геологов классикой сейсмотектонической и сейсмологической литературы, по праву вошедшей в ее золотой фонд. И эта работа была выполнена в трудных, часто высокогорных условиях, в бездорожье, при отсутствии элементарных транспортных средств и оборудования, доступных в настоящее время любому геологу. Воистину это был титанический труд ученых-энтузиастов! И не удивительно, что вплоть до настоящего времени без анализа этих материалов не создается ни один новый каталог землетрясений СССР, не проводится ни одно серьезное научное исследование по изучению параметров очагов сильных землетрясений, не создается ни одна карта сейсмического районирования нашей страны.

Вернемся, однако, к Черногорскому землетрясению 1976 г. Мы говорили, что есть и другая сторона изучения таких крупных сейсмических событий. Важно установить и понять те конкретные геологические условия, которые оказались способными породить такое сильное землетрясение. Геологическая обстановка, где произошло Черногорское землетрясение 1976 г., довольно типична для сильных землетрясений не только Кавказа, но и всего пояса альпийской складчатости, включающей такие горные области, как Крым, Карпаты, Альпы.

В чем же типичность этой обстановки? Прежде всего, землетрясение возникло на границе двух крупных блоков земной коры, испытывающих на последних отрезках геологической истории — за последние 25 млн. лет — разнонаправленные вертикальные движения. На юге это поднимающийся блок Большого Кавказа, выраженный в рельефе системой горных хребтов (включая Черные горы), вытянутых в общекавказском направлении, т. е. с запад-северо-запада на восток-юго-восток. На

севере это область опускания, Прикаспийская измененность. Обычно земная кора при таких направленных в разные стороны движениях блоков лопается на границе между ними, образуя разрыв. Такой разрыв как раз и ограничивает поднятие Кавказа с севера. Эти разнонаправленные движения крупных блоков земной коры хорошо видны не только в рельефе и геологической структуре, но подтверждаются и геофизическими данными.

Кроме того, через район очаговой зоны протягивается от Казбека до г. Грозного еще одна крупная зона разрыва. Эта зона также активна в четвертичное время — с ней повсеместно связаны молодые лавовые излияния и даже вулканы, т. е. это явно глубокая трещина в земной коре. Направление ее почти перпендикулярно предкавказской, и в районе очаговой области Черногорского землетрясения обе зоны пересекаются, образуя так называемый дизъюнктивный узел.

Черногорское землетрясение произошло не высоко в горах, а в предгорьях, почти на равнине. И это оказывается типичным для многих землетрясений, таких как Шемахинское, Горийское, Дагестанское на Кавказе (все из той же сильнейшей пятерки XX в.), для Верненского и Беловодского — сильнейших на Тянь-Шане, Ашхабадского и Красноводского — сильнейших в Туркмении, а также ряда других как в пределах СССР, так и за рубежом.

Уделив так много внимания Черногорскому землетрясению, мы сумели, во-первых, на конкретном примере увидеть, что должен делать геолог, чтобы изучить происшедшее землетрясение, а во-вторых, мы получили представление о геологической модели возникновения сильных землетрясений — дизъюнктивный узел. Модель не единственная, но очень типичная. Если сравнить геологические условия возникновения разных, достаточно хорошо известных землетрясений, в особенности в области молодой альпийской складчатости, то мы увидим, что во многих случаях они окажутся очень похожими на обстановку Черногорского землетрясения.

Ситуация дизъюнктивного узла характерна для всех крупных землетрясений Кавказа, многих землетрясений на Балканах, в Альпах. Разумеется, в каждом конкретном районе есть свои отличия. Продольный шов, разделяющий разные блоки земной коры, не всегда выражен

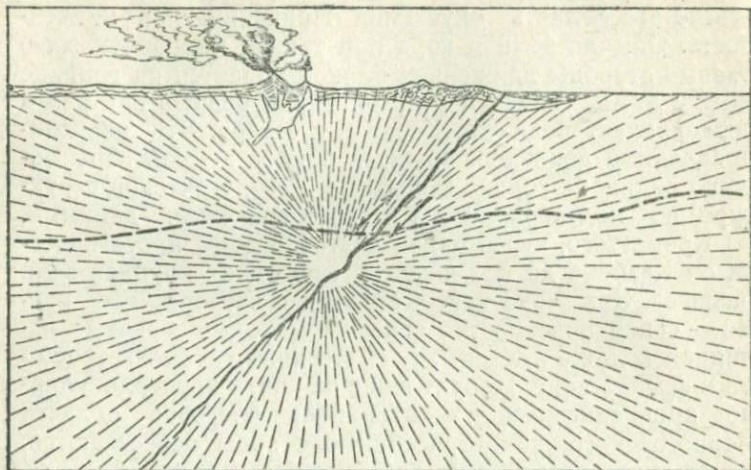


Рис. 16. Одна из возможных моделей землетрясения. Радиальные линии — излучение сейсмической энергии из очага землетрясения. Стрелками показано направление смещения блоков земной коры

на поверхности разрывом, иногда это может быть крутой, резкий перегиб слоев — флексура, да и сами блоки в каждом случае могут быть разными по своим свойствам — более «жесткие», более «мягкие» (рис. 16). Поперечная дислокация может быть также по-разному выражена на поверхности. Не так уж часто это такая же проницаемая трещина, способная проводить магматические расплавы из глубоких горизонтов коры, как это оказалось в случае Черногорского узла. Чаще это скрытые на большой глубине разломы, только косвенно отражающиеся в некоторых чертах поверхностной структуры и рельефа. Однако все эти различия не должны заслонять от нас главное, что роднит и объединяет многие очаговые зоны землетрясений, пересечение крупных разрывных дислокаций в земной коре.

Когда найдена такая модель — это обнадеживает, кажется, что теперь можно научиться распознавать места будущих сейсмических толчков, найти узлы не только известные своей сейсмической активностью, но не проявившиеся до сих пор, по крайней мере на памяти человечества. Но здесь опять-таки не следует спешить с

окончательными выводами. Может быть, сейсмогенными окажутся не только узлы? Все ли узлы одинаковы по своей активности? Мы не случайно говорили выше, что модель узла характерна для многих землетрясений. Для многих, но не для всех. И в узлах происходят землетрясения разной силы.

Очевидно, чтобы научиться по-настоящему прогнозировать сейсмическую опасность, надо рассмотреть какую-то сейсмическую область целиком. Найти и понять закономерности ее тектонической (а значит, и сейсмической) активности.

ТРУДНОСТИ НА КАЖДОМ ШАГУ

Очень легко написать — «найти и понять», но как воплотить это общее пожелание в конкретную и выполнимую задачу? А конкретная задача — это прогноз сейсмичности. Значит надо научиться так описывать геологическую обстановку в той или иной области, чтобы уловить связи этой обстановки с проявлениями сейсмичности. Тогда, опять-таки обучившись на хорошо известных и разных эталонных очагах землетрясений, мы можем надеяться распознавать и другие сходные или аналогичные места, где землетрясения до сих пор не были зарегистрированы.

Достаточно хорошо известно, что очаги землетрясений расположены на разных глубинах внутри земной коры и даже глубже — в верхней мантии. Первая трудность заключается в том, что у нас сегодня нет ни способов, ни инструментов для непосредственного проникновения в сущность процессов, происходящих в самом очаге землетрясения. Мы вынуждены судить об этом по косвенным признакам, выраженным на поверхности Земли, в геологическом строении эпицентральной области землетрясения. В какой-то мере эта геологическая обстановка отражает, конечно, состояние и строение более глубоких недр Земли, где расположены очаги землетрясений, но надо точно знать в какой. Всегда ли сходное строение поверхности соответствует одинаковому состоянию и строению глубоких недр и наоборот.

Очередная трудность заключается в следующем. Если мы хотим описать геологическую ситуацию, харак-

теризующую даже небольшой по размерам участок земной поверхности, то столкнемся с таким количеством геологических признаков, одно перечисление которых займет очень много места. Это, и состав пород, и их возраст, и обводненность, и степень раздробленности, и наличие деформаций пород в виде складок и разрывов, и гипсометрическое положение, и характер рельефа и т. д. И эти геологические свойства земной поверхности меняются буквально на каждом шагу, особенно в горных областях, которые нас больше всего интересуют. Можно утверждать, что конкретное и детальное геологическое описание какого-то места будет характеризовать только само это место, и найти аналогичное ему по описанию окажется невозможным. Значит, нужно от каких-то признаков отказаться, иначе прогноз будет неосуществим. Нужно отобрать среди огромного множества геологических признаков те, которые действительно связаны с сейсмичностью, или, как принято сейчас говорить, будут информативны для решения нашей прогностической задачи.

Для того, чтобы отобрать такие геологические признаки, нужно прежде всего понять, что же такое землетрясение, в чем физика этого процесса. Сейчас достаточно хорошо известно, что это трещина, разрыв сплошности пород, образующийся потому, что тектонические силы преодолели предел их прочности. Следовательно, наиболее важными геологическими признаками, которыми необходимо описывать эталонные учебные районы, в которых произошли землетрясения, будут те, которые отражают физические свойства среды, т. е. земных слоев от поверхности до каких-то глубин. И кроме того, нужно знать как можно больше об активности и направленности геологических процессов, которые приводят к их изменению.

Свойства среды не есть нечто раз и навсегда неизменное для какого-то района. Они формируются в процессе геологического развития территории и поэтому, конечно, различаются в разных участках земной коры, прошедших разную историю и находящихся на разных стадиях ее эволюции. Они неодинаковы в геологически спокойных структурах — на щитах, например Балтийском, в пределах которых первичные осадочные породы были изменены в результате воздействия больших температур и

давлений и интенсивно смяты в складки миллиарды лет назад, а также на платформах, где эти же процессы происходили сотни миллионов лет назад, или в более молодых складчатых областях, вроде Кавказа, не перешедших еще в спокойную платформенную стадию развития. Проще, на щитах и платформах среда «жестче», может только ломаться под воздействием тектонических напряжений, тогда как в молодых складчатых областях она «мягче», податливее, может подвергаться пластическим деформациям. Однако и внутри как будто единых областей существуют большие различия: кристаллическое ядро Центрального Кавказа, например, имеет иные свойства, чем сложенное юрскими сланцами ядро Восточного Кавказа, или область развития вулканических образований Армении. Все эти районы внутри молодой складчатой области также имели разную историю геологического развития, и, как результат этого, земная кора в них оказалась сложенной разными по своим свойствам породами.

Отсюда ясно, что первая группа геологических признаков должна отражать структуру земной коры, строение ее поверхностных горизонтов, а также направленность геологического процесса развития, т. е. степень устойчивости или, наоборот, подвижности тех или иных участков земной коры.

Несколько схематично такое районирование какой-либо области по свойствам среды и по динамике процесса развития отражается в картах историко-структурного районирования, где современная структура земной коры показана с учетом того, какие процессы воздействовали на нее в течение последнего геотектонического цикла, т. е. примерно за последние 200 млн. лет. На такой схеме нанесены поднятия и прогибы, возникшие в разное время, а также однонаправленные и знакопеременные движения, которые испытывал тот или иной участок земной коры. Кроме того, важно знать также характер швов или контактов по-разному развивавшихся блоков земной коры: разрыв это или плавный постепенный переход. Сетка разрывов, пересекающих земную кору и проявляющихся на поверхности, вообще имеет очень большое значение для наших целей, поскольку дает представление о мере раздробленности или монолитности земной коры в каждом данном месте.

Однако одних этих признаков мало. Надо еще охарактеризовать интенсивность и направленность тектонических движений самых последних, ближайших к нам этапов. Известны и хорошо разработаны методы оценки амплитуд (или скоростей) тектонических движений за разные отрезки геологического времени. Так, например, карты новейших тектонических движений отражают в линиях равных амплитуд поднятия и опускания первоначально горизонтальной поверхности в течение около 20 млн. лет. Геодезические измерения дают способы оценки скоростей движения за еще более короткие сроки — десятки лет.

Сравнение таких карт позволяет оценить тенденции геологического развития территории и определить, развивается ли она с сохранением направленности движений («унаследованно», как говорят геологи) или происходит смена знака тектонических движений, и перестройка и разрушение ранее созданных структур земной коры.

Все эти разнообразные сведения, представляющие результат первого «процеживания» обширных геологических данных, необходимы для всего последующего сеймотектонического анализа и решения нашей прогностической задачи. Теперь нужно всю эту информацию процедить еще раз, через «ситечко» с еще более узкими ячейками для того, чтобы выявить так называемые геологические критерии сейсмичности, т. е. геологические признаки, которые связаны с сейсмичностью какой-то определенной зависимостью.

Поиск геологических критериев сейсмичности — один из важнейших этапов исследования и даже одно из направлений сеймотектоники. На практике этот поиск можно осуществлять различными путями, однако главным является сопоставление исходных геологических данных с сейсмичностью в пределах определенной территории.

Продельвая такую операцию, мы убеждаемся, что сильные землетрясения часто возникают не только в дизъюнктивных узлах, но и вообще в зонах сочленения крупных структурных блоков, по-разному развивающихся в течение длительных периодов геологической истории, в том числе и на ее последних этапах. Примером может служить сочленение горного сооружения Тянь-

Шаня с обрамляющими его с севера и юга равнинными пространствами. Здесь произошли катастрофическое Верненское землетрясение 1911 г. и Беловодское 1885 г. В такой же зоне сочленения между горами Копетдага и равниной пустыни Каракум произошло Ашхабадское землетрясение 1948 г.

Часто сильные землетрясения происходят в зонах контрастного сочленения двух участков земной коры, что морфологически выражено в виде уступа в рельефе. Можно заметить, что существует высокая степень корреляции между сильными землетрясениями и зонами высоких градиентов аномалий силы тяжести, зонами высоких градиентов новейших тектонических движений, зонами активного проявления новейшего вулканизма и т. д.

Как мы ни «процеживаем» геологические данные, даже после двух таких операций мы остаемся с огромным набором геологических критериев сейсмичности даже для одной какой-то области. А в разных областях, имеющих разную геологическую историю, и набор таких критериев будет разным. И поэтому как бы не было заманчиво и удобно найти какой-то один «универсальный» критерий, однозначно связанный с сейсмичностью, все такие попытки обречены на неудачу.

Как это ни печально, мы пришли почти к тому же, с чего начали: правда теперь хоть ясно, какие геологические признаки должны входить в конкретное описание эталонных участков, где уже прошли землетрясения. Само такое описание, правда, занимает много места, но оно по крайней мере стало реальностью. Обучение закончилось...

Теперь можно перейти ко второй части сейсмотектонических исследований — решению самой задачи, т. е. к прогнозу. Действительно, для этого, кажется, есть уже все необходимые компоненты. Известны участки, где произошли крупные землетрясения. Есть набор геологических признаков, которыми нужно описывать эти эталонные учебные районы; и задача прогноза сводится к тому, чтобы найти похожие на эталонные описания территории, в которых еще не произошли до сих пор крупные землетрясения.

Нетрудно заметить, что в этой формулировке есть очень большая неопределенность. Что означает найти

«похожие», «такие же точно», «аналогичные» (можно дать еще несколько словесных определений, обычно встречающихся в сейсмогеологической литературе) места? В чем должна заключаться мера похожести, ее степень?

Мы несколько раньше говорили о геологических критериях сейсмичности и показали, что сами они достаточно широкие понятия, неопределенные, выраженные в качественной форме. Например, зоны сочленения крупных структурных комплексов — это и граница Тянь-Шаня с обрамляющими его равнинными пространствами, и переходная зона между Восточным Кавказом и Алазано-Агричайской депрессией. А они ведь чрезвычайно разные и по протяженности, и по типу сочленяющихся структур, и по размаху движений между ними и т. д. Или дизъюнктивные узлы: одни располагаются в условиях высоко поднятого рельефа, другие практически на равнине, в их пределах пересекаются разрывы разной протяженности, ширины, степени подвижности и т. д.

И так практически обстоит дело с любым из найденных геологических критериев сейсмичности. Мы никак не можем вырваться из этого заколдованного круга. Мы шаг за шагом «процеживаем» геологическую информацию и каждый раз убеждаемся, что наше «ситечко» опять не выполнило своих функций.

Где уж тут пытаться найти «точно такие же» или «аналогичные» места. А решать задачу нужно — нет иного пути для прогноза сил и мест будущих землетрясений.

ДВА ПУТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В сейсмотектонике к настоящему времени сложились два направления решения прогностической задачи, которую мы шаг за шагом рассматриваем. Первое — это традиционные, как мы теперь называем, методы выделения сейсмоопасных зон по комплексу геологических признаков. Это направление зародилось в конце 40-х — начале 50-х гг. и интенсивно разрабатывается поныне. Второе — формализованные методы перехода от геологических критериев сейсмичности к определению зон возникновения ожидаемых землетрясений, которое начало разрабатываться значительно позже, в начале

70-х гг. Оба направления ставят перед собой одну и ту же цель — найти меру похожести, о которой мы только что говорили, но решается эта задача в каждом случае по-разному.

При использовании традиционного метода решение достигается с помощью привычных приемов — снова отбирается или процеживается информация через пресловутое «ситечко». На этот раз приходится делать выбор уже среди найденных критериев сейсмичности, отбрасывая некоторые из них. Хотя отказываться от любого критерия, найденного с таким трудом, очень жаль. Но на это мы вынуждены идти и вот почему. Нам ведь нужно вполне конкретное решение, т. е. выделение в той или иной области зоны возникновения землетрясений различной силы. Оценить с этой точки зрения ситуацию в любой сейсмически активной области, держа все время в голове десять или даже больше признаков, так или иначе связанных с сейсмичностью, не под силу ни одному даже очень опытному специалисту. Можно одновременно сопоставлять и взаимно увязывать между собой два-три, ну, четыре признака, но не десять. Вот и получается, что из всего набора геологических критериев сейсмичности волей-неволей выбирается какой-то один главный. После чего мысленно задается какая-то модель очага землетрясения. И тут уж действительно все зависит от опыта специалиста. Наиболее распространенной моделью очага, выработанной практикой, оказывается все тот же дизъюнктивный узел. На следующее по важности место могут быть поставлены швы, разделяющие разные блоки земной коры.

После того, как принято решение о выборе модели очага — хотя иногда это решение остается на уровне интуиции — нужно только отметить на карте все узлы пересечения разломов разных направлений и наиболее крупные швы между блоками земной коры, а затем разделить их все на какие-то категории по степени опасности. Эта операция тоже не такая уж простая, но все же поддающаяся описанию по установленным правилам. Наиболее опасные узлы — высшая категория — это пересечение самых крупных и активных на последних этапах геологической истории разломов; следующая категория — пересечения крупного активного разлома более мелкими и т. д. Так примерно обстоит дело и со швами.

А дальше остается только проверить, какие землетрясения уже происходили хотя бы в некоторых узлах разных категорий, и задача прогноза места и силы землетрясений решена.

Но все-таки нет при этом полного удовлетворения. Остается много неопределенного. Степень «похожести» узлов и швов отчетливо не сформулирована. При разделении узлов на категории каждый исследователь стремится не подходить формально к решению задачи и пытается в меру своего опыта и интуиции учесть влияние и других геологических критериев сейсмичности в разных их сочетаниях. На этом пути можно прийти к правильным решениям. Однако проверить их невозможно и нет никаких гарантий того, что разные специалисты получат при одних и тех же данных одинаковый результат.

Кроме того, слишком просто и даже до обидного грубо выглядит при таком традиционном подходе конечный результат. После подробного вырисовывания мелких деталей на первоначальных картах фактических данных (историко-структурной, новейших движений), на резуль- тативной карте зон возникновения землетрясений все выглядит очень упрощенно. Начав с очень скрупулезно- го сбора фактических данных и построения детальных карт, мы постепенно сознательно, хотя и вынужденно, растеряли эту детальность. Огромное количество собранной информации, и даже большая ее часть, оказалась неиспользованной.

Видимо, именно это в первую очередь заставляет двигаться дальше, искать какие-то новые пути. Для этого, пожалуй, полезно более пристально взглянуть в стороны традиционного метода, которые являются, очевидно, слабыми и которые, в конце концов, приводят к тому, что результат нас не очень удовлетворяет. Главным здесь является то, что мы оказались не в силах полностью учесть добытые нами критерии сейсмичности, выяснить их взаимное влияние друг на друга и связь каждого из них с уровнем сейсмической опасности.

Приходит в голову, что в этом случае должны помочь математические методы. Исследование сложных процессов и явлений, когда событие связано с многими действующими на него факторами и обусловлено многими признаками, причем нет ясных функциональных связей между этими признаками — это будто бы как раз область

таких разделов математики, как статистика и теория распознавания образов, и следовало бы попытаться воспользоваться данными методами.

Но прежде всего возникает необходимость представить все геологические данные в таком виде, чтобы они были пригодными для всякого рода математических операций, т. е. формализовать их. Это, пожалуй, самая длительная и самая мучительная часть работы — выработка общего языка, понятного и математикам, и геологам. Описание всех геологических структур и процессов следовало выразить на каком-то коде, который могла бы читать и обрабатывать ЭВМ. Разумеется, незачем вводить в машину все геологические понятия; в первую очередь для нашей задачи надо было «научить» машину разбираться в геологических критериях сейсмичности, в их градациях или степени проявления каждого признака. Для этого пришлось самим геологам вдуматься в каждый критерий и установить хотя бы качественно какую-то меру выраженности его: «сильно», «слабо», «средне». Надо сказать, что в ряде случаев ЭВМ подправляла неизбежно субъективные оценки геологов и не то, чтобы подсказывала, что именно надо сделать, но отмечала те места в градуировке признаков, где нарушалась логика или фактическая связь геологического признака с сейсмичностью оказывалась не такой, как предполагалось.

Когда был пройден этап взаимного обучения выражать критерии сейсмичности в числе и мере, настала пора описать таким способом какую-то сейсмически активную область. Был выбран хорошо известный и испытанный для разных других задач полигон — Кавказ. Но как описать целый регион? Это можно сделать разными способами (рис. 17).

Остановились на том, что удобнее всего разбить всю территорию сеткой на клеточки или ячейки и последовательно в закодированном виде описывать каждую ячейку необходимыми признаками. Клеточки должны быть достаточно малы, чтобы геологическая обстановка в пределах каждой не очень сильно менялась, но и не слишком малы, чтобы была уверенность, что эпицентры зарегистрированных землетрясений всегда будут отнесены к определенной клеточке, а не попадут в соседнюю. Поэтому размер клеточки был выбран $10' \times 15'$ или круг

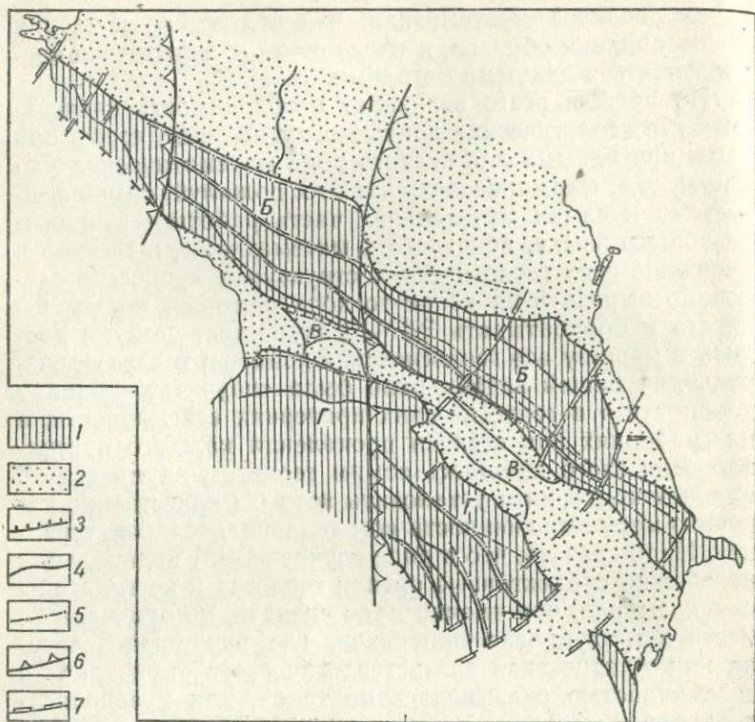


Рис. 17. Схема разделения Кавказа на систему блоков

А — Предкавказская равнина; Б — Большой Кавказ; В — Закавказский межгорный прогиб; Г — Малый Кавказ.

1 — приподнятые блоки; 2 — опущенные блоки; 3 — границы крупных тектонических структур; 4 — границы структурных зон; 5 — региональные разломы; 6 — крупные поперечные флексуры и разломы; 7 — то же, более низкого ранга

с радиусом 15 км — это и есть точность инструментального определения эпицентров. Способ описания удобный и понятный. Но какую бурю возражений он вызвал: «Вместо естественных геологических границ, структур, блоков — формальная сетка! Расчленение единства и многообразия геологических явлений на формальные признаки, да еще искусственное сечение по клеточкам!» Все это так, но если вдуматься, то ничего страшного в применении сетки и ячеек нет. Это тот же прием, который используется в мозаике, а то, что мозаика является одним из технических приемов живописи, ни у кого сом-

нений не вызывает. Все зависит от размеров смальты, составляющей изображение. Крупные куски сложатся в обобщенную грубую картину, мелкие — способны сделать изображение неотличимым от масляной живописи. В нашем случае, не преследующем эстетических целей, Кавказ выглядит несколько угловатым, но вполне узнаваемым (рис. 18, 19).

Теперь, когда найдены способы и методы формализованного описания критериев сейсмичности, оставалось только сделать такое описание. На территории Кавказа оказалось примерно 1200 ячеек выбранного размера, и каждая из них получила стандартное (10 признаков), но индивидуальное (по степени проявления каждого признака) описание. Из общего количества ячеек было отобрано около 100, где были зарегистрированы сейсмические проявления разной силы: сильные, средние и слабые. И эти 100 ячеек образовали «учебный материал», из которого ЭВМ должна была составить синтетический «образ» — сильной, средней и слабой сейсмической опасности. На половине учебной выборки машина обучалась и устанавливала вклад каждого признака в уровень сейсмической опасности, а по другой половине проверяла результат обучения. Так повторялось несколько раз: различным образом разбивая учебную выборку на обучающую и проверочную части, пока решение не оказалось устойчивым, т. е. распознавание уровня сейсмичности в контрольной выборке не стало стопроцентным.

Ответ ЭВМ — решение задачи — выглядит очень просто: десять графиков, которые показывают вклад каждого признака в предполагаемую сейсмическую опасность. Суммируя вклады по всем десяти признакам, мы получаем прогноз сейсмичности сразу в величине магнитуды (энергии) ожидаемых землетрясений. После этого нужно просчитать по всем оставшимся ячейкам по всем признакам значения магнитуды ожидаемых землетрясений и вынести результаты на карту.

Легко увидеть, что полученная таким способом карта зон различной сейсмической опасности оказывается гораздо детальнее той, которая получена первым способом — традиционным (рис. 20, 21). На этот раз мы постарались максимально использовать всю первичную или исходную информацию, минимально огрубляя ее при решении задачи. В результате карта распределения зон



Рис. 18. Формализованная карта продольных разломов Кавказа

1 — активные в новейшее время разломы протяженностью более 100 км; 2 — то же, протяженностью от 20 до 100 км; 3 — продольные глубинные разломы, активность которых в новейшее время не установлена

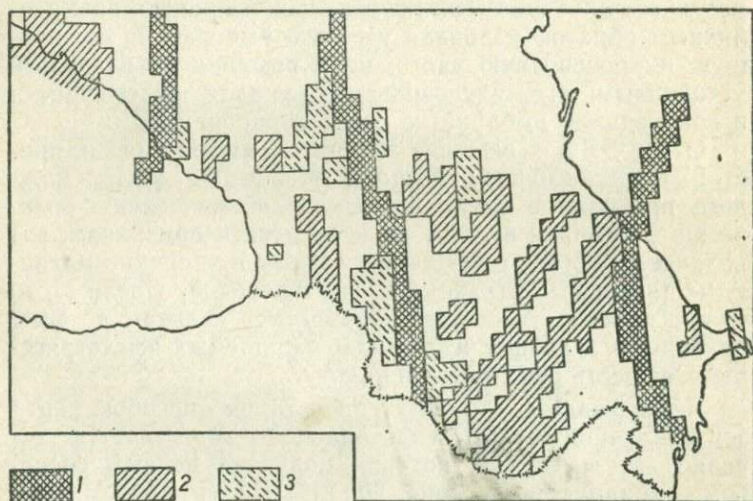


Рис. 19. Формализованная карта активных в новейшее время поперечных разломов Кавказа

Разломы: 1 — первого порядка; 2 — второго порядка; 3 — третьего порядка

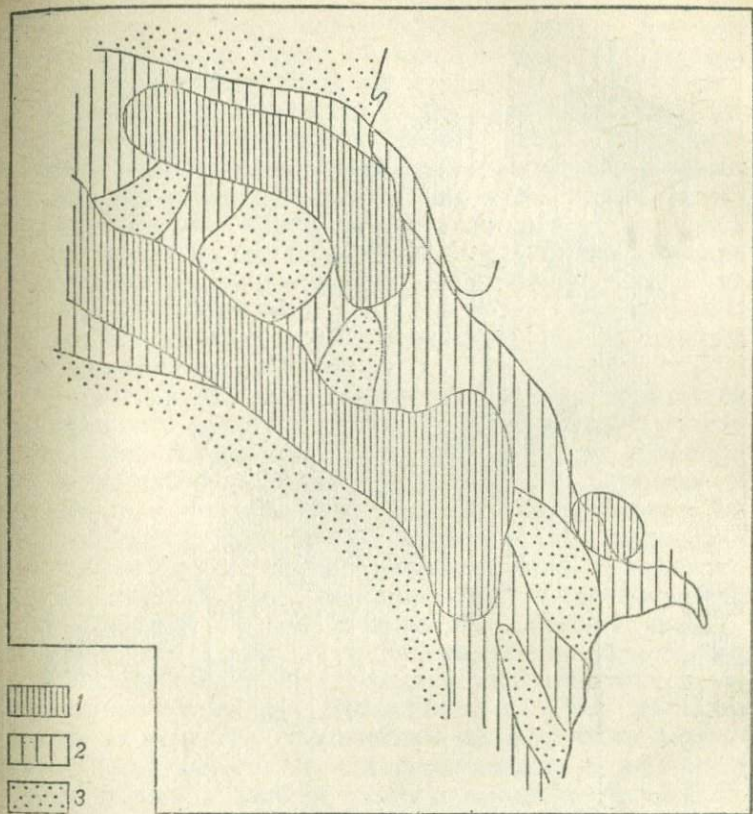


Рис. 20. Карта зон возникновения сильных землетрясений для восточной части Кавказа, составленная «традиционным» методом

1 — зоны, где возможны землетрясения с $M \geq 5\frac{3}{4}$; 2 — то же, с M от $4\frac{3}{4}$ до $5\frac{3}{4}$; 3 — то же, с $M \leq 4\frac{3}{4}$

различной сейсмической опасности получилась очень структурной — зоны высокой опасности подчеркивают современную структуру Большого Кавказа и его разделение на разные по строению и развитию блоки. Но самое главное, пожалуй, даже не это. Строя карту таким способом, мы в каждом случае — в каждой ячейке! — совершенно точно знаем, отчего получается то или иное значение ожидаемой магнитуды, какие критерии

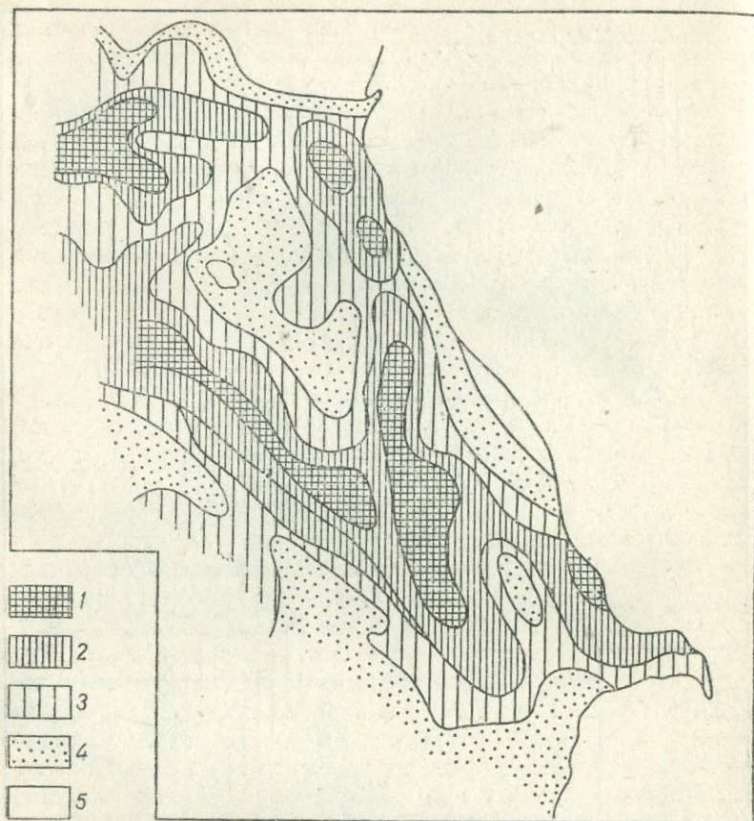


Рис. 21. Карта вычисленных значений максимально возможной магнитуды землетрясений для восточной части Кавказа. Магнитуды землетрясений:

1 — больше 6,5; 2 — от 6,5 до 6; 3 — от 6 до 5; 4 — от 5 до 4; 5 — меньше 4

и каким образом ответственны за это. Любое сомнение или неуверенность в правильности прогноза могут быть легко проконтролированы. Кроме того, после того, как собраны исходные данные, ответ при использовании формальной методики predetermined и не зависит от интуиции, опыта и склонности исследователя.

Но все-таки, несмотря на бесспорные достоинства формализованного метода, не следует чересчур обольщаться и не видеть его недостатков. Такие недостатки, конечно,

есть, и поэтому надо подвергнуть полученное решение проверке, т. е. посмотреть, насколько мы действительно научились прогнозировать землетрясения.

Один из таких способов проверки — это время. Способ довольно пассивный — сидеть и ждать, когда произойдет сейсмическое событие. Но регулировать этот процесс мы не можем и вынуждены ждать. После составления прогнозной карты для Кавказа прошло пять лет и за это время на его территории было зарегистрировано 18 средних и сильных толчков. Все они произошли на предполагавшихся местах, в 11 случаях магнитуда оказалась ниже ожидаемой, в остальных — в точности такой, как было предсказано.

Есть и другой способ проверки. Можно попытаться использовать правило, полученное по кавказскому материалу, для сейсмического прогноза в других областях, но обязательно сходных по своей истории развития и структуре, т. е. в областях альпийской складчатости. Такая проверка тоже была сделана — для территории Крыма, всего Карпатского региона и Альп. В этом случае мы как будто бы ничего не знали о сейсмичности этих областей. (Обучались-то мы на Кавказе! И правило получено для Кавказа.) И районируя эти области, мы должны правильно «предсказать» уже известные и зарегистрированные там землетрясения. Эта проверка также, за немногим исключением, дала хорошие результаты. Для Северной Италии представилась возможность «предсказывать» даже не только прошлые землетрясения. Карта для этой территории была составлена за две недели до печально известного катастрофического землетрясения во Фриули. Прогноз оказался правильным.

Можно считать, что мы достаточно хорошо научились находить зоны возникновения землетрясений, и прогноз места и силы землетрясений разработан достаточно надежно. Строители могут получить вполне определенные рекомендации, где следует учитывать возможность землетрясений разной силы при возведении различных сооружений: домов, плотин, промышленных предприятий.

Однако не хотелось бы, чтобы у читателя осталось ощущение, что проблема прогноза землетрясений решена окончательно и снята с повестки дня. Научный поиск никогда не прекращается. И здесь, хотя удалось достигнуть хорошей степени надежности результатов, решены,

конечно, не все вопросы. Прежде всего, устанавливая эталоны для различных категорий сейсмической опасности — сильной, средней и слабой, — мы вынуждены прибегать к способу так называемых экспертных оценок, т. е. фактически назначать эти эталоны. И если с наиболее опасной категорией дело обстоит более или менее просто — в нее попадают ячейки, где были землетрясения наибольшей силы для данного региона, то установить учебный набор ячеек средней опасности не так легко. Кто-то должен поручиться, что здесь произошли и могут происходить землетрясения средней силы, а более сильных не будет. Как-то обойти эту ситуацию, сделать ее более достоверной и надежной пока не удастся. Очевидно, необходимо наряду с совершенствованием и разработкой геологических критериев сейсмичности находить и таким же образом сопоставлять «критерии асейсмичности». Взаимные комбинации этих двух групп критериев должны будут дать всю гамму эталонов от наиболее опасных в сейсмическом отношении мест до практически совершенно безопасных.

Поиски предвестников землетрясений, связанные с прогнозом времени сейсмических катастроф, также выдвигают перед сейсмотектоникой ряд новых задач. Прогноз землетрясений в целом можно уподобить задаче военной разведки: мы знаем, что неприятель подготавливает, допустим, крупный взрыв. Умело ведя наблюдение, можно зафиксировать все приготовления к нему: рытье траншей, подвоз взрывчатки и т. д. Но вот появился дым от зажженного шнура, — это предвестник того, что катастрофа неизбежна. Так вот, основная задача сейсмотектоники (прогноз места и силы землетрясений) это предварительная разведка. Поиски предвестников начинаются тогда, когда известно, где и что надо искать, куда надо направить основное внимание, чтобы успеть заметить дым. Но при этом надо еще уметь отличить дым запального шнура от дыма случайно горящей кучи мусора. На первый план выдвигается задача — какие именно физические характеристики, поддающиеся измерению, будут свидетельством того, что именно в данном месте накапливается энергия для будущего сейсмического толчка. Поскольку процесс подготовки землетрясения происходит всегда в конкретной геологической обстановке и связан с конкретными геологическими структурами, надо

очень хорошо знать самые существенные черты этой обстановки, чтобы уметь отличать в изменении различных геофизических полей в данном месте, что связано с глобальными процессами эволюции нашей планеты, а что является локальным и может привести к землетрясению в данном районе. Легко себе представить, как трудно выполнить такую задачу, но тем не менее к решению ее следует стремиться.

БОРЬБА ИДЕЙ — ПУТЬ РАЗВИТИЯ НАУКИ

Современный этап развития теоретической геологии, и в первую очередь геотектоники, отмечен острой дискуссией, которая развернулась между сторонниками «фиксизма» и «мобилизма», чего мы отчасти уже касались в начале книги. Однако если там эта дискуссия служила лишь примером столкновения различных взглядов в теоретической геологии, то здесь мы попытаемся разобраться в существе спора и взвесить аргументы, приводимые сторонниками различных концепций. Столкновение гипотез, претендующих на объяснение общих закономерностей развития Земли, носит часто резкий, непримиримый характер. Идеи, лежащие в основе конкурирующих концепций, взаимно исключают друг друга и не оставляют возможностей компромисса. Хотя, разумеется, есть попытки найти и какую-нибудь среднюю точку зрения. Однако накал страстей вокруг этой дискуссии пока не позволяет надеяться на примирение. Сейчас кажется, что не хватает только небольшого числа каких-то решающих аргументов, чтобы безоговорочно принять одно и решительно отбросить другое.

Сторонники «мобилизма», объединяющиеся вокруг концепции «новой глобальной тектоники», нередко называют сегодняшнюю ситуацию в науках о Земле революцией в геологии, отмечая этим некую исключительность современного этапа развития этой науки. В этом утверждении содержится также неявная попытка провести некоторую аналогию современного положения в геологии с революцией в физике, происшедшей на рубеже XIX и XX в., а также связать процесс развития наук о Земле с современной научно-технической революцией, переживаемой всеми отраслями человеческих знаний. В этом есть много справедливого. Но все же необходимо детально разобраться — действительно ли в геологии произошел

некоторый качественный скачок, который вывел ее на новый уровень развития? Действительно ли пройдена какая-то ступень и найдена теоретическая основа для принципиально иного осмысления накопленных прежде фактов? Или же современные дискуссии не выходят за рамки нормального развития любой науки путем поиска и находок идей, преодоления устаревших гипотез и выработка новых? Обычно современникам трудно объективно оценить процесс, происходящий у них на глазах, тем более это трудно сделать участнику дискуссий.

Поэтому может быть полезно еще раз оглянуться на развитие основных идей в геотектонике, как это мы сделали, когда рассматривали проблемы складкообразования. Мы увидим, что с самого начала зарождения научной геологии, т. е. с середины XVIII в. весь ее путь отмечен полной драматизма борьбой непримиримых противоположных взглядов на основные закономерности развития Земли. Это борьба непунистов и плутонистов, и острые споры между сторонниками катастрофизма и эволюционного развития Земли, и упоминавшаяся уже нами дискуссия приверженцев гипотезы поднятия и контракционистов. И каждое из этих направлений может гордиться именами крупных ученых, внесших свой вклад не только в развитие именно своей концепции, но и в общее поступательное развитие геологии как науки. Идеи каждого направления оставили свой след в общем здании теоретической геологии, в каждом из них содержалось рациональное зерно, которое послужило основой для дальнейшего развития и углубления общих теоретических представлений.

В каждом случае, когда происходила такая борьба противоположных взглядов, участникам дискуссий казалось, что вот наконец-то почти достигнута ускользающая истина, вот теперь найдена единственно верная, способная объяснить все имеющиеся факты идея. Особенную остроту и драматизм приобретала такая борьба, когда происходила переоценка идей и общих представлений в трудах одного и того же крупного ученого. Так, Эли де Бомон, впервые сформулировавший и обосновавший контракционную гипотезу, начинал свою деятельность как сторонник гипотезы поднятия, где ведущая роль в процессах складкообразования и возникновения гор принадлежала вертикальным силам. Однако, придя к идее

контракций, где вертикальные движения и силы только производные от ведущих горизонтальных сжимающих сил, Эли де Бомон, сам считая себя сторонником гипотезы поднятия, фактически выступил против нее и против своего идейного учителя Леопольда фон Буха.

Одновременно с этим Эли де Бомон выступал как решительный сторонник теории катастроф, т. е. последователь Ж. Кювье и фон Буха. И это было в середине XIX в., уже после того, как катастрофизму был нанесен сокрушительный удар трудами английского естествоиспытателя Ч. Лайеля, продолжившего и развившего традицию эволюционных представлений, связанную с именами Ж. Бюффона, М. В. Ломоносова, Дж. Геттона. «Лишь Лайель, — писал Ф. Энгельс, — внес здравый смысл в геологию, заменив внезапные, вызванные капризом творца, революции постепенным действием медленного преобразования Земли» *. Но тем не менее теория катастроф продолжала еще существовать и находила своих сторонников очень долго. Только к концу XIX в., когда М. Бертраном было сформулировано понятие о геотектонических циклах, катастрофизм был оставлен окончательно.

Мы обратились к истории не для того, чтобы подробно рассматривать борьбу идей и направлений — это слишком сложно и могло бы быть предметом специальной книги; наша цель сейчас иная. История геологии на протяжении двух веков убедительно показывает, что дискуссии и споры сторонников противоположных взглядов происходили всегда. И вряд ли стоит придавать такое исключительное значение сегодняшнему спору только оттого, что мы его свидетели и участники, и он кажется нам сегодня особенно непримиримым. Несмотря на то, что сейчас мы несравненно больше знаем нашу Землю, лучше изучили ее, чем 100, и даже 20—30 лет тому назад, столкновение разных взглядов об общих закономерностях развития Земли пока еще все-таки не вышло на принципиально новый уровень по сравнению даже с прошлым веком. По-прежнему используются в основном качественные данные и логические умозрительные построения и интуитивно определяется мера весомости и значимости тех или иных фактов. Часто оказывается

* Ф. Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, 1955. с. 9.

прав тот, кто более красноречив, а не более строг в логике доказательства.

Однако изучение истории геологии позволяет увидеть не только это. Интересно, что сторонники каждого из противоборствующих сегодня направлений могут найти давние традиции и указать на знаменитых предшественников. Какими бы наивными не казались нам сейчас представления основоположников гипотезы поднятия, но именно эти идеи, усложняясь и углубляясь, развиваются в современном «фиксизме», превратившись вначале в радиомиграционную гипотезу В. В. Белоусова, а затем в идею адвективных перемещений вещества на разных уровнях в глубинных оболочках Земли. И современные представления «мобилистов» ведут свою родословную не только с А. Вегенера, выдвинувшего гипотезу дрейфа континентов в 1913 г. но в какой-то мере наследуют многие положения контракционистов и перекликаются отчасти с катастрофизмом Ж. Кювье. Сама идея раздвижения материков и образования таким путем Атлантики была высказана А. Гумбольдтом в 1803 г. Недаром бытует пословица «все новое — это хорошо забытое старое». Если что-то и отличает современный этап развития геологии от предшествующих, так это лавинообразное накопление огромного количества новых фактических данных, которое называют иногда «информационным взрывом» и которое характерно на современном этапе не только для геологии, а практически для всех без исключения отраслей науки. Но можем ли мы в геологии считать, что научились эту информацию осваивать и правильно использовать для построения обобщающих концепций? Вряд ли кто-нибудь решится утверждать это.

Но все-таки в чем суть «информационного взрыва» в геологии и основной смысл современной дискуссии?

ВЗГЛЯД С ОКЕАНА НА МАТЕРИК ИЛИ С МАТЕРИКА НА ОКЕАН?

За последние 15—20 лет геологи неплохо узнали строение поверхности нашей планеты. Можно с уверенностью сказать, что на огромных пространствах континентов не осталось сейчас белых пятен; геологические карты, и довольно крупного масштаба, составлены на

всей площади земной суши. Существуют международные организации, которые объединяют ученых многих стран для составления тектонических карт материков. И для многих материков такие карты составлены. Даже Антарктида — этот труднодоступный белый материк — перестала быть загадкой для геологов. Однако известно, что две трети поверхности Земли скрыто под водами океанов и до недавнего времени эти огромные пространства оставались для геологов неведомыми. Во многих учебниках геологии обходилось почти полным молчанием строение земной коры под океанами, потому что в сущности о ней ничего не было известно. Но за последние два десятка лет объединенными усилиями ученых многих стран было организовано систематическое и планомерное изучение геологии дна океанов. Составлены и продолжают уточняться батиметрические карты дна, проводится сейсмическое «просвечивание» — зондирование земной коры и подстилающих ее слоев мантии, изучаются магнитные и гравитационные аномалии. И пожалуй, самым замечательным достижением последних лет является организация бурения океанского дна. Это дает возможность геологам взять в руки образцы горных пород, елагающих дно океана, увидеть последовательность напластования пород разного возраста и состава и, таким образом, приоткрыть геологическую историю формирования океанических впадин.

Сейчас мы имеем представление и о толщине коры под океанами, и о разделении ее на три основных слоя, из которых верхний — осадочный пробурен во многих местах, и нам стали известны и состав, и геологический возраст осадков; нам известно своеобразное строение срединно-океанических хребтов, а магнитная съемка в океанах открыла на склонах этих хребтов параллельные полосы чередующихся положительных и отрицательных аномалий, т. е. картину, совершенно чуждую материкам и имеющую, возможно, принципиальное значение. Колоссальный поток этой новой информации, казалось бы, как принято говорить, трудно переоценить. Новые данные действительно поражают воображение, вызывают желание осмыслить их, связать в какую-то стройную цельную картину. В результате этого у многих специалистов возникло убеждение, что озарение в проблеме строения и развития Земли придет (или уже пришло!) со стороны

океанических впадин и что геология континентов должна быть коренным образом пересмотрена в свете тех новых идей, которые возникли в связи с изучением океанических пространств, т. е. наиболее правильным и современным кажется взгляд со стороны океанов на материки. Ведь океаны занимают на поверхности Земли гораздо большую площадь и то, что в них происходит, возможно, определяет всю «тектоническую погоду» планеты.

Но, с другой стороны, самые древние горные породы, обнаруженные до сих пор на дне океанов, имеют возраст не старше 150 млн. лет, поэтому о более ранних этапах развития ничего нельзя сказать. В то же время на материках, где геологическое строение поверхности изучено более подробно, мы можем заглянуть в глубь геологической истории Земли на 3,5 млрд. лет, а геологические события последних 700—800 млн. лет расшифровать достаточно детально. Кроме того, мы имеем возможность на континентах проследить развитие различных геологических процессов в земной коре, сочетание различных геологических явлений, связанных с внутренней активностью земных недр. Поэтому континенты были и остаются теми «окнами», в которые мы можем наблюдать самые ранние стадии развития Земли. И они не теряют этого значения, несмотря на все успехи в изучении океанов. Хотя, само собой разумеется, обобщающая теория развития Земли должна будет включить в себя не только данные по геологии континентов, но и все новые данные по океанам.

Кроме того, не следует слишком преувеличивать значение достигнутых успехов в изучении океанов. Что такое, например, 109 скважин, пробуренных на дне Тихого океана? Много это или мало? Много, если исходить из того, что всего 10—15 лет назад не было ни одной и в составе и возрасте осадочных пород на дне приходилось судить только по косвенным данным. Но в то же время 109 скважин на площади Тихого океана это примерно то же, что 6—7 скважин на территории всей Европы. Можно представить себе, как далека от действительности была бы картина геологического строения нашего материка, если бы мы опирались на результаты бурения единичных скважин, а также на знание рельефа и различных геофизических полей. Даже если считать установленным, что геологическое строение океанов значительно

более однородно и просто, чем строение материков, то все равно совершенно очевидно, что мы находимся только в самом начале пути накопления фактов.

Расчленение поверхности Земли на материки и океаны связано с не менее резкими различиями в устройстве глубоких недр. Земная кора и верхняя часть подстилающей ее мантии имеют разную толщину и разный состав под океанами и материками. С глубиной возрастает плотность вещества, слагающего земные недра, но на глубине 150—200 км располагается слой пониженной плотности, так называемая астеносфера. Этот слой также существенно меняется по толщине и плотности в разных местах. В чем же дело и какое значение имеют эти изменения — об этом будет рассказано дальше. Здесь важно лишь отметить, что многие геологические явления на поверхности — тектонические движения, проявления магматизма, землетрясения — зависят от физико-химических процессов в глубинах Земли, в веществе земной коры и верхней мантии. Принято объединять эти слои, земную кору и верхнюю мантию, включая астеносферу, под названием тектоносфера. То, что именно тектоносфера является источником сил и движений, преобразующих лик Земли, сейчас, пожалуй, не оспаривается никем. И это, вероятно, один из немногих вопросов, по которому существует если не полное единодушие, то во всяком случае относительное согласие среди специалистов, занимающихся проблемами строения и развития Земли. Дальше начинаются разногласия, порождающие споры и дискуссии, о которых и пойдет речь.

ПЛАВАЮТ ЛИ МАТЕРИКИ?

В основе современных мобилистских представлений, составляющих существо концепций «новой глобальной тектоники» или «тектоники плит», лежит идея, высказанная А. Вегенером еще в начале XX в. Суть гипотезы заключается в том, что в какой-то момент геологической истории все материки были собраны в едином массиве, который раскололся на отдельные глыбы, после чего они стали расходиться в стороны, удаляясь друг от друга. Самым важным, хотя и не единственным, аргументом гипотезы было зеркальное сходство береговых линий континентов, обращенных друг к другу, — обеих Америк

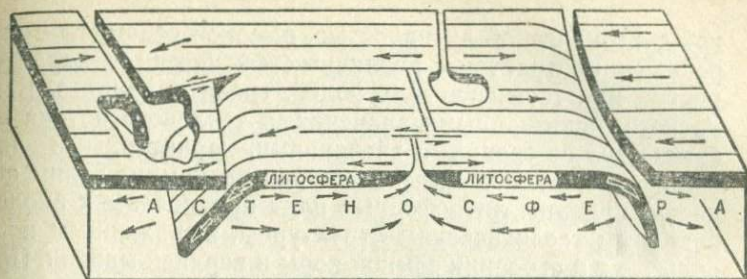


Рис. 22. Общая схема движения литосферных плит, лежащая в основе концепции «новой глобальной тектоники» (по Б. Айзексу, Дж. Оливеру, Л. Сайксу)

по одну сторону Атлантического океана и Африки с Европой по другую. Поверхность, по которой происходит перемещение, скольжение материков, помещали в то время внутри земной коры — на границе так называемых «гранитного» и «базальтового» слоев. Получив вначале широкое распространение и признание, гипотеза Вегенера была очень скоро (уже в 30-х гг.) отвергнута геологами, так как со всей очевидностью было доказано, что поверхностные слои земной коры прочно связаны с ее глубинными частями, а источники поверхностных геологических явлений и процессов лежат по крайней мере в основании земной коры.

В наше время новые данные, и в первую очередь палеомагнитные исследования, вдохнули новую жизнь в эту оставленную идею. Однако теперь надо было приспособить всю схему движения к новым данным о строении земной коры и верхней мантии. Уже невозможно представлять себе материки, плавающими по поверхности «базальтового» слоя, подобно дрейфующим в океане льдинам. Тогда-то и были предложены литосферные плиты, плывущие по пластичной астеносфере. И эта схема как будто объясняет всю массу нахлынувших новых фактов.

В современных концепциях сторонники мобилизма исходят из того факта, что вся литосфера Земли, т. е. земная кора и верхняя мантия до пластичного слоя астеносферы, разделена глубинными швами на ряд крупных плит (рис. 22). Границы плит отличаются повышен-

ной тектонической активностью, высокой сейсмичностью, резкими контрастами различных физических характеристик или геофизических полей, гравитационного, магнитного, повышенными значениями теплового потока по сравнению со средними значениями, характерными для большей части обширных пространств Земли. Таким образом, границы литосферных плит приурочены к вполне реальным геологическим структурам, выраженным и в рельефе и в строении земной коры и верхней мантии. При этом существуют границы разного рода: одни из них связаны с системой срединно-океанических хребтов, опоясывающих весь земной шар и осложненных рифтовыми долинами — крупными щелеобразными провалами-грабенами, обычно приуроченными к осевой части хребта. Границы другого типа связываются с системой островных дуг и глубоководных желобов, характерных для тихоокеанских окраин континентов, обрамляющих этот океан, а также с современными тектоническими активными поясами — типа Средиземноморского подвижного альпийского пояса. Литосферные плиты, таким образом, покрывают всю поверхность Земли, но при этом, согласно представлениям сторонников «новой глобальной тектоники», находятся в непрерывном движении, постоянно скользят по этой поверхности. Что же обеспечивает это непрерывное движение и где те необходимые резервы пространства, которые позволили бы плитам перемещаться друг относительно друга?

В концепциях «мобилизма» этот вопрос решается таким образом. В срединно-океанических хребтах, в рифтовых долинах происходит подъем вещества из глубоких частей мантии — из астеносферы. Поднимаясь по глубоким каналам-разломам это вещество мантии наращивает литосферу, а для того, чтобы занять свое место на поверхности, эти новые порции материала раздвигают в стороны соприкасающиеся здесь литосферные плиты. Так что срединно-океанические хребты — это зоны непрерывного наращивания, рождения новой литосферы Земли. Это и есть тот процесс, который получил название растекание океанического дна, или «спрединг». Но поскольку поверхность планеты остается постоянной, то где-то литосфера должна уничтожаться. Глубоководные желоба, по представлениям сторонников этих взглядов, как раз и являются такими зонами поглощения литосфе-

ры, где охладившаяся плита начинает тонуть и погружаться в мантию. Это как будто бы подтверждается сейсмическими данными — очаги землетрясения в некоторых зонах сочленения континентов с океанами и, главным образом, вдоль глубоководных желобов приурочены к единым плоскостям, уходящим очень глубоко в недра Земли до глубин 700 км. Это так называемые зоны Бенъофа. К этим же зонам приурочен и специфический магматизм, считающийся с позиций этой концепции результатом выплавления наиболее легких веществ из тонущей литосферной плиты.

В общей схеме получается что-то вроде двух непрерывных сопряженных лент транспортера — поднимаясь наверх в цепях рифтовых долин, ленты расходятся в разные стороны, какое-то расстояние движутся горизонтально, а затем погружаются в щели глубоководных желобов. Материки при этом уже не плавают самостоятельно, как это было у А. Вегенера, они просто оказываются наростами на литосферной плите и движутся вместе с нею. При этом возможны различные соотношения в зонах погружения литосферной плиты. В некоторых случаях плита не погружается вниз, а начинает ползти сверху на встретившуюся ей по пути. Но так или иначе эти зоны столкновения двух литосферных плит как раз и оказываются активными поясами, где происходят различные интенсивные тектонические процессы: контрастные движения, складко- и горообразование, наращивание мощности земной коры и т. д.

Схема как будто бы предельно простая и ясная, и очень заманчиво считать, что именно этот процесс непрерывного относительного движения плит и лежит в основе преобразований, происходящих как на поверхности Земли, так и по всей тектоносфере.

Однако при сопоставлении с конкретными структурами, наблюдающимися на Земле, эта простая схема сильно усложняется и обрастает многими деталями. Кажется, ничего плохого в этом пока нет. Вместо относительно небольшого числа литосферных плит (6—7), выделенных основоположниками этой концепции первоначально, количество их непрерывно растет, появляются микроплиты и микроконтиненты, движущиеся независимо относительно соседних. Выделены разрывные структуры, названные трансформными разломами и обусловленные

как будто бы тем, что вновь образовавшаяся в рифтовой зоне литосфера не в состоянии отодвигаться от нее равномерно на всем протяжении. А протяженность рифтовых зон — многие тысячи километров.

Такие усложнения и детализация общей схемы не удивительны и кажутся вполне нормальным процессом развития идеи. Гораздо опаснее другое. Концепция, призванная объяснить эволюцию геологических процессов в глобальном масштабе — не даром она и названа «новой глобальной тектоникой» — как раз в этом случае сталкивается с целым рядом очень серьезных трудностей и противоречий. Гипотеза, способная объяснить взаимоотношения литосферных плит на каком-то ограниченном участке земной поверхности, где можно обнаружить сопряженные зоны возникновения и поглощения литосферы, оказывается в затруднительном положении как раз тогда, когда требуется увязать кинематику движений в масштабе всей планеты.

Стоит остановиться на некоторых наиболее очевидных внутренних противоречиях новой глобальной тектоники. Классическим примером, где движения плит как будто бы хорошо согласуются между собой, стал район Атлантического океана и примыкающих к нему континентов: Северная и Южная Америка «отъезжают» от Средиземно-Атлантического хребта на запад, Африка с Европой на восток, центр раздвижения — сам хребет — расположен почти точно посередине между континентами и конфигурация его хорошо согласуется с береговыми линиями материков. Все, таким образом, очень хорошо укладываются в схему. Но стоит одновременно рассматривать вместе с этим районом то, что происходит в Индийском океане и вокруг него, как сразу возникает очень тяжелая ситуация. Африка должна двигаться на восток от Средиземно-Атлантического хребта, но от Средиземно-Индийского ей надо двигаться на запад, в то время как Австралия плывет от него на восток. Для того, чтобы выйти из этого противоречия, предполагается, что могут быть подвижными и сами хребты, которые при этом остаются осями раздвижения плит.

В этом случае, если считать неподвижной ось Средиземно-Атлантического хребта, то Средиземно-Индийский хребет должен двигаться к востоку от «догоняющей» его Африки с такой скоростью, чтобы всегда оставаться по-

середине между ней и убегающей от него к востоку Австралией. Если же принять неподвижными Африку и Евразией, то двигаться должны и Срединно-Атлантический и Срединно-Индийский хребты, причем со скоростью равно вдвое меньшей, чем скорости движущихся на запад Америк и на восток Австралии. Не правда ли, странно и искусственно выглядит такая схема? А если попытаться согласовать со всем этим движение Африки относительно Европы, перемещение Индостана с юга на север и представить себе невообразимые движения Антарктиды, которая окружена почти целиком сплошным кольцом океанических хребтов, то станет ясно, что схема не может быть понята даже просто геометрически. К тому же в основе гипотезы о движении плит лежит представление о том, что осевые части срединно-океанических хребтов являются источниками растекания. Но если сами оси начинают двигаться, да еще в зависимости от движения самих плит, то тогда причина и следствие меняются местами, и мы оказываемся в порочном кругу.

Кроме того, «закрывая» Атлантический океан при приведении континентов в исходное положение, до дрейфа, мы должны по какой-то линии разорвать восточную окраину Азии с западным окончанием Америки. Геологические данные о событиях, происходивших в этом районе за последние 100—120 млн. лет, не дают возможности разделить эти континенты, скажем по Берингову проливу, между Чукоткой и Аляской. Искать эту линию надо внутри континентов, причем американские геологи утверждают, что в Северной Америке такой линии нет, но и в Азии такой линии реально не существует, ее надо найти или представить себе. Таким образом, в масштабе всей Земли согласовать взаимные перемещения плит оказывается очень трудно.

Наиболее наглядный и легко доступный аргумент сторонников «тектоники плит» — хорошее совпадение береговых линий материков — также оказывается иллюзорным. Иногда говорят, что это совпадение настолько точное, что можно математически доказать, что оно не может быть случайным. И это действительно так. Но дело все в том, как показал советский ученый Е. Н. Люстих, что комбинаций, в которых береговые линии материков будут совпадать также хорошо, очень много.

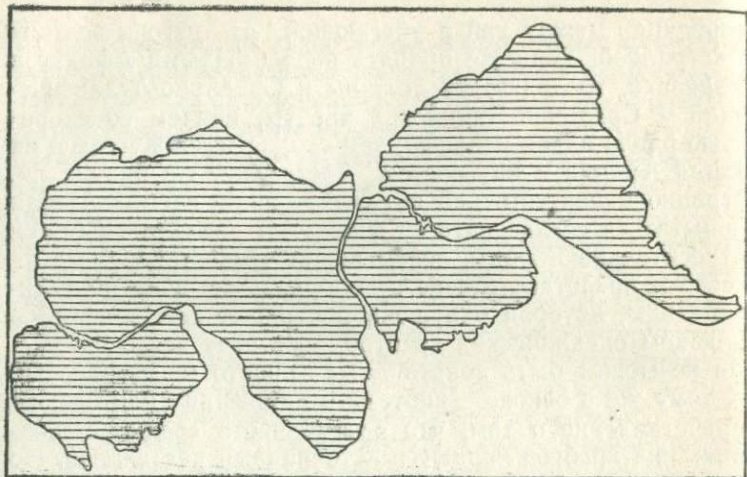


Рис. 23. Один из вариантов совмещения контуров южных континентов земного шара

И это тоже можно проверить математически. Австралия, скажем, может быть очень точно «подогнана» к Африке самыми разными способами (рис. 23), в пяти различных позициях; Атлантическое побережье Южной и Северной Америки очень точно совмещаются с Тихоокеанским побережьем Азии и Индонезии и т. д. Очевидно, такой рисунок рельефа Земли отражает какие-то иные, более общие закономерности его строения. Может быть, он связан с развитием сети планетарных разломов или с иными внутренними неоднородностями литосферы. Во всяком случае этот аргумент не может быть использован как доказательство реальности движения плит.

Список претензий к «новой глобальной тектонике» можно было бы продолжить. Легко показать чисто физические несообразности этих концепций, играющие, однако, важную роль во всех этих построениях. Скажем, разогретый материал поднимается в осевой части срединно-океанических хребтов, наращивает литосферу и, раздвигаясь в стороны, он должен охладиться и вновь тонуть. Но, судя по измерениям теплового потока, охлаждение происходит тут же, сразу за пределами хребта, а погружение литосферы обратно в мантию — за

тысячи километров. Кроме того, литосферная плита и охладившись должна остаться менее плотной, чем подстилающая ее мантия. Что может заставить тонуть более легкий материал в более плотном — не ясно.

Равенство тепловых потоков на континентах и океанах тоже приводит к определенным трудностям и искусственным построениям в рамках «тектоники плит». Известно, что при равной средней величине теплового потока на континентах половина его производится земной корой, а другая половина — мантией. На океанах же только одна десятая часть подается корой, а все остальные — мантией. Ясно, что состояние и, по всей вероятности, состав мантии под континентами и под океанами разный, и не так легко менять местами разные литосферные плиты, отрывая их от мантии.

Не так просто обстоит дело и с палеомагнитными данными, которые собственно вдохнули новую жизнь в оставленные мобилистские представления. Когда физики получили возможность измерять по образцам горных пород направление магнитного поля Земли, существовавшего в момент образования данной породы, то оказалось, что магнитные полюса прошлых эпох не совпадают с современными и, кроме того, для разных континентов положение этих палеополюсов оказалось разным. И только если сдвигать материки в соответствии со схемой А. Вегенера, то палеополюса совпадут, и будет происходить постепенная миграция полюса к его современному положению. Это ли не успех — совершенно независимыми и разными методами исследователи пришли к одному и тому же решению!

Однако подробный и беспристрастный анализ палеомагнитных данных, сделанный геологом Ю. М. Шейнманном, показывает, что все оказывается гораздо сложнее. Во-первых, нельзя говорить о палеополюсах для континентов в целом, поскольку для измерения берутся образцы только из стабильных областей — древних платформ, а складчатые области в этом не участвуют. Во-вторых, происходит не постепенная миграция полюсов для разных групп платформ, а быстрые перескоки из одного района в другой, разделенные довольно длительными периодами блуждания их в одном районе. Но самый важный вывод, к которому пришел Ю. М. Шейнманн, заключается в том, что моменты быстрого изме-

нения положения полюсов совпадают с общей неустойчивостью магнитного поля Земли, а также оказываются одновременными с этапами повышенной тектонической активности в геосинклинальных поясах и вспышками магматизма, охватывавшими огромные пространства Земли. Это заставляет думать, что существует отчетливая связь между проявлениями глубинных геологических процессов и эпохами важнейших изменений в магнитном поле Земли и, видимо, все эти явления родственны и вызваны процессами, происходящими в очень глубоких зонах планеты. А это плохо согласуется с представлениями о скольжении пластин коры или литосферы.

«ШКУРА ТИГРА ИЛИ ШКУРА ЛЕОПАРДА?»

Один знакомый геофизик сказал мне как-то: — Вот если бы геологическая карта Земли не была так похожа на шкуру тигра, а была бы ближе к шкуре леопарда, я поверил бы вам и безоговорочно отверг бы все идеи «тектоники плит».

Разговор этот происходил в то время, когда концепция «новой глобальной тектоники» только появилась, многие специалисты, изучающие Землю, симпатизировали ей, хотя и не сделали еще выбора между традиционными направлениями и новыми идеями. Такую неопределенную позицию занимал и этот геофизик, сам он не принимал участия в разработке новых концепций, но с интересом прислушивался к разгорающейся дискуссии.

В первый момент меня такая аналогия сильно смущала. А ведь, действительно, на что больше похожа карта земного шара — на шкуру тигра или на шкуру леопарда (рис. 24). Складчатые области разного возраста в самом деле складываются в длинные вытянутые пояса, внутри которых видны узкие ленты пород разного возраста, а значит и разного цвета на карте. Так выглядит Средиземноморский подвижный пояс, протягивающийся через весь юг Европы и уходящий в Азию, таков пояс Кордильер и Анд, обрамляющий с востока Тихий океан; на западном побережье этого океана выделяются полосы мезозойских и кайнозойских складчатых областей Северо-Востока СССР. Отчетливо видна на

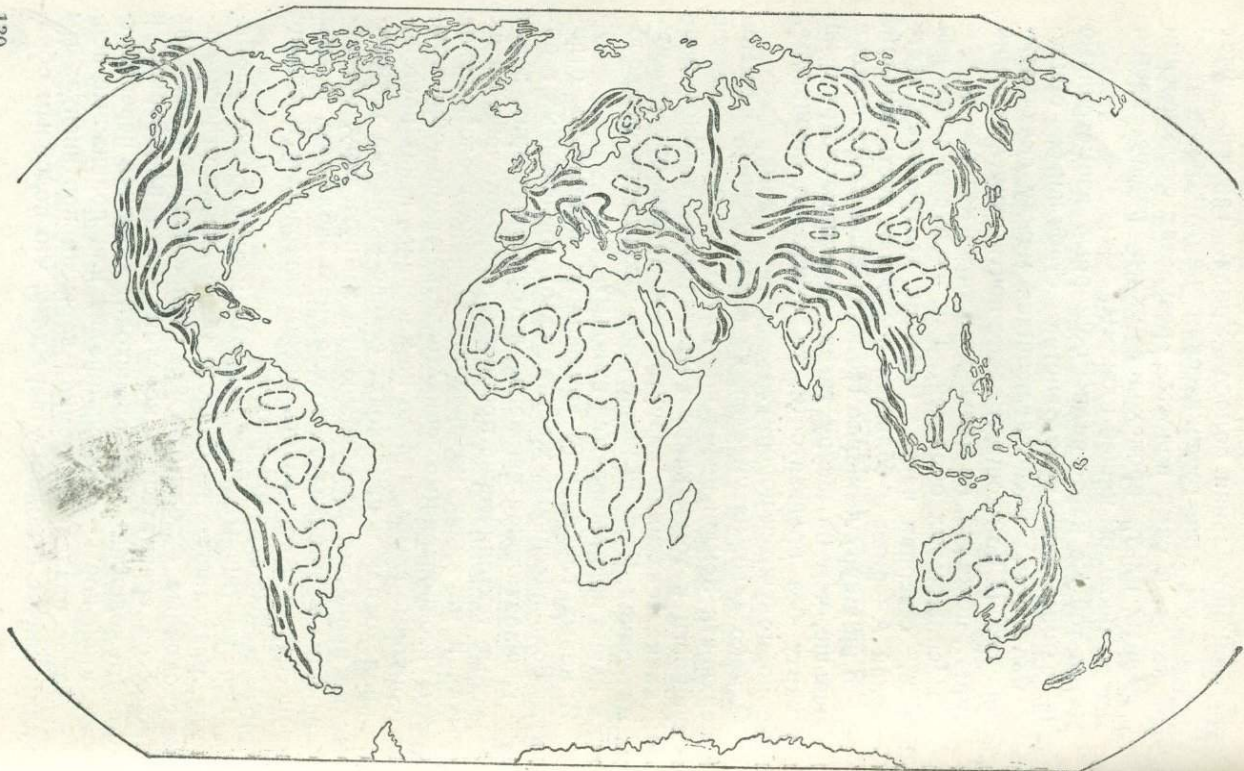
карте меридиональная полоса Урала. Так что может быть в самом деле геологическая карта Земли — это шкура тигра, а сами полосы — результат столкновений литосферных плит, происходивших в разное время, в далеком прошлом нашей планеты?

Но на той же карте видны обширные изометричные пятна, занимающие пространства стабильных областей — платформ, располагающихся между складчатыми поясами. И по площади такие почти округлые пятна занимают, пожалуй, не меньше места на материках, чем полосы складчатых областей. Так выглядит почти вся Африка, северная часть Евразии, центральная часть Северной Америки и большая восточная часть Южной. Так что на шкуру леопарда геологическая карта похожа не меньше, чем на шкуру тигра, и если посмотреть на эту карту без предвзятости, то «тигра» и «леопарда», наверно, получится поровну.

Однако дело, разумеется, не в том, чего больше на поверхности Земли: полос или пятен. Вопрос сводится в сущности к тому, какие геологические закономерности, какие тенденции развития мы можем обнаружить на материках. Есть ли какие-либо закономерности вообще и какие напрашиваются выводы?

В новых глобальных концепциях материкам отводится роль пассивных жестких глыб, вовлеченных в общее горизонтальное движение литосферных плит, а все активные тектонические процессы сосредоточены на их стыках и на краях материков. Однако геологические факты неопровержимо свидетельствуют об обратном: материковые глыбы далеко не пассивны, в них постоянно происходили и происходят сейчас активные тектонические процессы, преобразующие земную кору, обеспечивающие ее направленную сложную эволюцию. В этих процессах можно увидеть очень интересные и вполне определенные закономерности.

Все континенты, как мы уже неоднократно упоминали, разделяются на области тектонически относительно спокойные, стабильные, где активность геологических процессов сравнительно невелика — это платформы, и области подвижные, где происходит активная переработка земной коры — геосинклинали, или подвижные пояса. Такое разделение земной коры на континентах мы видим сейчас и можем утверждать, что подобным обра-



зом континенты были устроены и в геологическом прошлом. Именно в распределении платформ и подвижных поясов, их сочетании во времени и пространстве наблюдаются наиболее важные для нас закономерности. С течением времени, от более ранних стадий развития Земли к современному этапу, наблюдается разрастание стабильных участков за счет подвижных поясов, в которых тектоническая активность отмирает. Причем этот процесс протекает упорядоченно. Площадь платформ наращивается от наиболее древних стабильных участков, к которым последовательно причленяются все новые и новые территории подвижных поясов, пространство которых сокращается. На современном этапе активные тектонические процессы сосредоточены в двух геосинклинальных подвижных поясах: Альпийско-Гималайском, протягивающемся почти широтно по югу Европы, через Малую Азию, Гималаи к Индонезии, и в круговом Тихоокеанском поясе, охватывающем все континентальные окраины, примыкающие к этому океану.

Наращивание платформ за счет подвижных поясов происходит не непрерывно и постепенно, а порциями, скачками. И этот процесс подчинен определенной цикличности: после завершения активных тектонических и магматических процессов геосинклиналь преобразуется в складчатую область, стабилизируется и примыкает к соседней платформе. Продолжительность циклов исчисляется примерно в 150—200 млн. лет. В каждом последующем цикле, таким образом, подвижность и тектоническая активность сохраняются уже только на какой-то части территории, подвижной в предшествующем цикле. При этом тектоническая жизнь на платформах не замирает совсем; она продолжается, но в ослабленной форме, и очень важно, что ритм движений внутри одного тектонического цикла подчиняется одним и тем же закономерностям и в геосинклинали, и на соседних платформах. Этот процесс закономерной цикличности в развитии земной коры континентов никак не укладывается в концепции «тектоники плит» и не принимается во внимание ее сторонниками. Непонятны с этой точки зре-

Рис. 24. «Шкура тигра» или «шкура леопарда?» — соотношение на континентах линейных складчатых областей (жирные линии) и стабильных древних платформ (пунктирные линии)

ния и закономерные тектонические движения на платформах.

В то же время со всей очевидностью установлено, что те тектонические и магматические явления, которые наблюдаются на поверхности, зависят от состояния не только самой земной коры, но и подстилающих твердую литосферу глубинных слоев внутри мантии — от астеносферы. В местах возбужденных активных тектонических режимов астеносфера имеет большую толщину и расположена ближе к поверхности, чем под областями со спокойными стабильными режимами. И если бы литосфера действительно скользила по астеносфере, то разные области земной коры при таком движении довольно случайно оказывались бы над разными участками астеносферы. При этом встретиться с закономерной сменой возбужденных и спокойных режимов в земной коре можно было бы только иногда, как с некоей случайностью. Однако закономерная преемственность в смене разных режимов в земной коре, или унаследованность, как говорят геологи, — объективная реальность процесса эволюции земной коры. Установление этой направленности и унаследованности в развитии земной коры — одно из достижений теоретической геологии.

Некоторые приверженцы новых идей понимают, однако, что нельзя просто так сбросить со счетов эти геологические закономерности. Защищая «тектонику плит» от упреков с этой стороны, они заявляют, что континентальные плиты, конечно же, связаны с большими глубинами, имеют толщину не менее 400 км, т. е. поверхность их скольжения расположена где-то уже в нижней мантии, гораздо глубже астеносферы. Для океанических плит по-прежнему поверхностью скольжения остается астеносфера, и толщина их не превышает 150—200 км. Но ведь смысл любых концепций мобилизма в том, что континенты и океаны должны меняться местами. Как осуществить такой «обмен», когда континентальная плита должна «переезжать» на новое место вместе с частью своей нижней мантии, а океаническая, освобождая место, оставляет свою нижнюю мантию? Это остается без объяснений.

Согласно представлениям, развиваемым в любых вариантах «новой глобальной тектоники», современное

положение контактов-швов между континентальными плитами явление довольно случайное, а главное, непостоянное. Если плиты всегда находятся в движении, то сегодняшнее их расположение на земном шаре лишь случайный кадр, который нам дано наблюдать. Поэтому существование каких-либо структурных связей между разными плитами, да еще пересекающих швы между ними, с этой точки зрения явление крайне редкое, и уж во всяком случае с этих позиций немислимо увидеть какую-либо эволюцию в развитии таких структур.

Посмотрим, как ведут себя такого рода структуры в реальной геологической обстановке.

Структура земной коры, которая создается в процессе активного развития в течение тектонического цикла, сохраняется, как бы консервируется, в тех областях, которые становятся платформами. Полосы разных по составу горных пород, складки в слоях, разрывы в земной коре сохраняют свое положение и с течением времени только перекрываются более молодыми толщами новых осадков, которые словно плащ скрывают древний фундамент. Но созданная на раннем этапе развития структура коры не исчезает бесследно, и там, где происходит активный процесс ее переработки в последующем тектоническом цикле, она как бы «просвечивает» сквозь новые молодые образования, связанные с новым этапом активности.

Такое «просвечивание» древних структур можно показать на примере восточной части молодого Средиземноморского подвижного пояса. Как уже было сказано, этот подвижный пояс протягивается широтно, и на участке от Эгейского моря до Ирана можно видеть, что широтно вытянутые складчатые зоны, слагающие этот пояс, разрывы, разделяющие разные блоки земной коры внутри пояса, пересечены почти под прямым углом крупными протяженными поднятиями и прогибами, которые отчетливо выражены не только в самом подвижном поясе, но и на соседних с ним участках. К таким поперечным структурам относится прежде всего Транскавказское поперечное поднятие, протягивающееся от Доно-Медведицких складок на Русской платформе, через Ставропольский свод в Предкавказье, Кавказ и складчатые зоны Турции до поднятия Рутба на Аравийской платформе. Примерно такие же размеры по

длине имеет Урало-Оманская зона разломов пересекающая и платформы и подвижный пояс в меридиональном направлении.

Можно с уверенностью утверждать, что эта меридиональная ориентировка структур сформировалась на самых ранних этапах развития земной коры, примерно 1—1,5 млрд. лет назад. Именно так ориентированы складки, разрывы, направление сланцеватости в древнем фундаменте платформ с севера и с юга от подвижного пояса, во всех тех местах, где можно видеть этот фундамент. Очень важно, что ту же самую меридиональную ориентировку структур можно наблюдать и внутри подвижного пояса, в тех блоках земной коры, где сохранились самые древние породы, возраст которых опять же около 1 млрд. лет. Таким образом, сквозь современную структуру, имеющую в целом широтную ориентировку, виден древний структурный план, очень упорядоченный и закономерный. И дело не только в том, что этот древний (1—1,5 млрд. лет) структурный план подчеркнут в современной структуре, основные черты которой сложились в течение последнего — альпийского тектонического цикла, т. е. за последние 150 млн. лет. Гораздо важнее, что на протяжении всех этапов геологической эволюции этого района древние меридиональные структуры постоянно существуют на одном месте и видны сквозь широтную ориентировку более поздних структур то в более ослабленной, то в более яркой форме. Все эти закономерности имеют непосредственное отношение к идеям «тектоники плит».

Сторонники этой концепции проводят шов между двумя литосферными плитами внутри молодого подвижного пояса и в разных вариантах передвигают Африку вместе с Аравией относительно Евразии. Чаще всего Африка должна двигаться по этим схемам широтно с запада на восток, а иногда такое движение совершается с поворотом. Но тогда надо либо не замечать древнего структурного плана, либо считать счастливой случайностью, что из мозаики плит собрался такой строго упорядоченный, закономерный рисунок древних поперечных структур.

Подобных примеров, когда древние породы образуют согласованную картину по обе стороны предполагаемого шва между литосферными плитами, можно приве-

сти очень много. Наличие древних поперечных структур, пересекающих подвижные пояса, — одна из общих закономерностей строения земной коры.

В то же время, если мы сдвинем континенты, расположенные по обе стороны Атлантики, и попытаемся сопоставить древние структуры на них, то увидим, что в этом случае мозаика не складывается. Структурные зоны разного возраста резко обрываются на стыках континентов и не находят своего продолжения по другую сторону шва. А ведь единый «праматерик» раскололся не более чем 150 млн. лет тому назад, до того это была единая плита, и мы должны были бы увидеть связную картину ее развития.

Очень важные и интересные результаты можно получить, изучая ориентировку простирающихся зон повышенной активности — геосинклинальных поясов — разного возраста по отношению к современным географическим координатам Земли. Оказывается, в этих ориентировках наблюдается определенная упорядоченность, есть некоторые преимущественные направления, которые «любят» выбирать такие зоны в те или иные эпохи — это меридиональные направления в глубоком докембрии, широтные и меридиональные в протерозое и т. д. Даже если мы сейчас до конца не понимаем причин этого явления, то все-таки само наличие его должно заставить задуматься. Ведь если плиты литосферы перемещались по поверхности планеты, да к тому же столкновение и расползание континентальных массивов происходило неоднократно и сопровождалось поворотами, то обнаружить закономерности в ориентировке древних зон не было бы никакой возможности.

Стоит попытаться понять, в чем все-таки причина того, что идеи «новой глобальной тектоники» распространились столь широко и получили такую популярность. Сама по себе многочисленность сторонников этой идеи не должна быть для нас решающим аргументом. В конце концов, научные дискуссии и проблемы не парламентские дебаты и не решаются большинством голосов. Дело прежде всего, вероятно, в том, что «новая глобальная тектоника» впервые после крушения контракционной гипотезы делает попытку именно глобального объяснения развития всей Земли в целом. Причем эта концепция на первый взгляд кажется очень понятной, нагляд-

ной и даже красивой. Но при внимательной проверке эта красота оказывается призрачной, а простота — упрощением.

Большие успехи в накоплении новых фактов о строении нашей планеты связаны с организацией в последние годы международных работ в таких масштабах, которых никогда не было прежде. Геологи,^{*} геофизики, геохимики стали работать, выполняя эти международные проекты, совместно, превратившись из узких специалистов в своих областях в широких «землеведов». Кроме того, вокруг вопросов, которыми раньше занимались почти исключительно только геологи, использовавшие в основном методы «молотка и размышления», сгруппировалось большое количество совершенно новых людей, пришедших с другими методами (физическими и математическими) и с другим профессиональным подходом к исследуемым объектам. Именно это явление мы и должны назвать революцией в науках о Земле. В этом смысле она действительно произошла, и мы должны оценить ее в целом положительно.

«Тектоника плит» в этих условиях, возрожденная и обновленная именно математиками и физиками идея А. Вегенера, оказалась на первых порах удобной моделью, в которую хорошо укладывались новые данные, в первую очередь о физических полях океанов. Как удобная и привлекательная схема она стала использоваться и геологами для объяснения и понимания новых фактов. Однако если эта теоретическая схема может служить некой статичной моделью, объясняющей особенности современного напряженного состояния земной коры и разделение ее на вполне реальные области — плиты, то придание этой схеме универсальности и, более того, провозглашение ее теорией, которая способна объяснить все закономерности строения и развития Земли, кажется чрезмерным преувеличением, во всяком случае преждевременным.

ЭНДОГЕННЫЙ РЕЖИМ — ДЫХАНИЕ АСТЕНОСФЕРЫ

После того, как мы попытались показать, что «новая глобальная тектоника» далеко не универсальна и не может быть сейчас принята как новая теория Земли,

что, безусловно, вызовет бурные протесты многочисленных сторонников этих идей, необходимо предложить, если не решение, то хотя бы путь создания теории строения и развития Земли. Думается, что наиболее полно на сегодняшний день такие пути разработаны в исследованиях крупнейшего нашего тектониста В. В. Белоусова и его последователей.

Наблюдения показывают, что эндогенные геологические процессы, которые вызываются глубинными силами, — тектонические, магматические, метаморфические — образуют некоторые закономерные сочетания. Это позволяет говорить о наличии в истории земной коры определенных эндогенных геологических режимов. Каждый из них характеризуется специфическим набором признаков. Это, в первую очередь, химический состав, объем и характер магматических продуктов, проявления метаморфических процессов, т. е. переработки первичного состава и структуры вещества горных пород под действием высоких температур и давлений, и движения земной коры, среди которых наибольшее значение имеют вертикальные колебательные или глыбово-волновые движения отдельных участков, разделяющие всю площадь континентов на поднятия и прогибы. Важное значение для характеристики эндогенного режима имеет степень и интенсивность проявления складчатых деформаций слоев горных пород в самой верхней, осадочной оболочке земной коры. Совокупность этих признаков дает нам важную информацию о физическом состоянии земной коры — ее подвижности или жесткости, мере ее раздробленности и проницаемости для магматических расплавов, способности воспринимать и передавать деформации.

Эндогенные геологические режимы изменяются во времени и пространстве. С течением времени на одном и том же участке земной коры происходит закономерная и последовательная смена одних режимов другими, и вместе с тем в каждый момент геологической истории на Земле одновременно сосуществуют различные режимы.

Рассмотрим некоторые эндогенные режимы. Например эвгеосинклинальный — наиболее активный из всех. Для него характерна большая интенсивность вертикальных движений — их амплитуда и скорость. И это происходит при сильной раздробленности и дифферен-

цированности охваченного этим режимом участка земной коры, т. е. при этом оказываются в тесном соседстве области интенсивных и резких погружений, что оценивается как высокая контрастность движений. Эвгеосинклинальный режим отличается высокой проницаемостью земной коры для магмы, что приводит к излияниям больших объемов вулканического вещества на поверхности. Этот режим очень часто сменяется инверсионно-геосинклинальным, который тоже отличается высокой степенью подвижности, однако проницаемость коры в этот момент становится меньше, и магматические расплавы уже не могут изливаться на поверхность, а внедряются и застывают на какой-то глубине внутри земной коры. В этот же момент происходят интенсивные деформации слоев осадочных горных пород, формируются складки.

Наиболее спокойный режим — платформенный. Он характеризуется плавными и относительно медленными колебательными движениями земной коры, их сглаженностью, так что контрастность движений минимальна. Проницаемость коры для магмы очень мала, а зачастую кора на платформе становится совсем непроницаемой. Деформации осадочных пород происходят лишь локально, интенсивность их невелика. Геосинклинальный и платформенный типы режимов лишь крайние случаи, если расположить все эндогенные режимы в некий ряд в зависимости от степени подвижности и проницаемости коры. Между ними существует целый набор различных переходных типов, отличающихся комбинациями характерных признаков. Во времени смена режимов происходит не всегда в той последовательности, в какой они встанут в наш условный теоретический ряд. В природе возможны различные переходы от одного режима к другому. Но существуют «запретные» скачки, реально в природе никогда не наблюдаемые, скажем от режима древней платформы к эвгеосинклинали. Изучение последовательной смены режимов и выяснение возможных и невозможных их переходов — важнейшие задачи, поскольку это открывает перед нами способ познания эволюции процессов в тектоносфере. А то, что нам удастся и в современную эпоху наблюдать одновременное существование различных режимов на материках, позволяет сопоставить

их геологические проявления на поверхности с глубинным строением. Тогда эволюционная последовательность эндогенных режимов может быть связана с закономерностями преобразования вещества в тектоносфере.

Эндогенное развитие земной коры подчиняется некоторому ритму. Тектонические, магматические и метаморфические процессы повторяются в определенной последовательности, составляя «эндогенные циклы», продолжительность каждого из которых около 200 млн. лет. Например, повторяются крупные опускания материков и их поднятия, они то заливаются морем на больших площадях, то поднимаются выше его уровня, и на них возникают горы. Эти циклы не всюду одновременны, но все же большие области материков проходят сходные стадии развития почти синхронно.

Характер изменения эндогенных процессов в течение цикла таков, что в них можно подметить некоторую импульсивность: периоды усиления глубинной активности чередуются с периодами ее ослабления. Ослабление приходится на середину цикла, тогда как период времени, охватывающий конец цикла и начало следующего, характеризуется усилением тектонической и магматической активности.

Эти кратко рассмотренные основные черты эндогенных геологических режимов позволяют подойти к построению принципиальной модели глубинных процессов на материках. Но вначале надо попытаться выяснить самое главное из того, что нам известно о связях между проявлением эндогенных режимов на поверхности с глубинным строением земной коры и верхней мантии.

Наиболее прямая связь, как показывают наблюдения, существует между эндогенными режимами, с одной стороны, и степенью выраженности и глубиной залегания астеносферы, с другой. Как уже упоминалось, астеносфера отличается от выше- и нижележащих слоев мантии несколько меньшей плотностью вещества, что регистрируется по снижению скорости распространения сейсмических волн. Сейчас принято считать, что материал этого слоя частично расплавлен: между твердыми кристаллами, которые преимущественно образованы минералом оливином, находится расплавленный базальт в виде мелких капель-включений или пленки обволакивающей твердые зерна. Это и определяет

свойства астеносферы: она обладает не только меньшей плотностью, но и меньшей вязкостью и, следовательно, большей подвижностью. Но под областями с разным режимом степень расплавленности астеносферы и степень ее влияния на сейсмические скорости различны. Под наиболее спокойными участками земной коры — древними платформами — астеносфера проявляется всего слабее и местами, возможно, отсутствует совсем. Под молодыми горами, поднятие которых свидетельствует об активности глубинных процессов, астеносфера приподнята и сильно разуплотнена. Наиболее резко выражена астеносфера под вулканическими зонами, где канал с размягченным веществом поднимается от ее поверхности до нижней границы земной коры.

Одновременно с этим наблюдается изменение величины теплового потока, восходящего из недр Земли к ее поверхности. Он минимален на древних платформах, больше в областях молодых гор и максимален в вулканических зонах.

Теперь, когда мы располагаем самыми главными, известными на сегодня фактическими данными, можно перейти к изложению основных черт принципиальной модели глубинных процессов. Важнейшей частью ее является периодическое прогревание астеносферы, которое сменяется периодами ее остывания. Во время такого «теплового импульса» плотность астеносферы снижается, а подвижность возрастает. То обстоятельство, что малоплотная астеносфера покрывается более плотными верхними слоями мантии, приводит к уже знакомому нам состоянию неустойчивого равновесия — инверсии плотностей на верхней границе астеносферы. Ее материал стремится всплывать, а материал вышележащих слоев — тонуть. Это, как нам известно из очерка, посвященного складчатости, тот же механизм адвективного перемещения вещества, однако происходящий на гораздо более глубоком уровне в недрах Земли. Такая адвекция, или мантийный диапиризм, приводит к интенсивным вертикальным движениям земной коры: одни глыбы ее поднимаются, другие опускаются. Если эти движения происходят с достаточной интенсивностью, то в зависимости от характера проницаемости коры магмы, мощности и жесткости земной коры на поверхности возникают подвижные режимы — эвгеосинк-

динальный или орогенный. Когда астеносфера остывает, происходит уменьшение контрастности движений земной коры, снижение их скорости. Новый тепловой импульс вызывает следующее оживление тектонической активности и магматизма. В конце концов тепловые импульсы становятся все слабее, и подвижные режимы постепенно то в одном, то в другом районе сменяются спокойными — платформенными. Есть определенные закономерности в направленности этого процесса успокоения эндогенных режимов: первыми стабилизировались древние платформы (например Русская). Потом к ним причленились новые спокойные области, и в последнее геологическое время подвижные режимы сохранились только по окраине Тихого океана и в полосе от Средиземного моря до Индонезии.

О происхождении тепловых импульсов мы можем строить только предположения. Одна возможность состоит в периодическом подъеме из глубин нижней мантии сильно нагретого вещества в процессе общей дифференциации земного шара. Установлено, что наша планета разделена по своему радиусу на ряд сферических оболочек разного состава, причем плотность вещества, слагающего оболочки, уменьшается от центра к поверхности. Такое строение могло явиться только результатом дифференциации, т. е. разделения первичного однородного вещества Земли на слои различной плотности, — более плотные вещества опускались вглубь, а менее плотные поднимались. Есть основания полагать, что этот процесс продолжается до сих пор. Связанный с этим вынос вверх, на уровень астеносферы, горячего глубинного вещества должен приводить к нагреванию последней. Периодичность же выноса связана с тем, что прежде, чем «пробить» вышележащие вязкие толщи Земли, относительно легкий материал должен собраться в крупные массы: всплывание мелких частиц происходило бы слишком медленно или было бы вообще невозможно. Такое предположение было высказано Е. А. Артюшковым.

Другое предположение было выдвинуто академиком А. Н. Тихоновым с сотрудниками. Суть его состоит в том, что в мантии на глубине нескольких сотен километров периодически возникает слой, где материал оказывается частично расплавленным. Затем этот слой переме-

щается вверх, принимая форму колонны или столба, и постепенно остывает и сужается. Перемещение вызвано тем, что непрерывно подплавляются все новые вышележащие слои, а на дне частично расплавленного слоя все время оседают твердые кристаллы. Такой подвижный, частично расплавленный слой может достигнуть астеносферы и принести в нее тепло и новый легкоплавкий материал. Здесь его путь заканчивается. Но одновременно на глубине нескольких сотен километров возникает новый слой частичного плавления, который начинает свой путь вверх и т. д.

Связь поверхностных геологических режимов с подкоровыми процессами указывает на то, что «корни» эти режимов опускаются на очень большие глубины — не только до астеносферы (поскольку каждому режиму соответствует «своя» астеносфера), но и на еще большую глубину, в те области, откуда в астеносферу периодически доставляются тем или иным путем порции тепла. Если мы посмотрим на состояние земной коры в настоящий момент, то увидим, что на поверхности существуют различные по активности режимы, а это означает наличие крупных неоднородностей в строении мантии, распространяющихся вглубь на сотни километров. Эти неоднородности только начали изучаться. До сих пор геофизики ограничивались преимущественно созданием моделей глубинного строения Земли, средних для всей планеты. На таких моделях интересующие нас неоднородности почти не отражались. Теперь геофизическое изучение глубин направлено на получение данных для разработки «региональных» моделей, приуроченных к областям с определенным геологическим строением и режимом. И уже первые результаты со всей ясностью показывают, что предполагаемые неоднородности существуют.

На прочные связи поверхностных слоев с большими глубинами указывает и происхождение химического состава земной коры материков. Этот вопрос был недавно рассмотрен А. Б. Роновым и А. А. Ярошевским. Ими установлено, что то количество калия, которое содержит земная кора материков, может быть получено, только если процессом дифференциации охвачена толща мантии Земли больше чем на тысячу километров

по радиусу. Тут уместно заметить, что для обеспечения наблюдаемым количеством калия океанической коры, достаточно вовлечь в дифференциацию всего несколько десятков километров мантии по толщине. Таким образом, характер процессов в мантии под материками резко отличен от процессов, происходящих под океанами.

Разумеется, в обобщающей теории проблема развития и происхождения океанической коры должна занять весьма значительное место, и ответы на возникающие вопросы необходимо искать. Выше была рассмотрена модель процессов, происходящих в земной коре и мантии только материков. Однако следует хотя бы кратко остановиться на том, какие процессы могут происходить в глубинных слоях океанов. При этом следует помнить об истории геологического развития и глубинных процессах на материках, для того чтобы модель океанических процессов не оказалась в противоречии с материковой.

Для обсуждения этих вопросов надо несколько уточнить те различия в строении земной коры материков и океанов, о которых упоминалось выше. На материках земная кора состоит по крайней мере из трех слоев — верхнего, относительно менее плотного слоя осадков, подстилающего его «гранитного» слоя, и нижнего — «базальтового». Ниже уже идет вещество мантии. Следует сразу же оговориться, что названия «гранитный» и «базальтовый» в значительной мере условны и возникли потому, что скорости прохождения сейсмических волн в этих слоях близки по своим значениям к скоростям в соответствующих горных породах. Истинный же вещественный состав этих слоев тоже пока является сложной проблемой. Толщина земной коры на материках в среднем составляет 30—40 км, но в отдельных местах она достигает 60 км и более.

Океаническая земная кора характеризуется гораздо меньшей толщиной — 15—20 км, а иногда и меньше. И самое главное, в коре океанического типа отсутствует «гранитный» слой, и рыхлые осадки ложатся прямо на базальтовый слой. Существуют на Земле участки, где наблюдается кора промежуточного типа, переходного, когда «гранитный» слой постепенно выклинивается и исчезает, и типичные рыхлые осадки подстилаются слоем, в котором скорости сейсмических волн боль-

ше, чем в осадках, но не достигают «гранитных». Составление типа строения земной коры с геологическим устройством того или иного участка на поверхности позволяет наметить эволюцию преобразования коры и проследить даже за отдельными стадиями ее развития. Это очень важно для выработки основных положений теории эндогенных процессов. Задача состоит в том, чтобы накапливать фактический материал по строению коры различных регионов, находящихся на разных стадиях геологической эволюции для того, чтобы детализировать этапы и стадии развития земной коры.

Несмотря на достигнутые успехи в изучении океанических пространств нашей планеты, следует все же признать, что в настоящее время мы располагаем еще слишком малым арсеналом фактов о строении и геологической истории дна океанов, чтобы уже сейчас можно было прийти к какому-то определенному решению всех проблем, связанных с формированием океанической коры. Но все же кажется, что обобщающие геотектонические гипотезы не могут не учитывать представлений о значительной роли в истории Земли процессов превращения толстой материковой коры с ее «гранитным» слоем в тонкую «базальтовую» океаническую кору. Во многих местах есть неопровержимые свидетельства того, что такой процесс происходит. Это внутренние моря, такие как Средиземное, Карибское, Мексиканский залив, и окраинные, как Берингово или Японское. Не более 10 млн. лет тому назад на месте этих морей по геологическим данным существовала суша и была материковая кора. Она превратилась в океаническую, и одновременно с этим произошло опускание земной коры и образование на этом месте морей.

Трудно утверждать, что такой процесс «океанизации» материковой коры в свое время охватывал всю площадь океанов. Не исключена возможность, что значительные части последних являются наследием каких-то крупных первичных неоднородностей в составе и строении земного шара. Но можно утверждать, что прежде материковая кора покрывала значительно большие площади на поверхности Земли, чем теперь.

Процесс «океанизации» можно представить себе как опускание глыб материковой литосферы в возникающие в мантии крупные расплавленные очаги. Плотность

расплава, состоящего из вещества мантии, не больше $2,8 \text{ г/см}^3$ при атмосферном давлении. Средняя плотность твердой литосферы при тех же условиях не меньше $3,0 \text{ г/см}^3$. При повышении давления с глубиной и та и другая плотности должны возрастать, но соотношение между ними должно сохраняться до глубин в сотни километров. А это означает, что при возникновении крупных областей плавления в мантии литосфера неминуемо будет тонуть в расплаве и в нем постепенно растворяться. На поверхность при этом будут изливаться из мантии те базальты, которые образуют, как известно, так называемый второй слой океанической коры, залегающий непосредственно под маломощными осадками. При прогревании горных пород материковой литосферы из них выделяется вода, а плотность оставшегося твердого кристаллического материала увеличивается. Это еще больше способствует опусканию глыб литосферы в расплавленную мантию и ведет к общему прогибанию поверхности твердых пород, которая образует впадину, заполняемую водой. С этой точки зрения океаны и моря с океанической корой можно рассматривать как области проплавления коры в обстановке большого разогревания земных недр. Последнее же можно считать результатом общего, но неравномерного, развивающегося в разных местах с разной интенсивностью, радиоактивного разогревания земного шара.

Изложенная гипотеза, как это указывает и сам ее автор В. В. Белоусов, не претендует на окончательное решение проблемы. Она лишь указывает направление исследований, о котором не следует забывать и которое кажется гораздо более реалистичным, чем геометрические построения «глобальной тектоники плит».

Главная задача сейчас, как и прежде, состоит в изучении природных объектов: структур, вещества земной коры и мантии, неоднородностей строения этих оболочек Земли.

В рассмотренной гипотезе мы снова встречаемся с адвективными перемещениями материала, как это было при рассмотрении проблемы складкообразования. Однако в данном случае адвекция происходит уже не внутри земной коры, а охватывает всю тектоносферу, т. е. систему кора — верхняя мантия. Очевидно, это основная форма передачи энергии из земных недр к

поверхности и основной механизм, который определяет развитие тектоносферы и приводит к изменениям облика Земли. Механизм адвективных перемещений не встречает таких противоречий с точки зрения механики, как допустим «тектоника плит». Он воспроизводится на моделях и может быть рассчитан физически. Такие расчеты уже есть и они показывают, что при известных нам сегодня основных свойствах слоев тектоносферы (плотность, вязкость, прочность) процесс адвекции вполне реален. При этом в верхних горизонтах земной коры неизбежно будут происходить значительные горизонтальные перемещения пластин пород, приводящие к образованию структур надвигов и покровов. Однако от таких перемещений относительно тонких пластин (первые километры по толщине максимально) еще очень далеко до горизонтальных перемещений литосферных плит, имеющих мощность не менее сотни километров и более. Но подобный логический скачок через масштабы явлений происходит постоянно у сторонников «новой глобальной тектоники» при обосновании своих представлений. Надвиги и покровы считаются прямым доказательством движения литосферных плит.

При всей своей привлекательности и хорошем соответствии с фактами идея адвективных перемещений оказывается все же недостаточно полной и всеобъемлющей. Легко заметить, что при обсуждении возможных связей поверхностным и глубинным горизонтам Земли речь идет все время о картине, которую можно наблюдать на вертикальном срезе через земную кору и мантию, т. е. на профиле. Это естественно. Однако хотя здесь и обсуждаются связи и взаимоотношения различных режимов на площади, основные закономерности таких латеральных связей не вскрыты. Нет настоящего объяснения наблюдаемым на поверхности Земли пятнам и полосам, закономерным конфигурациям материков, распределению активных и пассивных зон на земном шаре сегодня и в прошлые геологические эпохи, не поняты основные черты планетарной сетки разломов. Очевидно, вскрытие этих основных закономерностей должно быть одной из важнейших задач предстоящих исследований. Только при объединении с результатами таких исследований адвективная гипотеза сможет решить проблему эндогенного развития Земли в глобальном масштабе,

Книжку о тайнах Земли можно на этом и закончить. Хотя разумеется мы коснулись только некоторых загадок, тех, которые ближе автору и показались ему наиболее интересными для рассказа о них неспециалистам. Казалось, что на примере некоторых разгаданных и неразгаданных тайнах Земли можно показать не только сегодняшнее состояние геологии, но и дать почувствовать атмосферу работы геологов, дух поиска и пути, которыми геологи идут к решению различных проблем. Если это удалось, автор будет считать свою задачу выполненной.

При обсуждении различных проблем автор, естественно, не мог оставаться беспристрастным сторонним наблюдателем и тем более не мог взять на себя роль судьи в разрешении научных споров. Волей-неволей автор излагал свою точку зрения и высказывал свои убеждения по спорным вопросам. Хотелось, конечно, убедить в своей правоте и читателя, но при этом каждый раз была надежда, что свои представления автор не навязывает читателю, а старается убедить в них.

Список разгаданных и неразгаданных тайн может быть продолжен, и о них, вероятно, будут написаны другие книги. Но никогда не может быть прекращен научный поиск, поскольку разрешение каждой проблемы всегда порождает новые вопросы, выдвигает новые проблемы.

В заключение хотелось бы сказать несколько слов об одной из основных тайн Земли, раскрытие которой, как представляется, в самом деле может вывести науку о Земле на новую ступень развития. Это вопрос о том, закономерно или случайно устроена поверхность нашей планеты. Отчасти мы коснулись этих вопросов в последнем очерке, но там были высказаны только некоторые предположения о том, что все не случайно. Какие же есть пути разрешения этого вопроса?

С давних пор известны попытки увидеть какие-то закономерности в лике нашей планеты, в устройстве её

поверхности. Подобия и соответствия в очертаниях суши, в расположении и рельефе материков и океанов привлекали внимание еще античных ученых. Об этом есть упоминания у Платона, писал об этом в своей «Географии» древнегреческий географ Страбон. К мысли о том, что рельеф Земли не может быть случаен, а подчинен вполне определенным закономерностям приходил английский философ Френсис Бекон. В конце XIX-го — начале XX в. идея о закономерном строении рельефа нашей планеты и о связи рельефа с геологическим строением и развитием встречается в трудах многих крупных ученых: Эли де Бомона, А. Грина, А. Лаппарана, Дж. Грегори, А. П. Карпинского, В. И. Вернадского, П. Фурмарье.

Поиск закономерностей в устройстве рельефа шел в основном двумя путями, с одной стороны, развивалась идея антиподальности материков и океанов, с другой — в общем строении земного шара видели некое подобие кристаллу: икосаэдру, додекаэдру, октаэдру. Идея эти поиски и насчитывают, как мы видели, солидный стаж, они все же не привели до сих пор к тому, чтобы эти идеи проникли в современную геологию, геофизику, тектонику, не стали основой не только поверхностного изучения нашей планеты, но и ее глубин. Хотя у некоторых крупных геологов (Э. Ог, например) есть упоминания об этих разработках даже в учебниках, есть и попытки связать как-то тектоническую эволюцию Земли, локализацию орогенных поясов с идеей Земли-кристалла, но все же это не стало общепризнанной основой теоретической геологии, не послужило базой для создания теории Земли. Современные «солидные» ученые издания просто игнорируют эти идеи, оставляя их «на откуп» научно-популярным журналам или предоставляя обсуждать их неспециалистам в области наук о Земле.

В чем же дело? Можем ли мы объяснить сложившуюся ситуацию только косностью геологов, их нежеланием отказаться от своих традиционных методов исследования? Нет, конечно. Дело скорее в том, что предлагаемые закономерности до сих пор были очень неопределенны, не точны, и только с большими натяжками могли быть увязаны с тем, что нам известно о внутреннем строении Земли.

Скажем, для демонстрации антиподальности материков и океанов по Дж. Грегори действительно получается, что очертания материков, спроектированные на другую сторону земного шара через центр Земли как через центр симметрии, попадают на океаны. Однако все же 18% суши попадает на сушу. Много это или мало? Для тех, кто хочет видеть в такой антиподальности закон устройства поверхности нашей планеты, — это мало. (Всего 18%!) Для тех же, кто не усматривает в этом ничего особенного: все-таки океаны занимают $\frac{2}{3}$ поверхности, а материки только $\frac{1}{3}$ и, стало быть, больше возможности при любых реконструкциях континентам попасть в океан, — для них эти 18% достаточны, чтобы поставить под сомнение саму идею антиподальности.

Примерно также обстоит дело при сопоставлении земного шара с любой кристаллической структурой. Где-то ребра и вершины такого кристалла отвечают реально существующим формам рельефа и геологическим структурам, где-то они только приблизительно соответствуют им, а в каких-то местах им не отвечает ничего.

Поэтому-то принять или не принять ту или иную глобальную идею закономерного строения Земли зависит сейчас от вкуса, веры, желания того или иного исследователя. Непреложных доказательств справедливости найденной закономерности нет.

Так что же, закономерное, не случайное устройство земной поверхности оказывается химерой, иллюзией? И следует отказаться от попыток найти какой-то общий закон распределения суши и океана, форм рельефа, сочетаний различных структур на лике Земли? Нет, это не так. Закон устройства земной поверхности существует, есть симметрия и антисимметрия в строении Земли. Однако, как это установил в последние годы А. А. Шульга, закон этот одновременно и гораздо проще, и гораздо сложнее, чем это предполагали до сих пор.

Земля не может быть уподоблена любому кристаллу, антиподальность есть, но она не так проста, как считал Дж. Грегори. Существующие симметрия и антисимметрия не приблизительны, они совершенно точны и могут быть выражены математически.

Стоит внимательно посмотреть на глобус — предлагает А. А. Шульга — и пройти вдоль линии экватора, линии наверняка не случайной на поверхности Земли. Южная Америка занимает вдоль экватора 30° , Атлантический океан — 60° , Африка — снова 30° , Индийский океан — 60° , острова Индонезии, которые надо скорее относить к суше, чем к океану, — 30° , а на долю Тихого океана остается 150° , число кратное 30. Случайно это или нет? Если есть желание и необходимость двигать литосферные плиты, а вместе с ними и материк, то можно считать это явление случайным. При любой схеме дрейфа материков вчера такого порядка не было на Земле и завтра тоже не будет. А нам сегодня просто повезло наблюдать такую закономерную картину.

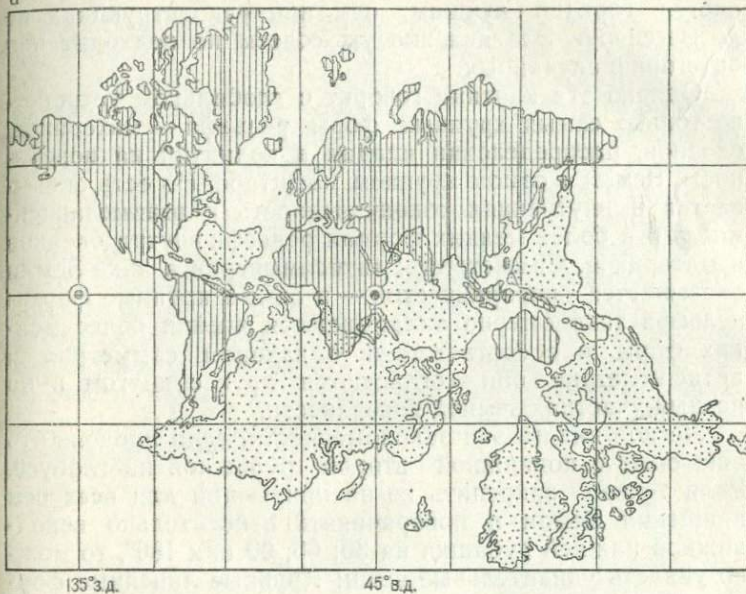
Но дело не ограничивается этим. На экватор выходят оказывается оси симметрии Земли (рис. 25, а, б). Их две: одна своими концами пересекает экватор на 50° з. д. (Атлантическое побережье Южной Америки) и на 130° в. д. (граница Тихого океана и Индонезии); вторая — на 45° в. д. (Индийское побережье Африки) и 135° з. д. — эта точка попадает в Тихий океан. Теперь, если мы наденем на глобус вторую рубашку с очертаниями материков и океанов, которая может свободно скользить по нему, и повернем ее на 180° вокруг любой из этих осей, то мы увидим, что материк в новом положении (перевернуты «вверх ногами») лягут только на океанические пространства неподвижной рубашки. И так будет при вращении вокруг любой из этих осей. Нигде при этих реконструкциях суша не ляжет на сушу. И не просто материк попадут в океан — мы ведь помним, что океаны занимают $2/3$ поверхности, а береговые линии перевернутых материков окажутся конформными с береговыми линиями материков, оставшихся неподвижными. Совпадение береговых линий в этих случаях (при вращении вокруг любой из осей симметрии) оказы-

Рис. 25. Испытание симметрией главных форм рельефа Земли (по А. А. Шульге).

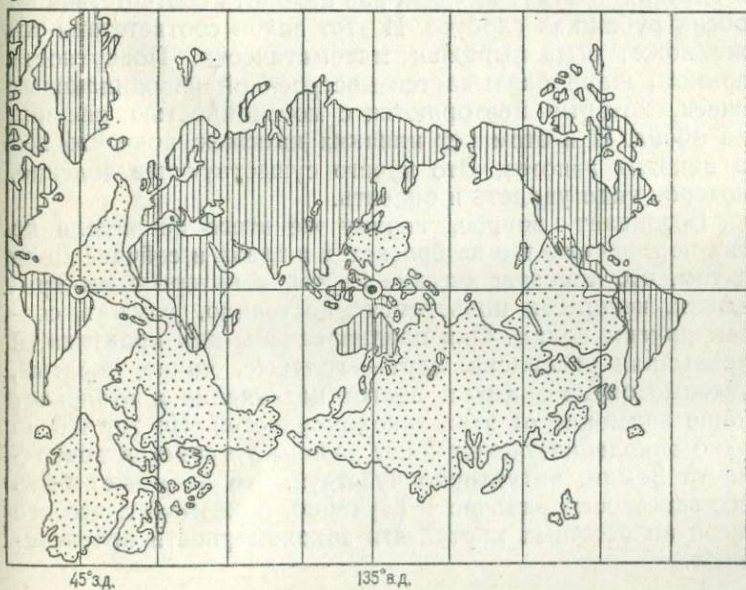
Контур континентов на неподвижной рубашке заштрихованы, на подвижной рубашке — покрыты точками

а — координаты оси поворота подвижной рубашки на экваторе 45° в. д. и 135° з. д.; б — то же, смещенное на 90° (135° в. д. и 45° з. д.)

a



б



вается гораздо лучшим, чем при реконструкциях по А. Вегенеру. Это явление уж совсем не подходит под категорию случайных.

Однако эта картина говорит о глобальном устройстве только самых крупных форм рельефа — материков, океанов, распределении впадин и поднятий на поверхности Земли в самом крупном масштабе. Но есть оказывается и внутренняя соподчиненность и взаимозависимость и в более мелких формах рельефа внутри океанов и материков. Симметрия и антисимметрия в лике Земли оказывается иерархической — в самые крупные формы рельефа закономерно вкладываются ячейки более мелких форм, и в соответствии с законом симметрии и антисимметрии они согласуются друг с другом и на разных участках земной поверхности.

Легко увидеть эти закономерности, если продолжить наш опыт с подвижной второй рубашкой на глобусе. Если теперь закрепить ее на привычной для всех оси вращения Земли и поворачивать относительно неподвижной нижней рубашки на 30; 60; 90 или 180°, то можно увидеть удивительные вещи! Крупные линейные формы рельефа — долины, хребты, водоразделы, впадины в океанах — будут каждый раз находить соответствие на обеих рубашках глобуса. И этот закон соответствия тоже может быть выражен математически. Поверхность земного шара оказывается построенной из одинаковых ячеек, которые повторяются с монотонностью рисунка на обоях. И в этом нет никаких натяжек, пока что нет и никаких гипотез. Это просто существующее явление, которое надо увидеть и описать.

Возникает вопрос, почему же этого не видели до сих пор, почему это не бросается в глаза и сейчас? Дело в том, что топографические карты, к которым мы привыкли, которыми пользуемся постоянно, служат совсем другим целям. Они предназначены для практики, и привычная раскраска карт — голубые, синие, желтые, зеленые пятна — имеет другое назначение и отвлекает наше внимание от этих закономерностей. Но то, что не одно поколение ученых ищет законы устройства поверхности Земли, интуитивно чувствуя, что не может быть все здесь беспорядочно и случайно, показывает, что все же и на обычных картах эти закономерности просвечивают.

Из всего сказанного вытекает важный вывод, имеющий отношение к сегодняшней дискуссии. Симметрия и антисимметрия в лике Земли серьезный аргумент против любых концепций «мобилистов». Надо либо закрыть глаза на эту закономерность, либо двигать материки, не разрушая эту симметрию. Но и в концепциях «фиксис-тов» закономерное сочетание форм рельефа, общий закон устройства земной поверхности тоже не находит никакого отражения. В этих гипотезах все остается на месте, но распределение на площади подвижных и стабильных областей, орогенных поясов и платформ не дает ответа на вопрос «почему». Все как будто задано изначально. Надо связать вместе черты, присущие поверхности Земли, с устройством ее глубин. Только тогда мы получим основу для теории строения и развития нашей планеты.

ОБЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ

Абсолютная геохронологическая шкала — шкала геологических событий, исчисляемых в миллионах лет. Градации этой шкалы (возраст) установлены по продуктам распада радиоактивных элементов, сохранившихся до настоящего времени в горных породах. Градации абсолютной геохронологической шкалы обычно сопоставляют с относительной геохронологической шкалой, где возраст событий устанавливается по остаткам организмов, захороненных в породах.

Адвекция — процесс обмена веществом между разными по глубине горизонтами земной коры и верхней мантии, когда более легкие и относительно менее плотные массы, оказавшиеся под более плотными и тяжелыми, стремятся всплыть и занять более равновесное положение в поле силы тяжести Земли. Одновременно более тяжелые массы вещества погружаются вниз.

Аллювиальные отложения — осадочные отложения, накапливающиеся в руслах и поймах рек. Чаще всего это рыхлые пески, галечники, слабоуплотненные глины.

Астеносфера — слой пониженных скоростей сейсмических волн, располагающихся внутри верхней мантии Земли. Обычно с астеносферой связывается представление о более низкой плотности и пониженной вязкости вещества, слагающего этот слой. Под тектонически активными областями — геосинклиналями, рифтовыми зонами — этот слой имеет большую мощность, и кровля его относительно приподнята по сравнению с территориями со спокойным тектоническим режимом (платформами).

Геосинклиналь, геосинклинальная область — зона повышенной активности тектонических движений, вертикальных перемещений блоков земной коры; область накоплений мощных толщ осадочных пород, интенсивных складчатых деформаций, интенсивных

проявлений магматизма. Сочетание активных тектонических движений, магматических и метаморфических процессов принято объединять в геосинклинальные эндогенные режимы, среди которых различаются эвгеосинклинальный — интенсивное прогибание земной коры с накоплением мощных осадков, сопровождаемое основным и ультраосновным магматизмом, и инверсионно-геосинклинальный с преобладанием интенсивных поднятий, складкообразования и магматизма кислого состава.

Геотектонический цикл — повторяющаяся закономерная последовательность событий, примерно синхронно охватывающая большую часть континентальных пространств Земли. Для этих циклов характерна повышенная активность тектонических процессов и движений в начале и в конце цикла, снижение их интенсивности в середине. Последние 600 млн. лет истории Земли (фанерозой) разделяются на три геотектонических цикла, каждый из которых имеет длительность примерно в 200 млн. лет; каледонский, герцинский и альпийский.

Глубинный диапиризм — процесс разуплотнения и выжимания вверх какого-то объема осадочных горных пород в глубоких горизонтах земной коры. Механизм этого процесса аналогичен диапиризму в приповерхностных горизонтах осадочной толщи (см. диапир). В процессе развития глубинного диапира происходят деформация и складкообразование как самих выжимающих пород, так и пород, в которые внедряется диапир. Глубинный диапиризм может быть обусловлен метаморфическими преобразованиями вещества горных пород, происходящими в глубоких горизонтах земной коры под воздействием высоких температур и давлений.

Глубинный разлом — узкая протяженная зона, рассекающая земную кору на всю или почти всю ее толщину и разделяющая ее на блоки. Обычно зона глубинного разлома является границей блоков с разным режимом и направлением тектонических движений и характеризуется повышенной проницаемостью для магматических расплавов. С зонами активных в настоящее время глубинных разломов связана высокая сейсмичность.

Глубоководный желоб — вытянутый узкий

асимметричный прогиб океанического дна, обычно располагающийся с внешней стороны островной дуги и отделяющий ее от океана. Но в некоторых случаях глубоководный желоб располагается со стороны внутреннего моря (желоб моря Банда, например). Глубоководные желоба протягиваются на тысячи километров (до 4 000 км) при ширине в несколько километров, глубина их колеблется от 5 до 11 км (например, глубина Мирового океана 11,022 км измерена в Марианском желобе). Глубоководные желоба, входящие в систему островных дуг, отличаются повышенной активностью тектонических движений и высокой сейсмичностью.

Горные породы — естественные природные образования, слагающие земную кору. Обычно к горным породам относят твердые каменные образования, хотя, строго говоря, к ним должны относиться и вода, и нефть. Среди горных пород различают осадочные — накапливающиеся на дне морей и водоемов; к ним относятся песчаники, известняки, глины, мергели и др. Отличительной особенностью осадочных пород является слоистость. Магматические породы — это продукты застывания на поверхности Земли или вблизи ее расплавов глубинного вещества — магмы. Метаморфические породы — результат переработки в условиях высоких температур и давлений как первично-осадочных, так и магматических пород. Это гнейсы, кристаллические сланцы, мраморы и др.

Ди а п и р — антиклинальная, чаще всего куполовидная изометричная в плане складка, ядро которой, сложенное пластичными, сильномятыми породами, протыкает вмещающие вышележащие слои. Ядро диапира может быть сложено глинами, каменной солью, в редких случаях мергелями, известняками. Процесс выдавливания пластичных осадочных пород и протыкания ими более жестких вышележащих пластов носит название диапиризма.

Д и з ъ ю н к т и в н ы й у з е л — место пересечения двух или нескольких тектонических разрывов разного направления.

З е м н а я к о р а — верхняя твердая оболочка Земли, которая имеет среднюю мощность на континентах 30—40 км, в океанах 10—20 км. В ней различают верхний

осадочный слой, подстилающий его «гранитный» или гранито-гнейсовый и нижний «базальтовый» или гранулит-базитовый. Названия двух последних слоев условное, так как они устанавливаются лишь по скоростям сейсмических волн, которые оказываются близкими к тем, которые определены в лабораторных условиях. Для океанической коры характерно отсутствие «гранитного» слоя.

Изолинии — линии на картах, соединяющие точки с одинаковыми значениями какого-либо признака, качества. На картах рельефа изолиниями будут горизонталы, показывающие высотное положение различных форм рельефа. Линии, соединяющие точки равных мощностей отложений какого-либо возраста, называются изолиниями мощностей, или изопахитами.

Инверсия геотектонического режима — характерная для геосинклиналей смена основной направленности тектонических движений: области предшествующего прогибания начинают воздыматься, а области приподнятые становятся прогибами. Инверсия — главный переломный момент в развитии геосинклинальных областей; с этим моментом связаны смена состава как осадочных, так и магматических формаций, а также деформации пород и формирование складчатости.

Инверсия плотностей — залегание менее плотного слоя или пакета слоев в земной коре ниже более плотных покрывающих его толщ. Инверсия плотностей оказывается состоянием неустойчивого равновесия в гравитационном поле Земли и является одним из необходимых условий для возникновения процесса диапиризма или в более широком смысле процессов адвекции.

Кливаж — расслоение пород на тонкие пластинки по системе параллельных трещин, обычно пересекающих слоистость горных пород. Кливаж чаще всего бывает ярко выражен в глинистых породах, превращенных в сланцы, так называемых кровельных сланцах или филлитах.

Конвекция — упорядоченное движение вещества (чаще всего газообразного или жидкого) в поле силы тяжести под влиянием разницы температур в среде и соответствующей разницы плотности.

Конгломерат — осадочная горная порода, состоящая из крупных окатанных обломков, сцементированных каким-либо тонкодисперсным веществом — песком, глиной.

Литосфера — верхняя твердая оболочка Земли, включающая земную кору и часть верхней мантии, подстилаемую астеносферой. На континентах толщина литосферы достигает 400 км, в океанах 150—200 км.

Литосферные плиты — обширные области литосферы, разделенные крупными глубинными разломами.

Магнитуда землетрясения — условная величина энергии, выделившейся при сейсмическом толчке. Интенсивность землетрясений по шкале Рихтера, чаще всего принятая в официальных сообщениях, соответствует примерно магнитуде. Интенсивность сотрясения на поверхности Земли при сейсмических толчках обычно измеряют в баллах и устанавливают по характеру происшедших разрушений.

Мантия Земли — промежуточная между земной корой и ядром оболочка Земли. В мантии выделяют верхнюю мантию до глубины 400 км и нижнюю, простирающуюся до границы внешнего ядра, т. е. до глубины 3600 км.

Островная дуга — дугообразно или прямолинейно вытянутые цепочки островов в океанах, обычно вблизи их окраин, около переходных зон к континентам. Островные дуги характеризуются повышенной активностью тектонических процессов, вулканизмом (к ним приурочено большинство действующих вулканов Земли) и высокой сейсмичностью. Островные дуги являются специфическим структурным элементом земной коры, характерным для континентальных окраин тихоокеанского типа.

Платформа — относительно устойчивая область континентальной земной коры с пониженной активностью тектонических движений, чаще всего с почти полным отсутствием магматизма. Платформенные эндогенные режимы характеризуются снижением уровня проявления всех эндогенных процессов.

Разрыв (разлом) — тектоническое нарушение сплошности горных пород с перемещением разделенных разрывом частей друг относительно друга. Разрывные нарушения сильно различаются своими размерами: про-

тяженностью, шириной, глубиной проникновения; они могут изменяться от разрывов, затрагивающих один или несколько слоев, до глубоких расколов, рассекающих всю земную кору. Тектонические разрывы обычно возникают в обстановке общей деформации горных пород и сопровождают образование складок. В зависимости от положения поверхности разрыва и характера движения по ней различают сбросы, взбросы, надвиги, сдвиги, поддвиги и т. д. Иногда вместо терминов разрыв, разрывное нарушение применяют несколько устаревшие термины — дизъюнктив, дизъюнктивное нарушение (*disjunctive* — разъединение).

Рифт, рифтовая долина — (англ. *rift* — расщелина, ущелье) — линейновытянутая щелевидная впадина, протягивающаяся на сотни и даже тысячи километров, обычно ограниченная разломами и имеющая глубинное происхождение. Ширина рифтовых долин изменяется от нескольких километров до первых сотен километров. Различают внутриконтинентальные и срединно-океанические рифты, известны переходы рифтовых долин с континента в океан: Восточно-Африканская система рифтов связана с рифтовыми долинами Индийского океана.

Складки — изгибы пластов осадочных и метаморфических горных пород любых форм и размеров, обычно без нарушения сплошности вещества составляющих их горных пород. Складки очень разнообразны по форме, размерам, а также по механизму своего образования. Различают положительные, обращенные выпуклостью вверх, складки — антиклинали и отрицательные, обращенные выпуклостью вниз — синклинали. Строго говоря, при сложных деформациях пространственное положение изгиба — недостаточный признак для распознавания антиклиналей и синклиналей (например, в опрокинутых или лежащих складках), точнее, это различие должно основываться на возрасте слагающих складку пластов: в антиклинали ближе к оси перегиба, ядру складки располагаются более древние породы, в синклинали — более молодые. В тех случаях, когда нет возможности установить относительный возраст образующих складку слоев (в метаморфических толщах, например), говорят об антиформах и синформах.

Тектоносфера — оболочка Земли, включающая литосферу и астеносферу. Во взаимосвязанном развитии всех слоев, составляющих тектоносферу, заключаются основные причины закономерного развития Земли, тектонических преобразований, происходящих на ее поверхности.

Филлиты — метаморфические сланцевые горные породы, образующиеся в результате преобразования глинистых осадочных пород. По степени метаморфизма являются переходными от глинистых к слюдяным сланцам.

Эндогенные процессы — геологические процессы, вызванные внутренними силами Земли. Источником энергии эндогенных процессов служат физико-химические преобразования вещества Земли в поле силы тяжести; к ним относятся тектонические, магматические и метаморфические процессы. Синонимы — глубинные процессы, внутренние процессы.

Эндогенные режимы — закономерные сочетания различных эндогенных процессов (тектонических, магматических и метаморфических) в каждом данном участке земной коры на протяжении определенного этапа геологического развития — геотектонического или тектоно-магматического цикла. Устанавливают «спокойные» и «возбужденные» эндогенные режимы; к первым относятся, например платформенные, ко вторым — геосинклинальные и орогенные. Эндогенные режимы сменяют друг друга во времени от одного геотектонического цикла к другому и могут постепенно или резко переходить одни в другие в пространстве.

СОДЕРЖАНИЕ

О чем хочет рассказать автор	3
ЧТО ИЩЕШЬ, ГЕОЛОГ?	9
Каждый должен искать	9
Ответ на возможные возражения	12
Сообщающиеся сосуды	14
Фантастика и реальность	17
Сегодня и завтра	18
Еще немного фантастики	20
ЗАГАДКИ СКЛАДОК	24
Горы и складки	24
Складки — остаточная деформация	28
Два взгляда на происхождение складчатости	31
«Поле» в горах	34
Как устроена складчатая область	40
Развитие складчатой области	42
Еще о гипотезах	48
«По закону Архимеда...»	50
Глубинный диапиризм, конвекция, адвекция	54
Все ли «за»?	61
ГЕОЛОГИЯ И МАТЕМАТИКА	64
В ногу с веком	64
Как быть с интуицией?	68
Старый спор	70
Эксперимент и Земля	71
Как же математизировать геологию?	73
ПОДЗЕМНЫЕ БУРИ	77
Внимание! Землетрясение!	77
Понять и предвидеть	81
Геология и прогноз сейсмичности	83
Как изучать землетрясение	87
Трудности на каждом шагу	97
Два пути решения задачи	102
ИДЕИ И ФАКТЫ	114
Борьба идей — путь развития науки	114
Взгляд с океана на материк или с материка на океан?	117
Плавают ли материки?	120
«Шкура тигра или шкура леопарда?»	128
Эндогенный режим — дыхание астеносферы	136
ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ	147
ОБЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ	154

