

И. И. ШАФРАНОВСКИЙ, Л. М. ПЛОТНИКОВ

*Ин. Шифр  
Кремлевский  
Л. М.*

# СИММЕТРИЯ В ГЕОЛОГИИ



И. И. ШАФЕРОВСКИЙ, Л. М. ПЛОТНИКОВ

# СИММЕТРИЯ В ГЕОЛОГИИ



ЛЕНИНГРАД  
«НЕДРА»  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
1975

**Шафрановский И. И., Плотников Л. М.** Симметрия в геологии. Л., «Недра», 1975. 144 с.

Применение математических законов симметрии в области геологических наук привлекает сейчас повышенное внимание. Как у нас, так и за рубежом появилась обширная литература, посвященная симметрии геологических объектов и явлений.

Цель данной книги — дать обобщающие понятия об этом новом научном направлении. Здесь приводятся необходимые сведения, относящиеся к учению о симметрии, наглядные примеры из области геологии, показывающие целесообразность использования законов симметрии, практические выводы, вытекающие из понятий о симметрии (как классической, так и новейшей — расширенной).

Рассматриваются возможности практического применения метода симметрии в геологии.

Книга рассчитана на широкие круги работников в области геологии и сопредельных с ней наук, студентов, аспирантов, преподавателей.

Табл. 9, ил. 61, список лит. — 193 назв.

III  $\frac{20805-301}{043(01)-75}$  85-75

© Издательство «Недра», 1975

*Иларион Иларионович Шафрановский, Лев Михайло вич Плотников*

#### СИММЕТРИЯ В ГЕОЛОГИИ

Редактор издательства *В. И. Нежелштейн*      Обложка художника *Ю. И. Прошлецова*  
Техн. редактор *А. Б. Яцуржинская*      Корректор *Л. И. Зайцева*

Сдано в набор 11/IX 1974 г. Подписано в печать 21/XI 1974 г. М-26139. Формат 60×90<sup>1/8</sup>.  
Бумага тип. № 2. Печ. л. 9. Уч.-изд. л. 10,03. Тираж 4400 экз. Заказ № 1234/294.  
Цена 1 р. 01 к.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение.  
193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете  
Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.  
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91

# ОГЛАВЛЕНИЕ

4

Предисловие

5

Глава 1. Учение о симметрии и геология

24

Глава 2. Краткий обзор литературы о симметрии  
в геологии

46

Глава 3. Симметрия Земли как планеты

62

Глава 4. Симметрия геологических структур

99

Глава 5. Симметрия структур и текстур горных пород

108

Глава 6. Симметрия окристаллизованных минеральных  
индивидов

132

Заключение

137

Список литературы

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В литературе все чаще публикуются работы, посвященные симметрии геологических объектов и явлений. Их авторами усиленно подчеркивается не только теоретическое, но и практическое значение этих понятий. Непрерывно растущая информация по данному вопросу, как отечественная, так и зарубежная, требует специальных сводок, критических обзоров и обобщающих выводов.

Наша небольшая книга представляет лишь самый первый шаг в данном направлении. Задача ее — показать целесообразность и пользу применения законов симметрии в области геологии. Для этого мы прежде всего вкратце напоминаем читателю основы учения о симметрии, знакомые большинству геологов по студенческим курсам кристаллографии. Рассказывая о них в самом популярном виде и иллюстрируя их примерами из геологии, мы ограничиваемся геометрической интерпретацией этих основ как наиболее наглядной и привычной для натуралистов.

Усиленно нами подчеркивается то, что законы симметрии являются строго ограниченными и определенными, не допускающими каких-либо произвольных трактовок. Наряду с классической симметрией приводятся краткие сведения о симметрии многоцветной и подобия, антисимметрии, криволинейной симметрии, гомологии, которые могут быть с успехом использованы при углубленном анализе геологических явлений.

Книга содержит краткий обзор литературы по симметрии в геологии и соответствующие выводы и критические замечания. В ней рассмотрены конкретные примеры симметрии, относящиеся к глобальной геологии, геологическим структурам, текстурам и структурам в петрологии, окристаллизованным минеральным индивидам.

В заключение приводятся обобщающие выводы и отмечаются перспективные возможного фактического использования законов симметрии в геологии.

За все замечания, дополнения и поправки авторы будут глубоко благодарны своим читателям.

## УЧЕНИЕ О СИММЕТРИИ И ГЕОЛОГИЯ

Сейчас, когда проблема математизации естественных наук является особо актуальной, все большую роль в самых разнообразных дисциплинах и самых широких масштабах начинает играть учение о симметрии. Физики, химики, биологи, географы ясно сознают необходимость всемерного использования геометрических законов симметрии для обобщающих математических характеристик изучаемых ими явлений.] Недавно к ним присоединились и геологи. Учение о симметрии рассматривается как «общий метод познания закономерностей развития Земли» [41].

~~Прежде чем перейти к обсуждению приведенного положения, напомним основные понятия, связанные с симметрией, и особенности их возможного использования при анализе природных процессов и образований.~~

Как известно, долгое время симметрия развивалась преимущественно в трудах кристаллографов. «Кристаллы блещут симметрией», — подчеркивал гениальный русский ученый Е. С. Федоров (1853—1919) [129]. Именно это обстоятельство и привело к тому, что из строгой геометрии кристаллических тел были выведены все законы симметрии сперва для конечных, а затем и бесконечных систем. При этом кристаллографы не ограничились собственно кристаллическими образованиями, но дали вывод для всех геометрических фигур вообще. И все же, несмотря на это, симметричный подход рассматривался прежде всего как собственно кристаллографический метод. «Особенность кристаллографического метода состоит в последовательном применении принципа симметрии во всех случаях, когда это оказывается возможным», — писали по этому поводу академик А. В. Шубников и его соавторы по «Основам кристаллографии» [168, с. 5]. Вместе с тем, как уже отмечалось выше, учение о симметрии в настоящее время вышло далеко за рамки собственно науки о кристаллах. В этом отношении положение современной кристаллографии во многом напоминает роль математики, методы которой применяются в многочисленных и разнообразных дисциплинах. В качестве характерного примера укажем на ведущую роль кристаллографии в становлении молекулярной биологии. «Для нас, кристаллографов, — писал по этому поводу выдающийся английский ученый Д. Бернал, — особый интерес представляет тот факт, что это

крупнейшее достижение стало возможным, благодаря применению нашей дисциплины» [147, с. 5].

Геологи в отношении возможностей применения симметричного метода стоят в особо благоприятных условиях. В самом деле, за редкими исключениями, они проходят в годы студенчества достаточно солидный курс кристаллографии, который знакомит их с основными понятиями учения о симметрии. Поэтому попытка использовать в области геологических обобщений кристаллографические приемы характеристики и описания природных форм, очевидно, не встретит существенных затруднений. Пользуясь привычными для нас понятиями об элементах симметрии и простых формах, мы попробуем продемонстрировать на геологическом материале возможность и целесообразность перенесения этих элементарных представлений в область геологии. По этой же причине нет надобности давать более или менее развернутое изложение основных понятий о симметрии вообще, элементах симметрии, их совокупностях, выводе соответственных простых форм и т. д. Все это читатель найдет в общих курсах кристаллографии, предназначенных для студентов геологических институтов и факультетов [101, 129, 168 и др.]. Мы ограничимся лишь самым кратким напоминанием о важнейших понятиях, лежащих в основе учения о симметрии.

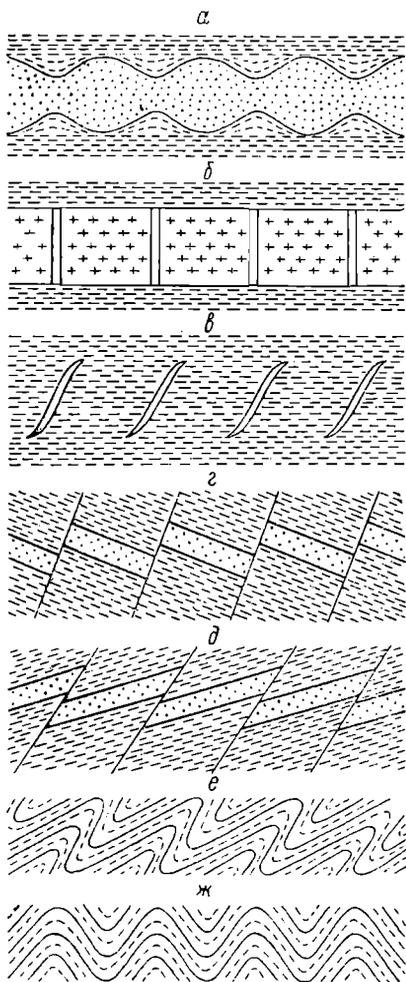


Рис. 1. Примеры симметричного распределения геологических структурных форм.

а — структура будинаж; б — «лестничные» жилы; в — серия S-образных жил; г — ступенчатый сброс; д — чешуйчатый надвиг; е — наклонные складки; ж — прямые складки.

симметричная требует равенства упомянутых фигур (или частей фигур.)

Прежде всего напомним, что сущность симметрии заключается в закономерной повторяемости фигур (или частей самосимметричных фигур). Классическая симметрия требует равенства упомянутых фигур (или частей фигур.)

Обращаясь к геологическому материалу, сразу же отметим, что наиболее часто встречающимся и соответственно наиболее часто фиксирующимся в геологической литературе проявлением симметрии является периодичность пространственного распределения одинаковых структурных форм (рис. 1).

Говоря о периодичности, т. е. более или менее правильной повторяемости деталей геологических структур, мы, конечно, сразу же вспоминаем принятое в кристаллографии классическое определение симметрии по Е. С. Федорову: «Симметрия есть свойство геометрических фигур повторять свои части или, выражаясь точнее, свойство их в различных положениях приходить в совмещение с первоначальным положением» [129, с. 3]. Некоторые оговорки, относящиеся ко второй части определения, приводятся далее.

Итак, вышеупомянутые структурные формы можно уподобить симметричным фигурам, характеризующимся определенными законами симметрии. Последние выявляются с помощью хорошо известных из той же кристаллографии элементов симметрии: вспомогательных геометрических образов в виде особых точек, прямых и плоскостей, относительно которых закономерно расположены равные части симметричных фигур. Для конечных фигур это будут: центр инверсии, плоскость симметрии, оси симметрии, сложные (инверсионные) оси.

**Ц е н т р и н в е р с и и**  $C$  или  $\bar{1}^*$  — особая точка внутри фигуры, характеризующаяся тем, что любая проведенная через нее прямая по обе стороны от нее и на равных расстояниях встречает соответственные точки фигуры (примеры фигур с центром инверсии: любой параллелепипед как косоугольный, так и прямоугольный — «кирпичик», — куб, шар и др.; в геологии — параллелепипедальные блоки пород, ограниченные трещинами).

**П л о с к о с т ь с и м м е т р и и**  $P$  или  $m$  — воображаемая плоскость, делящая фигуру на две зеркально равные части, расположенные относительно друг друга как предмет и его зеркальное отражение (примеры фигур с одной плоскостью симметрии: тела млекопитающих, птиц, рыб, насекомых, ветви, древесные листья; в геологии — контуры барханов, складки горных пород и др.; в «кирпичике» — три плоскости симметрии, в кубе — девять, в шаре — бесчисленное множество).

**О с ь с и м м е т р и и**  $L_n$  или  $n$  — прямая линия, вокруг которой несколько раз повторяются равные части симметричной фигуры. Последние расположены так, что после поворота вокруг оси на некоторый угол фигура занимает в пространстве то же положение, которое она занимала и до поворота, т. е. как бы совмещается сама с собой. Число самосовмещений фигуры при повороте вокруг оси на  $360^\circ$  называется порядком оси  $n$ . В геометрии возможны оси симметрии,

---

\* На первом месте — обозначение элемента симметрии, принятое в учебной литературе (О. Браве), на втором — интернациональные обозначения (по К. Герману и Ш. Могену).

порядки которых отвечают целым числам, начиная от единицы и кончая бесконечностью. В кристаллографии в связи с решетчатым строением кристаллических структур возможны лишь оси, где  $n$  равно 1, 2, 3, 4, 6. Для геологических образований такие ограничения неизвестны (кроме систем разрывных нарушений — трещин). Так, например, купола, конусовидные вулканы, кольцевые дайки, штоки и некоторые другие структуры обладают вертикальной осью симметрии бесконечного порядка  $L_\infty - \infty$  (полная их симметрия — симметрия конуса  $L_\infty \infty P - \infty m$ ). Из других осей симметрии в геологии чаще всего встречаются оси второго порядка. Например, симметрия сундучных складок  $L_2 2P - 2mm$  (рис. 2).

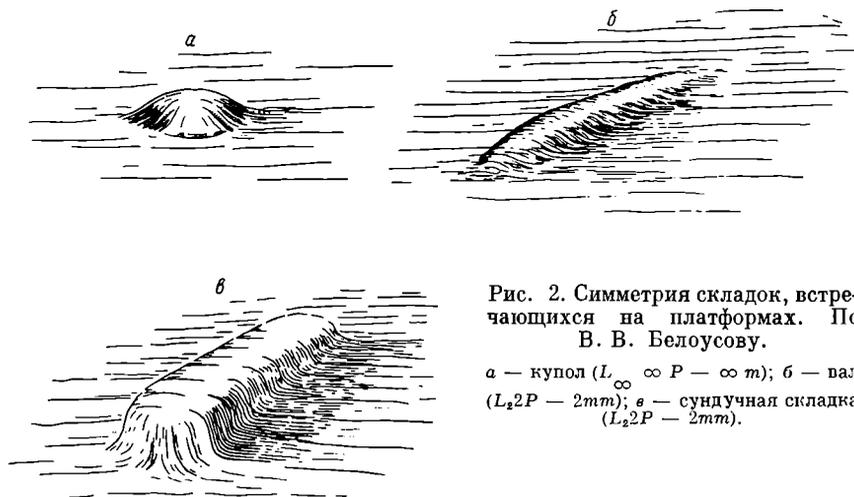


Рис. 2. Симметрия складок, встречающихся на платформах. По В. В. Белоусову.

$a$  — купол ( $L_\infty \infty P - \infty m$ );  $б$  — вал ( $L_2 2P - 2mm$ );  $в$  — сундучная складка ( $L_2 2P - 2mm$ ).

Сложная (инверсионная) ось симметрии  $L_{in}$  или  $\bar{n}$  — прямая, при повороте вокруг которой на определенный угол с последующим отражением в центральной точке фигура совмещается сама с собой. Оказывается, центр инверсии соответствует инверсионной оси 1-го порядка ( $\bar{1}$ ), а плоскость симметрии является инверсионной осью 2-го порядка ( $\bar{2} = m$ ). Учитывая сказанное, можно все элементы симметрии конечных фигур свести к простым и сложным инверсионным осям симметрии, расположив их в виде двух следующих рядов:

$$L_1(1), L_2(2), L_3(3), L_4(4), L_5(5), \dots, L_\infty(\infty);$$

$$L_{i1} = C(\bar{1}), L_{i2} = P(m), L_{i3}(\bar{3}), L_{i4}(\bar{4}), L_{i5}(\bar{5}) \dots$$

Переходя к бесконечно протяженным системам фигур, к перечисленным выше элементам симметрии следует добавить трансляции (параллельные переносы), плоскости скользящего отражения и винтовые оси симметрии.

Действие трансляции состоит в поступательном переносе (сдвиге) фигуры параллельно самой себе (см. рис. 1). После такого переноса одна часть фигуры перейдет на место другой равной ей части, последняя займет место следующей соответствующей части и т. д. Ясно, что совмещение всей фигуры со своим первоначальным положением осуществимо лишь при условии ее бесконечной протяженности (после переноса необходимо, чтобы на место некоторой детали фигуры поступила соответствующая деталь с одной стороны, а первая деталь переместилась на место одинаковой с ней детали с другой стороны и т. д. до бесконечности).

Следовательно, трансляции (переносы, поступания) возможны лишь в бесконечных фигурах. Само собой разумеется, что в пределах земной коры такие фигуры практически не реализуются: чаще всего мы имеем дело как бы с отрезками или обрывками бесконечных систем, полному развитию которых воспрепятствовали природные условия. И все же в рамках таких геологических фрагментов геометрия трансляций проявляется чрезвычайно часто с достаточной определенностью и наглядностью.

Элемент симметрии, соответствующий поступанию, называется осью трансляции или просто трансляцией. Величина наименьшего переноса вдоль такой оси, приводящего фигуру к самосовмещению, именуется периодом трансляции. Понятие о трансляции дает вектор  $T$ , характеризующий направление и величину поступания.

Плоскость скользящего отражения  $P_i$  представляет собой совокупность плоскости симметрии и параллельного ей поступания, действующих не по отдельности, а совместно (рис. 3). Наличие в этом сложном элементе симметрии поступания (трансляции) говорит о том, что он возможен лишь в бесконечных фигурах. Примеры плоскостей скользящего отражения можно найти в первичных линейных и слоистых структурах течения горных пород, т. е. объектах структурной петрологии [48].

Винтовая ось симметрии — совокупность оси симметрии и параллельной ей трансляции, действующих совместно (рис. 4). Трансляция представляет собой винтовую ось 1-го порядка. В кристаллических структурах возможны лишь винтовые оси 1 (трансляция), 2, 3, 4 и 6-го порядков. Для геологических объектов (например, для текстур и структур горных пород, где винтовые оси вполне возможны) таких ограничений нет.

На основе теорем, строго ограничивающих возможности сочетаний элементов симметрии, выводятся их совокупности, соответствующие определенным математическим группам. Для конечных геометрических фигур существует бесконечное и вместе с тем строго ограниченное количество видов конечной симметрии (так называемых «точечных групп»). Все они наглядно распределяются по вертикальным столбцам и горизонтальным строкам и могут быть представлены в виде простых и компактных таблиц (табл. 1 и 2). Для конечных кристаллических форм число видов симметрии ограничивается 32 совокупностями элементов симметрии, лежащими в основе

геометрической кристаллографии (см. с. 110, 111). При переходе к бесконечным фигурам необходимо добавлять совокупности трансляций, а простые оси и плоскости симметрии конечных фигур заменять частично или целиком винтовыми осями и плоскостями скользящего отражения. Именно так, на основе 32 видов конечной кристаллографической симметрии выводятся 230 федоровских пространственных групп, выражающих бесконечную симметрию кристаллических структур. Как будет видно дальше, их можно привлекать на помощь и для симметричной характеристики тектонических и некоторых структур другого генезиса в области структурной геологии.

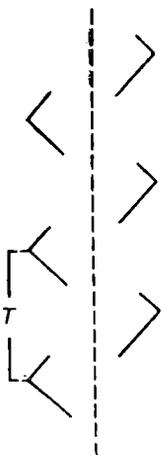


Рис. 3. Плоскость скользящего отражения  $P_t$ .

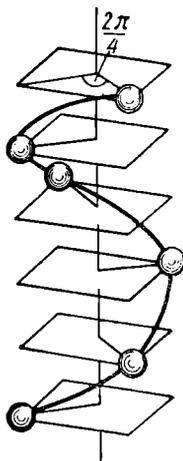


Рис. 4. Четверная винтовая ось симметрии  $L_{44} - 4_1$ .

В мире геологических структур на первое место из числа всех перечисленных выше элементов симметрии явно выступают трансляции (т. е. параллельные переносы).

Обратимся к рис. 1, на котором изображены вытянутые в одном направлении плоские узоры некоторых геологических структурных форм. Эти узоры удобно рассматривать как обрывки «бордюров», которые можно мысленно продолжать до бесконечности как вправо, так и влево. Симметрия бордюров — фигур, бесконечно повторяющихся или вытянутых вдоль одной прямой, — хорошо известна [162, с. 63—67; 167, с. 73—85]. Для всех узоров на рис. 1 мы прежде всего обнаруживаем ось переносов или трансляцию — вектор, сдвигающий узор вправо или влево на отрезок, равный промежутку между соответственными точками повторяющихся равных деталей узора, по направлению прямой, проходящей через центры этих деталей. При условии бесконечности узора при таком сдвиге он совместится сам с собой. Ясно, что трансляции играют первостепенную роль в изображенных структурах. Однако помимо трансляций здесь присутствуют и другие элементы симметрии: плоскости симметрии,

КЛАССЫ СИММЕТРИИ С НЕПОВТОРЯЮЩЕЙСЯ ОСЬЮ  $L_n (n)$

ТАБЛИЦА 1

Примитивные	Центральные	Плавающие	Аксиальные	Плاناксиальные	Инверсионно-примитивные	Инверсионно-плавающие
$L_n (n)$	$L_{2n}C\Pi$ или $L_{2n+1}C = L_{i2n+1}(2n/m)$ или $2n+1$	$L_{nn}P (2n \cdot mm)$ или $2n+1 \cdot m$	$L_{nn}L_2 (2n \cdot 22)$ или $2n+1 \cdot 2$	$L_{2n}2nL_22nP\Pi C$ или $L_{2n+1}(2n+1)PC (2n/mmm)$ или $2n+1 \cdot m$	$L_{i_n}(\bar{n})$	$L_{i2n+1}(2n+1)L_2 \times (2n+1)PC$ или $L_{i2n} \cdot nL_2nP (\bar{2n+1} \cdot m)$ или $\bar{2n} \cdot 2 \cdot m$
$L_1 = -(\bar{1})$	$L_1C = C (\bar{1})$	$L_11P = P (m)$	$[L_11L_2 = L_2 (2)]$	$[L_11L_21PC = L_2PC (2/m)]$	$[L_{i1} = C (\bar{1})]$	$[L_{i1}L_2\Pi = L_2\Pi C (2/m)]$
$L_2 (2)$	$L_2C\Pi (2/m)$	$L_22P (2mm)$	$L_22L_2 = 3L_2 (222)$	$L_22L_22P\Pi C = 3L_23PC (mmm)$	$[L_{i2} = P (m)]$	$[L_{i2}L_2P = L_22P (2mm)]$
$L_3 (3)$	$L_3C = L_{i3}(\bar{3})$	$L_33P (3m)$	$L_33L_2 (32)$	$L_3(L_{i3})3L_23PC (\bar{3}m)$	$[L_{i3} = L_3C (\bar{3})]$	$[L_{i3}3L_23PC (\bar{3}m)]$
$L_4 (4)$	$L_4C\Pi (4/m)$	$L_44P (4mm)$	$L_44L_2 (422)$	$L_44L_24P\Pi C (4/mmm)$	$L_{i4}(\bar{4})$	$L_{i4}2L_22P (\bar{4}2m)$
$L_5 (5)$	$L_5C - L_{i5}(\bar{5})$	$L_55P (5m)$	$L_55L_2 (52)$	$L_5(L_{i5})5L_25PC (\bar{5}m)$	$[L_{i5} = L_5C (\bar{5})]$	$[L_{i5}5L_25PC (\bar{5}m)]$
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
$L_\infty (\infty)$	$L_\infty C\Pi (\infty/m)$	$L_\infty \infty P (\infty \cdot mm)$	$L_\infty \infty L_2 (\infty 22)$	$L_\infty \infty L_2 \infty P\Pi C (\infty/mmm)$	$[L_{i_\infty} = L_\infty \Pi C (\infty/m)]$	$[L_\infty \infty L_2 \infty P\Pi C (\infty/mmm)]$

двойные оси и плоскости скользящего отражения. На рис. 5 изображены проекции видов симметрии бордюров [162, 167], в подписи указано, к каким именно видам симметрии бордюров принадлежат узоры геологических структур на рис. 1. В системах типа бордюров основную роль играла трансляция, направленная вдоль вытянутости узора.

ТАБЛИЦА 2

КЛАССЫ СИММЕТРИИ С СИММЕТРИЧНО РАВНЫМИ ОСЯМИ

$4L_33L_2$ (23) $4L_33L_2$ ( $3L_4$ ) $6P$ ( $\bar{4}3m$ ) $4L_33L_23PC$ ( $m\bar{3}$ )	$3L_44L_36L_2$ (432) $3L_44L_36L_29PC$ ( $m3m$ )
$6L_510L_315L_2$ (532) $6L_510L_315L_215PC$ ( $53m$ )	$\infty L_\infty$ ( $\infty/\infty$ ) $\infty L_\infty \infty PC$ ( $\infty/\infty m$ )

Перейдем к совокупностям трансляций, действующих в пределах одной плоскости. Сложение двух трансляций, направленных под углом, соответствует сложению двух соответственных векторов (по правилу параллелограмма). Оказывается, все известные примеры симметричных систем трещин (разрывных нарушений) совпадают с пятью типами плоских сеток О. Браве, характеризующих возможные группы трансляций на плоскости (рис. 6). Это совпадение необходимо иметь в виду: геометрия и симметрия плоских кристаллографических сеток могут быть с успехом использованы для изучения трещинных структур в геологии.

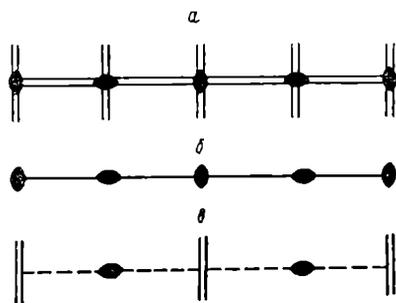


Рис. 5. Симметрия бордюров, характеризующая геологические структуры на рис. 1.

*a* —  $T \cdot L_2 2P - T \cdot 2mm$  (см. рис. 1, а, б);  
*б* —  $T \cdot L_2 - T \cdot 2$  (см. рис. 1, в — е);  
*в* —  $T \cdot L_2 P_1 P - T \cdot 2am$  (см. рис. 1, ж).

О. Браве), характеризующих семь кристаллографических сингоний (рис. 7). Именно такими формами могут обладать блоки пород, ограниченные трещинами отдельности (кристаллографическими аналогами и своеобразными моделями подобных блоков могут отчасти служить спайные осколки кристаллов). Как видим, кристаллографическая геометрия и симметрия плоских сеток и параллелепипедальных систем полностью приложима к системам трещинных структур в геологии и дает возможность охарактеризовать их симметрию.

До сих пор речь шла лишь о трансляциях. Однако в симметричные характеристики блоков отдельностей входят и уже упоминавшиеся выше элементы конечной симметрии, подчиненные тем же ограничениям, связанным с решетчатой геометрией (здесь могут существовать лишь оси 1, 2, 3, 4 и 6-го порядков; сказанное относится и к простым, и к инверсионным, и к винтовым осям симметрии).

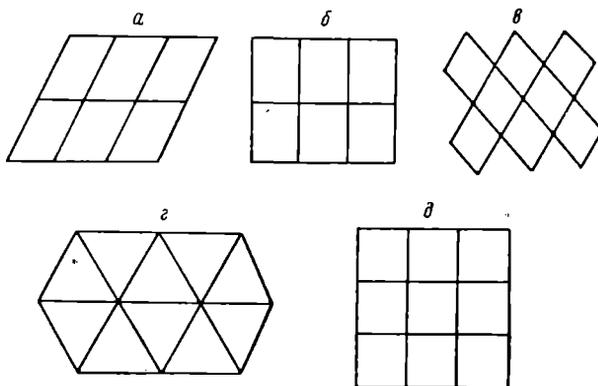


Рис. 6. Пять типов плоских сеток, характеризующих возможные группы трансляций на плоскости.

*a* — косоугольная; *b* — прямоугольная; *c* — ромбическая; *d* — гексагональная; *e* — квадратная.

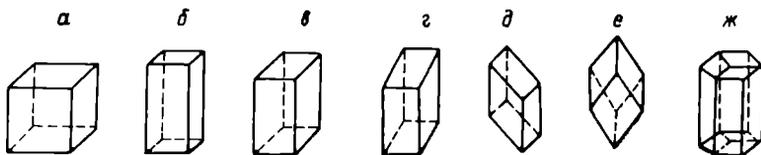


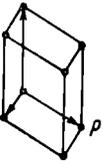
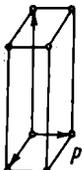
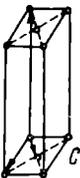
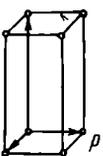
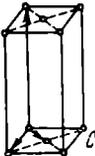
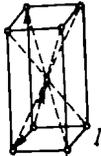
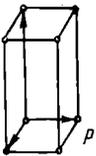
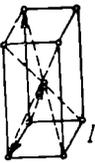
Рис. 7. Формы и симметрия элементарных ячеек для решеток различных сингоний.

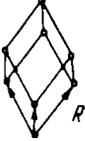
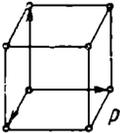
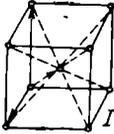
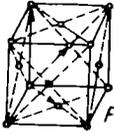
*a* — кубическая,  $3L_44L_26L_29PC - m\bar{3}m$ ; *b* — тетрагональная,  $L_44L_24PC - 4/m\bar{2}m$ ; *c* — ромбическая,  $3L_23PC - m\bar{2}m$ ; *d* — моноклиная,  $L_2PC - 2/m$ ; *e* — триклинная,  $C - \bar{1}$ ; *f* — ромбоэдрическая,  $L_33L_23PC - \bar{3}m$ ; *ж* — гексагональная,  $L_66L_26PC - 6/m\bar{2}m$ .

В подписи к рис. 7 указаны элементы конечной симметрии, характеризующие формы кристаллографических элементарных ячеек, в вместе с тем и блоки отдельности горных пород. Для перехода к бесконечной симметрии всей системы трещин или блоков к формуле конечной симметрии следует добавить букву соответствующей совокупности трансляций, т. е. решетки О. Браве.

Различают примитивные *P*, центробазисные *C*, объемцентрированные *I*, центрогранные *F*, ромбоэдрические *R* и гексагональные *H* решетки (табл. 3). Кроме того, надо учесть наличие винтовых осей симметрии и плоскостей скользящего отражения.

## ЯЧЕЙКИ ЧЕТЫРНАДЦАТИ РЕШЕТОК О. БРАВЕ

Сингония	Примитивная	Базоцентри- рованная	Объемоцентри- рованная	Гранецентри- рованная
Триклинная				
Моноклиная				
Ромбическая				
Тетрагональ- ная				

Сингония	Примитивная	Базоцентри- рованная	Объемцентри- рованная	Гранецентри- рованная
Тригональная (ромбоэдри- ческая)				
Гексагональ- ная				
Кубическая				

В отличие от федоровских пространственных групп, характеризующих симметрию бесконечных систем дискретного решетчатого характера, А. В. Шубниковым были выведены пространственные группы, отвечающие симметрии непрерывных и частично прерывных

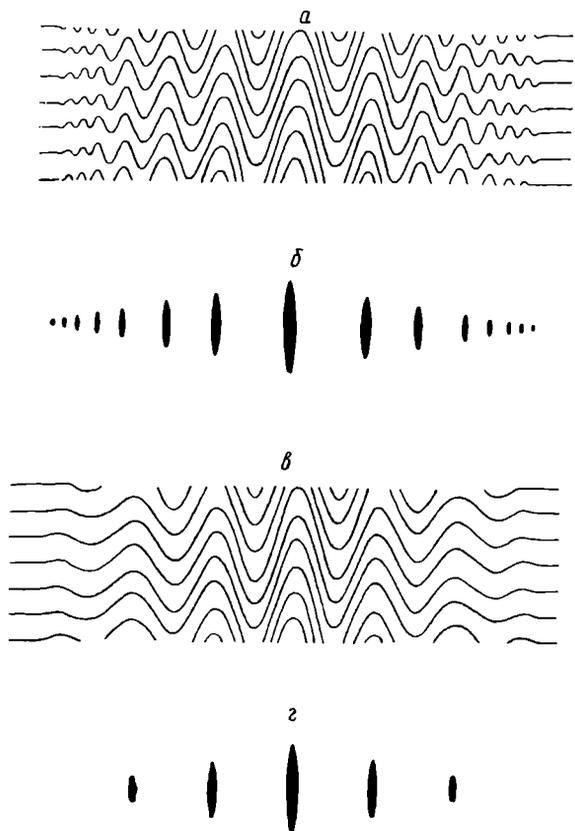


Рис. 8. Проявления симметрии подобия в складчатых (а) и разрывных (б) структурах. Периодическое распределение затухающих складчатых (в) и разрывных (г) структур без соблюдения условий подобия.

однородных трехмерных пространств — континуумов и семиконтинуумов [161, 163, 169, 190]. Ими можно воспользоваться с успехом при описании геологических структур и горных пород, состоящих из ориентированных игольчатых и пластинчатых кристалликов [140].

Пока мы ограничивались лишь элементами классической симметрии, требующей обязательного равенства повторяющихся частей симметричной фигуры. Вместе с тем геологам хорошо знакомы случаи

постепенного увеличения или уменьшения (затухания) соответствующих деталей структур. Здесь приходится принимать во внимание элементы симметрии подобия А. В. Шубникова [166]. Операции подобия связаны с одновременным увеличением или уменьшением масштаба подобных частей фигуры и расстояний между ними (рис. 8). Они характеризуются соответствующими элементами симметрии подобия.

При описании выпуклых и вогнутых участков земной поверхности иногда следует прибегать к учению об антисимметрии, также созданному А. В. Шубниковым. «Подобно тому, как правая рука равна левой, — пишет А. В. Шубников, — так по нашему предположению, положительная фигура может

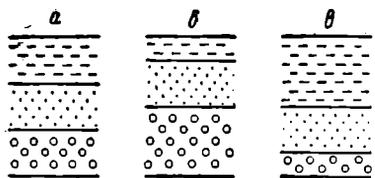


Рис. 9. Циклы осадочных толщ — примеры трехцветных трансляций (*a* — простая, *b*, *в* — трехцветные трансляции симметрии подобия).

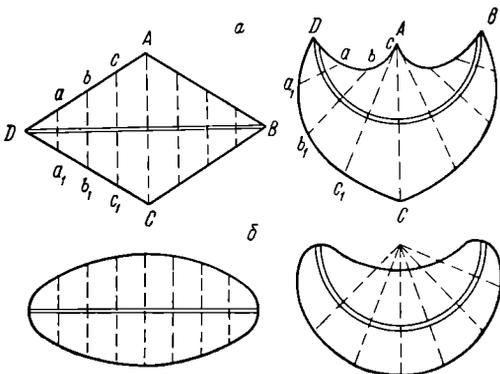


Рис. 10. Искривление контуров ромба (*a*) и эллипса (*б*) в результате их отражения в сферической или цилиндрической поверхности. По Д. В. Наливкину.

быть равна отрицательной. Этот вид равенства назовем противоположным равенством, или антиравенством» [164, с. 7].

В качестве примеров наиболее простых антиравных фигур, существующих в геологии, назовем выпуклый конус (вулкан) и конусообразную воронку (жерло вулкана), антиклиналь и синклиналь и др. Как элементы антисимметрии выступают простые и сложные антиоси. Для изображения равных и антиравных частей фигур А. В. Шубников использует черную и белую окраску. Тем самым моделями антисимметричных тел могут служить двухцветные (черно-белые) фигуры. Как будет показано далее, при характеристике циклов осадочных и вулканогенных толщ удобно пользоваться понятиями многоцветной симметрии [7, 167] (рис. 9).

Наконец, известны случаи с появлением изогнутых трансляций, осей и плоскостей симметрии. Здесь приходят на помощь понятия о криволинейной симметрии, открытой акад. Д. В. Наливкиным, впервые отметившим на палеонтологическом материале замену элементов классической симметрии их криволинейными аналогами [81, 82] (рис. 10). Ряд характерных примеров проявления симметрии подобия и криволинейной симметрии в геологии приводится далее.

Новые горизонты в учении о симметрии открылись после появления работ В. И. Михеева по гомологии кристаллов [77]. Помимо обычных элементов симметрии здесь выдвигаются плоскости, оси и инверсионные оси гомологичности, связанные с однородными деформациями — сдвигами и растяжениями (рис. 11).

Плоскость гомологичности представляет собой плоскость косо́го отражения. Ось гомологичности отвечает прямой, посредством которой производится косо́й круговой или эллипсоидальный поворот. Таким образом, элементы симметрии отвечают частным случаям элементов гомологичности, а сама симметрия является лишь частным случаем гомологии. Нет сомнения

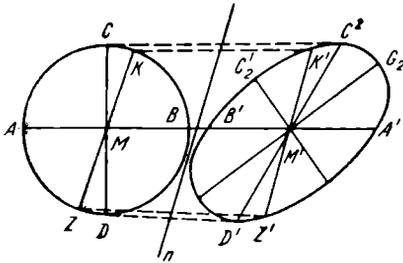


Рис. 11. Круг, переходящий в эллипс при отражении в плоскости гомологии. По В. И. Михееву.

в том, что и эти новые представления найдут свое реальное воплощение в геологии. В частности, криволинейная симметрия Д. В. Наливкина рассматривалась В. И. Михеевым как одна из глав, входящих в гомологию [76].

К новым понятиям следует отнести и явления природной динамической симметрии, проявления которой неразрывно связаны с универсальным принципом симметрии — диссимметрии Пьера Кюри

(1894 г.). Этот принцип особенно важен для нас, так как связывает воедино внешнюю симметрию формирующей природной среды с внутренней (собственной) симметрией формирующегося в ней объекта.

Три четверти века тому назад П. Кюри опубликовал статью «О симметрии в физических явлениях» [66, 175]. В ней впервые были сформулированы следующие положения, носящие ныне обобщающее название универсального принципа симметрии П. Кюри: «Характеристическая симметрия некоторого явления есть максимальная симметрия, совместимая с существованием явления. Явление может существовать в среде, обладающей своей характеристической симметрией или симметрией одной из подгрупп его характеристической симметрии. Иными словами, некоторые элементы симметрии могут сосуществовать с некоторыми явлениями, но это не обязательно. Необходимо, чтобы некоторые элементы симметрии отсутствовали. Это и есть та диссимметрия, которая создает явления» [66, с. 95]. Далее следует: «...при наложении нескольких явлений различной природы в одной и той же системе их диссимметрии складываются. Элементами симметрии системы остаются только те, которые являются общими для каждого явления, взятого отдельно. Когда некоторые причины производят некоторое действие, элементы симметрии причин должны обнаруживаться в этих произведенных действиях. Когда некоторые действия проявляют некоторую диссимметрию, то эта диссимметрия должна обнаруживаться и в причинах их порождающих» [66, с. 102]. Под диссимметрией П. Кюри подразумевал, как

видим, отсутствие некоторых элементов симметрии, т. е. пониженную симметрию.

П. Кюри трагически погиб в 1904 г. Несколько предельно сжатых формулировок в вышеназванной статье — вот и все, что успел написать он сам о своем принципе. Естественно, это затрудняло понимание новых идей и привело к тому, что принцип П. Кюри длительное время не входил в сознание ученых. Не случайно М. Кюри в написанной ею в 1923 г. биографии мужа заново подняла вопрос об этом принципе, популяризируя и комментируя его. По ее словам, П. Кюри «был принужден дополнить и расширить понятие симметрии, рассматривая ее как состояние пространства, характерное для среды, где происходит данное явление» [65]. Для этого необходимо учитывать: 1) состояние и строение среды; 2) движения изучаемого тела относительно формирующей его среды или движения среды относительно данного тела; 3) воздействие на тело других физических факторов. По сути дела, все эти требования сводятся к положению, хорошо известному натуралистам: глубокое проникновение в сущность какого-либо природного объекта невозможно без учета особенностей породившей его среды.

В русской научной литературе на принцип П. Кюри обратили особое внимание В. И. Вернадский [16] и А. В. Шубников [165]. С неоднократными публикациями о применении этого принципа в области геолого-минералогических наук выступал и один из авторов этой книги [142, 146, 149].

Пользуясь случаем, попытаемся еще раз в совсем простой и краткой форме дать понятие о выводах из универсального принципа, применимых к формированию природных тел вообще и геолого-минералогических объектов, в частности.

Основываясь на принципе П. Кюри, можно выделить три следующих случая наложения симметрии среды на симметрию формирующегося в ней тела: 1) все элементы собственной симметрии тела совпадают с элементами симметрии среды; 2) элементы собственной симметрии тела лишь частично совпадают с элементами симметрии среды; 3) ни один из элементов собственной симметрии тела не совпадает с элементами симметрии среды. Зная симметрию среды и собственную симметрию тела, можно всегда определить вынужденную симметрию последнего. Перечисленные три случая охватывают все возможные случаи формирования природных тел.

В первом случае все элементы собственной симметрии тела сохраняются, а его формы получают идеальное развитие. Это явление полнее всего реализуется в средах с симметрией шара  $\infty L_{\infty} \infty PC \infty / \infty m$ ). Именно так возникают формы идеально образованных кристаллов или организмов (радиолярий и др.), развивающихся во взвешенном состоянии при условии всестороннего и равномерного питания. Таким же образом возникают и шаровые конкреции в рыхлой (глинистой) однородной среде. При резко преобладающем влиянии среды последняя полностью отпечатывает свою симметрию на подчиненном ей объекте. Напомним в качестве относящихся сюда примеров

округлые формы растворяющихся кристаллов и шаровые фигуры некоторых организмов. Следует иметь в виду, что тела могут сохранять всю свою симметрию и в таких средах, симметрия которых всецело совпадает с их собственной симметрией или содержит их симметрию как подгруппу.

Перейдем далее ко второму случаю, когда только часть собственной симметрии тела совпадает с элементами формирующей среды. В результате получаются ложные искаженные формы с вынужденной внешней симметрией, сохраняющей лишь часть элементов собственной симметрии. Такие случаи особенно часто осуществляются в поле земного тяготения, симметрия которой в любой точке земного шара характеризуется симметрией конуса  $L_\infty \infty P - \infty m$ . Все то, что развивается вертикально в такой среде в результате сохранения лишь тех элементов симметрии, которые совпадают с элементами симметрии конуса, получает вынужденную симметрию  $L_n n P - n m$  (или  $L_n, P, -$ ). Такова симметрия конусовидных вулканических гор, алмазных трубок, кристаллов, в которых главная ось симметрии совпадает с осью  $L_\infty$  среды, сталагмитов, а в мире растений — деревьев, цветов с чашечкой, обращенной вверх, и т. д. Все то, что развивается (растет или передвигается) косо или горизонтально, сохраняет лишь единственную плоскость симметрии  $P(m)$ , совпадающую с одной из бесчисленных плоскостей симметрии конуса поля тяготения. Сюда относятся геологические складки, детали горных хребтов, кристаллы с наклонной или горизонтальной главной осью, а в растительном мире — ветви, листья, цветы, растущие сбоку стебля, и др. Такой же симметрией обладают и все те живые существа, которые двигаются направленно по земной поверхности.

В третьем случае собственная симметрия тела вовсе не согласуется с симметрией среды. Ясно, что здесь получают асимметричные фигуры, более или менее приближающиеся к ложным формам второго случая в зависимости от степени отклонения элементов собственной симметрии от элементов симметрии среды.

Приведенная выше последовательность трех возможных случаев сочетания элементов среды с элементами симметрии тела согласуется и с общим ходом эволюции природных форм.

Первичные формы, развивавшиеся во взвешенном состоянии внутри однородной среды, обладают более высокой симметрией вплоть до симметрии шара. Далее появляются формы, прикрепленные к земле и получившие в связи с этим симметрию типа  $L_n n P - n m$ . Еще дальше возникают формы существ,двигающихся в определенном направлении и сохранивших единственную плоскость симметрии  $P(m)$ . Однако дело не ограничивается этой схемой. Для движущихся тел или сред исчезающие элементы симметрии не уничтожаются бесследно, а переходят в элементы криволинейной симметрии или симметрии подобия. Поясним вышесказанное конкретными примерами.

Рис. 10 показывает искривление контуров ромба и эллипса в результате замены одной из двух плоскостей симметрии изогнутой — сферической или цилиндрической — поверхностью (последняя проек-

тируется в виде круговой дуги, показанной на рис. 10 двойной линией). Эти изменения контуров напоминают эволюцию форм некоторых брахиопод (понижение симметрии от  $L_2 2P - 2mm$  к  $P - m$  и возникновение криволинейной «поверхности симметрии» на месте одной из двух плоскостей симметрии, перпендикулярной направлению движения животного). Очень близки к тем же криволинейным производным ромба и эллипса контуры форм подвижного песка (барханов). Г. А. Дмитриев и М. С. Потапова, исходя из принципа П. Кюри, дали следующее истолкование формы бархана: «Эта форма образуется из комбинации гравитационного конуса, деформированного направленным действием ветра и половиной конуса, который образуется, благодаря торможению препятствием» [41]. Как видим, форма движущегося бархана обладает одной плоскостью симметрии, совпадающей с направлением движения ( $P - m$ ). Однако к этой плоскости следует еще добавить и хорошо выраженную поперечную криволинейную поверхность симметрии (рис. 10, б).

Итак, первоначальные плоскости симметрии при переходе бархана из неподвижного состояния в движущееся не исчезают бесследно, а переходят в криволинейные поверхности. Можно привести множество других весьма характерных примеров, показывающих трансформацию элементов классической симметрии в элементы криволинейной симметрии, симметрии подобия и др.

Учитывая сугубо динамический характер принципа П. Кюри, уместно ввести специальное понятие о природной динамической симметрии. Последняя должна характеризовать переходы от одной симметрии к другой (включая сюда как переходы от одного вида классической симметрии к другому виду классической же симметрии, так и переходы от классической симметрии к неклассической и наоборот). Переходы эти вызываются прежде всего различием симметрий формирующегося тела и формирующей его среды. Согласно П. Кюри, из собственных элементов симметрии данного тела сохраняются только те, которые совпадают с элементами симметрии среды. Исчезнувшие элементы классической симметрии тела составляют его диссимметрию. Однако, как мы только что узнали, они не уничтожаются, а переходят в элементы криволинейной симметрии или симметрии подобия. Эти переходные элементы симметрии и являются собственно элементами динамической симметрии.

Резюмируя вышеизложенное, можно высказать положение о «законе сохранения элементов симметрии» в расширенном понятии, т. е. с учетом переходов классической симметрии в гомологию, криволинейную симметрию и симметрию подобия [87, 146]. При этом особенно важно проследить поведение элементов динамической симметрии с их трансформациями.

Огромное значение учета природной динамической симметрии особенно наглядно выявляется на уже упомянутой выше эволюции симметрии форм и прежде всего форм органического мира. Сначала имеем симметрию шара в трехмерном пространстве  $\infty L_\infty \infty PC - \infty / \infty m$  (простейшие формы, развивавшиеся во взвешенном состоянии

в однородной среде). Далее появляется симметрия проекции шара на двумерную плоскость, т. е. симметрия круга или, что то же, симметрия конуса  $L_\infty \infty P - \infty m$  (неподвижные формы, прикрепленные к земле). Еще далее возникает симметрия проекции круга на одномерную прямую, т. е. симметрия  $P - m$  (формы,двигающиеся прямолинейно).

Итак, эволюция формирующей симметрии может быть представлена в виде

$$\infty L_\infty \infty PC \rightarrow L_\infty \infty P \rightarrow P.$$

Обозначая элементы криволинейной симметрии (гомологии) соответственно буквами со штрихами, можно изобразить часть предыдущей схемы в уточненном и развернутом виде

$$L_n n P \rightarrow L'_n P (n - 1) P'.$$

Зная динамику симметрии, мы сможем в каждом последующем этапе развития выявить возникающие вместо исчезнувших элементов классической симметрии элементы гомологии, криволинейной симметрии, симметрии подобия, поведение и характер которых дают понятие о деталях протекающей эволюции.

До сих пор говорилось лишь об элементах симметрии и их сочетаниях, т. е. об общих закономерностях повторяемости фигур и их частей. В кристаллографии, как известно, этим дело не ограничивается, а, исходя из тех же законов симметрии, выводятся формы кристаллических фигур. Напомним, что простыми гранными формами называются совокупности граней, связанных друг с другом элементами симметрии. По-видимому, в некоторых случаях целесообразно воспользоваться этими понятиями геометрической кристаллографии и применить их для характеристики геологических объектов.

В качестве примера рассмотрим простейшие формы блоков пород, изображенные на рис. 7. Вспомнив памятные со студенческих лет кристаллографические модели простых форм и их комбинаций, мы без труда найдем и здесь пинакоиды, различные призмы и кубы (см. гл. 6). Конусообразную форму вулкана можно уподобить  $n$ -гональной пирамиде, а горные хребты — комбинациям диэдров.

Нам могут возразить, что приведенные здесь и далее примеры являются сугубо идеализированными. Однако вспомним, что и кристаллографические модели являются обобщенными идеализациями реальных форм. Идеализация с помощью статистических данных широко используется кристаллографами. Очевидно, аналогичные приемы могут быть рекомендованы и для геометризации геологических объектов.

Возникает вопрос: почему геометрические закономерности в распределении структурных форм сравнительно редко отмечались до сих пор в геологической литературе.

По-видимому, имеется ряд причин, затрудняющих их выявление. Выше уже говорилось о необходимости обобщать и статистически идеализировать такие явления. Неоднородность строения геологи-

ческих тел и их масштабы затрудняют подобные исследования. Следует иметь в виду также и то, что зачастую мы имеем дело со случайными срезами, неблагоприятными для выявления закономерностей симметрии. Кроме того, сами закономерности симметрии могут быть достаточно сложными (например, в случае наличия плоскостей скользящего отражения или винтовых осей) и не бросаются в глаза при случайном взгляде на случайный срез структуры. Наконец, играют роль и некоторая сложность понятийного аппарата симметрии и недостаточная устремленность геологов пользоваться им.

Вместе с тем еще и еще раз следует подчеркнуть, что симметрия геологических образований подчиняется в общем тем же законам симметрии, которые хорошо известны в геометрии и кристаллографии. Анализ сетчатых систем трещин с особой убедительностью иллюстрирует сказанное. Во всех разобранных выше примерах не встречалось ни одного элемента симметрии и ни одной их совокупности, которые не были бы известны кристаллографам (оси бесконечного порядка, невозможные для кристаллических полиэдров, широко используются при характеристике оптических индикатрис). Пространственные группы Е. С. Федорова, сетки и решетки О. Браве, симметрия лент, бордюров и стержней [167] — все это широко реализуется в геологических структурах.

Геологам, изучавшим в студенческие годы кристаллографию, легко вспомнить ее основные понятия и применить их к своим объектам исследования. Можно даже отметить наиболее часто встречающиеся в геологии элементы симметрии: трансляции, плоскости симметрии и оси второго и бесконечного порядков.

В заключение отметим, что применение законов и методики симметрии к исследованию тектонических и других геологических структур может помочь выявлению и систематизации закономерностей размещения этих структур. Оно облегчит также понимание физической природы выявленных закономерностей и механизма формирования структур, т. е., в конечном счете, теоретическое истолкование структурного материала.

Наблюдающиеся проявления симметрии тектонических структур наглядно свидетельствуют о наличии весьма общих закономерностей организации (структурирования) вещества, отраженных в самых разнообразных проявлениях природной симметрии: от симметрии свойств элементарных частиц до симметрии строения живых организмов и от симметрии кристаллических структур до симметрии геологических образований.

Выявление симметрии размещения и внутреннего строения тектонических структур и других геологических образований, контролирующего размещение полезных ископаемых, помимо теоретического интереса, имеет и огромное прикладное значение и поэтому должно считаться одной из первоочередных задач геологической науки на современном этапе ее развития.

---

## КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ О СИММЕТРИИ В ГЕОЛОГИИ

Сложность, разнообразие и огромное различие в масштабах геологических образований чрезвычайно затрудняют задачу дать хотя бы самый беглый планомерный обзор литературы о симметрии в геологии. Прежде всего приведем цитату из недавно опубликованной обобщающей монографии, наглядно иллюстрирующей грандиозный размах в объектах современных геологических исследований: «Объектами геологии традиционно считались, а нередко и сейчас считаются, только минералы, горные породы и заключенные в последних ископаемые остатки животных и растений. В последние десятилетия, кроме минералов и горных пород, геологи в сферу своих исследований включили изотопы, химические элементы, геологические формации и земные оболочки. На современном научном языке это означает, что геологи своими исследованиями, с одной стороны, охватили ядерный и химический уровни организации вещества земной коры, а с другой — перешли к изучению, кроме уже известного естествознанию минерального уровня и уровня горных пород, еще двух: формационного уровня и уровня оболочек планеты» [46, с. 73].

Итак, казалось бы, в наш обзор следует включить рассмотрение широчайшего круга симметричных понятий, начиная от строения атома и кончая глобальной симметрией. Здесь, однако, сразу же обнаруживается возможность значительно ограничить эту задачу. В самом деле, симметрия ядерной и химической природы детально рассматривается в специальной физико-химической литературе. Симметрия окристаллизованных минералов изучается в курсах кристаллографии и минералогии. Как было показано выше, найденные на этом материале закономерности легли в основу общего учения о симметрии, широко используемого на протяжении всей нашей книги (кроме того, в гл. 6 отдельно рассматривается симметрия природных кристаллов). Нет надобности останавливаться отдельно и на палеонтологических объектах, которым посвящена обильная литература. Сугубо обобщенная эволюция симметрии органического мира также была бегло обрисована выше.

Значительно беднее публикации, касающиеся симметрии всего земного шара, земных оболочек, геологических формаций и горных пород. На них мы преимущественно и сосредоточим наше внимание.

Первые попытки дать схематизированные и идеализированные геометрические модели как всей Земли в целом, так и отдельных геологических объектов относятся к глубокой древности. Существенно отметить, что в них уже видно стремление связать в единую гармоническую систему всю Землю и даже всю Вселенную с мельчайшими слагающими их частицами («атомами» или «семенами»). Здесь достаточно напомнить хотя бы о космогонической геометрии Платона (427—347 гг. до н. э.), базирующейся на пяти высокосимметричных выпуклых полиэдрах, грани которых являются правильными многоугольниками. Это так называемые «тела Платона» (рис. 12). «Семенам» четырех стихий — огня, воздуха, воды, земли — Платон приписал

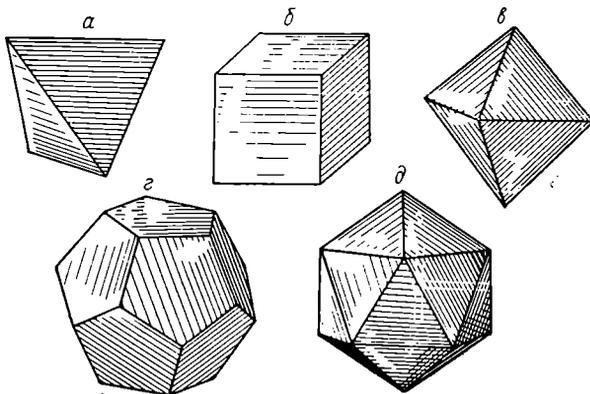


Рис. 12. Тела Платона и их симметрия.

*а* — тетраэдр,  $3L_4 4L_3 6P - \bar{4}3m$ ; *б* — куб,  $3L_4 4L_2 6L_2 9PC - m\bar{3}m$ ; *в* — октаэдр, как у куба; *г* — додекаэдр,  $6L_5 10L_3 15L_2 15PC - 5\bar{3}m$ ; *д* — икосаэдр, как у додекаэдра.

соответственно формы тетраэдра, октаэдра, икосаэдра, куба. Оставшийся неиспользованным пятый полиэдр — додекаэдр — соответствует по его домыслам очертанию Вселенной. Фантастические построения Платона давно отошли в область истории, однако выделенные им пять идеальных полиэдров будут неоднократно встречаться и в дальнейшем.

Первым шагом на пути к созданию глобальной симметрии нашей планеты следует, очевидно, считать наблюдения Аристотеля (384—322 до н. э.), свидетельствовавшие о шарообразности Земли. Здесь нет надобности напоминать о хорошо известных последующих этапах развития теории фигуры Земли, связанных с именами И. Ньютона, А. Клеро и других вплоть до современных исследователей. Отметим лишь, что уточнение понятий о форме геоида вело к постепенному снижению соответственной симметрии: от шаровой к симметрии эллипсоида вращения, трехосного эллипсоида и т. д. (вопрос о глобальной симметрии геоида рассматривается в следующей главе).

Вкратце упомянем о нескольких попытках сопоставления фигуры геоида с правильными геометрическими многогранниками.

В 1829 г. Эли де Бомон высказал идею о том, что земной шар при охлаждении и затвердевании приобретает форму икосаэдра (двадцатигранника с гранями в виде правильных треугольников). Двадцать граней последнего представляют наиболее устойчивые области земной коры. Тридцать ребер совпадают с важнейшими горными хребтами и соответствуют менее устойчивым участкам, подвергающимся смятию и изломам. Последние достигают максимума в двенадцати вершинах икосаэдра, в каждой из которых сходится пять ребер [23, с. 216—217].

В 1875 г. Л. Грин высказал гипотезу о тетраэдрическом строении Земли. К нему в 1882 г. примкнул А. Лаппаран. Он исходил из положения, согласно которому сфера соответствует телу, заключающему наибольший объем под наименьшей поверхностью, тетраэдр же, наоборот, при данном объеме имеет наибольшую поверхностную площадь. Поэтому тетраэдр является той формой, «к которой тяготеет земная кора при деформации» [71, с. 113]. О легкой тетраэдрической деформации геоида писал и Ш. Лаллеман, считавший тетраэдр той формой, «которая представляет земной коре возможность минимума сокращения» [71]. Четырьмя вершинами этого тетраэдра, по Ш. Лаллеману, являются Альпы в Европе, Гималаи в Азии, Скалистые горы в Северной Америке и Южный полюс.

Самой собой разумеется, что сопоставляя форму геоида с икосаэдром или тетраэдром, авторы мысленно приписывали ему и соответственную симметрию. Как известно, симметрия икосаэдра  $6L_5 10L_3 15L_2 15PC$  ( $53m$ ), симметрия правильного (кубического) тетраэдра  $3Li_4 4L_3 6P$  ( $43m$ ). Одна из четырех тройных осей тетраэдра, по А. Лаппарану и Ш. Лаллеману, совпадает с осью вращения земного шара. Гипотезы Эли де Бомона, Л. Грина и других представляют сейчас в основном исторический интерес. В следующей главе мы рассмотрим понятия о симметрии геоида в современном землеведении.

От широких обобщений глобальной симметрии перейдем к вопросу о закономерностях рельефа земной поверхности. Именно эти закономерности позволяют существенно уточнять понятия о симметрии геоида.

Уже в XVII столетии А. Кирхер отмечал геометричность расположения гор на земном шаре, выделяя две основные по направлению группы важнейших горных хребтов: широтные и долготные. Это старинное обобщение заново воскресил в середине прошлого столетия А. Гумбольдт. В наше время оно было высоко оценено акад. В. А. Обручевым и проф. Б. Л. Личковым [71, с. 58—59; 84]. В известной мере теория А. Кирхера является ранней предшественницей современной теории о критических параллелях и меридианах [69, с. 54—87], к которым мы вернемся в следующей главе.

В широчайших обобщениях М. В. Ломоносова, касающихся неразрывной связи между положительными и отрицательными элементами рельефа земной поверхности, говорится: «Ибо, когда рождаются горы, должны купно происходить и долины, и напротив того, долин

происхождение есть горам рождение. Разность, что в первом случае горы окружаются долинами, во втором — долины горами» [73, с. 584]. К приведенной цитате вполне уместно добавить уже упоминавшиеся выше новейшие понятия об антиравенстве и антиравных фигурах, введенных в науку А. В. Шубниковым.

Прочитируем далее М. В. Ломоносова, где он поясняет происхождение гор и связанных с ними впадин: «Когда в твердую материю, наподобие доски плотную, каковы суть зеркальные и оконечные стекла, лед, каменные плиты и другие, сим подобные, удар воспоследует, то по большей части бывает, что щели от места ударенного, как от центра лучи, в стороны проскакивают, хотя не совсем и прямо, но разными фигурами и нагибами, что с механическими правилами согласно. Подобным образом, когда ровная поверхность дна морского поднималась, тогда от центра действующей силы и от поднимающейся выше всех земной части прошли великие щели и стали впадины и долины... Не иначе рассуждать должно и о впадинах... Щели должны от того места расходиться в стороны на вышину гор, включающих такое море или озеро» [73, с. 584—585]. Эта картина, нарисованная великим физиком и геометром, близка современным схемам, демонстрирующим действие универсального принципа симметрии П. Кюри на земной поверхности.

Нам уже известно, что поле земного тяготения в какой-либо точке на земной поверхности характеризуется симметрией конуса  $L_\infty \infty P - \infty m$ . При этом все природные тела, а в том числе и горы (особенно вулканического происхождения) и впадины, развивающиеся по вертикали, получают симметрию конуса или одной из ее подгрупп типа  $L_n n P - n m$ . Именно такая симметрия и наблюдается для радиально-лучистых систем «великих щелей» и трещин, так картинно описанных М. В. Ломоносовым. (В настоящее время П. С. Воронов внес существенное уточнение в законы распределения тектонических трещин на земном шаре. Увеличение и ускорение вращения Земли влечет за собой сплющивание и растягивание земной поверхности вдоль меридианов, что сказывается и на статистической симметрии распределения трещин  $L_2 2P - 2m$  [20, с. 5—6].)

Почетное место среди классиков нашей науки, уделявших пристальное внимание обобщающим геологическим закономерностям, занимает акад. А. П. Карпинский (1846—1936). В своей знаменитой статье «О правильности в очертаниях, распределении и строении континентов» [54] ученый подчеркивал, что «все главные континенты в орогеническом отношении представляются аналогичными, хотя горные системы являются тем сложнее, чем больше континент» [55, с. 45]. Давную закономерность А. П. Карпинский связывает с соотношением между очертаниями, сложением и ростом материков, а также с осью вращения планеты [69, с. 29]. Эти выводы, естественно, наталкивают на мысль о закономерной повторяемости, т. е. симметрии, охватывающей поверхность всего земного шара. Они сыграли основополагающую роль в развитии современного учения о критических меридианах и параллелях земного шара (см. гл. 3).

Видная роль в развитии симметричных понятий в геологии, географии и учении о почвах принадлежит прославленному отцу русского почвоведения В. В. Докучаеву (1846—1903). В качестве иллюстрации приведем небольшую цитату из его статьи «Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны Кавказа» (1898 г.): «А так как названные стихии, вода, земля, огонь (тепло и свет), воздух, а равно растительный и животный мир, благодаря астрономическому положению, форме и вращению нашей планеты вокруг ее оси, несут на своем общем характере явные резкие и неизгладимые черты закона мировой зональности, то не только вполне понятно, но и совершенно неизбежно, что и в географическом распространении этих вековечных почвообразователей как по широте, так и долготе должны наблюдаться постоянные и в сущности всем и каждому известные строго закономерные изменения, особенно резко выраженные с севера на юг, в природе стран полярных, умеренных, экваториальных и пр. А раз это так, раз все важнейшие почвообразователи располагаются на земной поверхности в виде поясов или зон, вытянутых более или менее параллельно широтам, то неизбежно, что и почвы — наши черноземы, подзолы и пр. — должны располагаться по земной поверхности зонально, в строжайшей зависимости от климата, растительности и пр.» [42]. Трудно найти более наглядное и яркое описание зональной симметрии, столь характерной для поверхности земного шара.

Огромное влияние на внедрение обобщающих понятий о симметрии в область геологических наук оказал выдающийся мыслитель-натуралист акад. В. И. Вернадский (1863—1945). Приведем несколько характерных его высказываний.

«Я рассматриваю симметрию, согласно Кюри, как состояние физико-химического пространства. Она отвечает природной геометрии... Я рассматриваю явления симметрии как эмпирически изучаемые и научно охватываемые пространственные проявления земных природных тел. Насколько я могу судить, такое понимание симметрии, выросшей в целое научное течение, является необычным. Я сам пришел к этому простому пониманию только на 60-м году моего размышления о симметрии... Натуралист, исходя из школьной рутины, все время мыслил о едином пространстве, но не о разных природных пространствах, не о состояниях пространства. Он не признавал, что пространство нашей планеты и пространство вообще планет есть особые пространства, нигде, кроме планет, не наблюдаемые. В течение тысячелетий, говоря о природных или естественных телах, он не признавал и не утверждал (что сейчас приходится делать), что каждое природное тело и каждое природное явление имеет свое собственное материально-энергетическое специфическое пространство, которое натуралист изучает, изучая симметрию.

Утверждая это, я ввожу в геологию новое определение — пространство земной реальности, то, которое всегда неизбежно изучает натуралист. В частности, геолог изучает пространственные явления (т. е. явления симметрии) только в пределах нашей планеты, только

в земном планетном пространстве, в виде различных его состояний» [16, с. 166].

Поразительная глубина и оригинальность приведенных высказываний, относящихся как к глобальной симметрии земного шара, так и к отдельным ее геологическим деталям, требуют особенно вдумчивого и внимательного их изучения. Как видим, в основу своих обобщающих концепций В. И. Вернадский вложил уже известный нам принцип симметрии П. Кюри. Одним из первых применил он этот принцип к земному шару, выявив симметрию вращения для климатических поясов и диссимметрию (вернее, «антисимметрию») в положении природных вод на Земле [15, с. 44]. В своих дальнейших рассуждениях ученый пытался сделать еще более широкие обобщения, положив принцип П. Кюри в основу своих взглядов на симметрию природы вообще и на симметрию живого и косного вещества, в частности.

Восъемлющие идеи В. И. Вернадского нашли свое продолжение и дальнейшее развитие в трудах его горячего поклонника и последователя проф. Б. Л. Личкова (1888—1966). У него мы находим следующее важное обобщение: «Черты симметрии нашей планеты, связанные с ее гравитационным полем, выражены не только в твердом теле Земли, но и в ее жидкой и газообразной оболочках: они имеют обязательно ту же симметрию. Эти оболочки представляют собой не просто воздух и воду, но агрегаты того и другого, определенным образом симметрично построенные» [70, с. 164]. Много интересных и существенных выводов, касающихся особенностей глобальной системы Земли, собрано в известных книгах того же автора «Природные воды Земли и атмосфера» (1960 г.) и «К основам современной теории Земли» [71].

Дальнейшему развитию идей В. И. Вернадского о симметрии в области гидрогеологии земного шара посвящены работы проф. Н. И. Толстихина, трактующие о закономерно симметричном размещении поясов артезианских бассейнов и океанских котловин [122].

Рассмотренные выше широкие обобщения формулировались их авторами без использования конкретных законов симметрии с их точными формулами и характеристиками. Вместе с тем уже в 1830 г. И. Ф. Гессель вывел все возможные случаи симметрии для конечных фигур, в 1850 г. О. Браве описал четырнадцать решетчатых систем, в 1890 г. Е. С. Федоров и годом позднее А. Шенфлис опубликовали результаты вывода 230 пространственных групп — законов симметрии для бесконечно протяженных пространств — решетчатого строения.

Все эти законы могут быть с успехом использованы при описании симметрии геологических объектов. В особенности следует подчеркнуть значение трудов гениального русского кристаллографа, геометра, минералогa, петрографа и геолога Е. С. Федорова (1853—1919). Среди них нет работ, специально посвященных симметричным явлениям в геологии, однако федоровский вывод законов бесконечной кристаллографической симметрии, а также созданный им теодолитный метод в минералогии и петрографии дают ту основу, исходя

из которой можно создавать современную науку о симметрии в геологии.

В самом деле федоровские 230 пространственных групп бесконечной решетчатой симметрии, играющих важнейшую роль в структурной кристаллографии, можно с успехом использовать также для строго математического описания тектонических геологических структур (см. гл. 4). Федоровский теодолитный столик для микроскопа является, как известно, основным прибором микроструктурного анализа в современной структурной петрологии.

В гл. 1 уже было отмечено значение новых теорий для геологической симметрии, созданных советскими продолжателями Е. С. Федорова. При расшифровке симметричных геологических закономерностей нельзя не учитывать антисимметрии и симметрии подобия А. В. Шубникова, криволинейной симметрии Д. В. Наливкина и гомологии В. И. Михеева. Используя эти понятия, И. И. Шафрановский в 1962 г. выступил с публикацией о глобальной симметрии земного шара, характеризуя последнюю с помощью формул симметрии [145]. Он же в научно-популярной книге «Симметрия в природе» [149] изложил в общедоступной форме начала симметрии как для отдельных геологических образований, так и для земного шара в целом. Особое внимание уделялось значению универсального принципа симметрии П. Кюри и роли антисимметрии, симметрии подобия и криволинейной симметрии в природе.

Переходя к рассмотрению отдельных деталей земной поверхности, прежде всего отметим, что здесь нет никакой возможности дать более или менее подробный и последовательный исторический обзор выводов и обобщений в области геометризации и выявления симметрии этих геологических объектов. Достаточно напомнить хотя бы столь привычные для нас характерные названия горных массивов или складок земной коры (куполообразных, волнообразных, столбообразных, сундучных, коробчатых и т. п.). Сами эти названия дают не только наглядное понятие о внешнем виде складок, но и позволяют сразу же описать их с помощью элементов симметрии (куполообразные —  $L_{\infty} \infty P - \infty m$ , волнообразные —  $P - m$ , столбообразные, сундучные, коробчатые —  $L_2 2P - 2mm$ ; см. рис. 2).

В имеющихся курсах геоморфологии и структурной геологии можно найти множество превосходных примеров, так и напрашивающихся на подведение их под определенные законы как конечной, так и бесконечной симметрии [110, 127 и др.].

В последнее время в геологической литературе обращается особое внимание на симметрию текстур и структур горных пород как первичных, так и деформированных. Немецкий ученый М. Кирхмайер, посвятивший этой проблеме обширную публикацию, дал «предысторию установления понятий симметрии в учении о деформациях горных пород» [181]. Вкратце приведем его данные.

Первое изображение трещиноватости в горной породе относится к 1577 г. В конце XVIII в. знаменитый саксонский минералог и геолог А. Г. Вернер (1749—1817) обратил внимание на системы трещин

в горных породах и каменных углях. Его ученик и последователь — К. Ф. Науманн (1797—1873) в 1833 г. выдвинул понятия «линейности» и «параллельности плоскостей», помогающие описанию и генетическому сопоставлению геологических нарушений. Учет параллельности и направления штрихов позволяет наметить связи между порождающими причинами и последующими действиями горообразующих процессов.

Существенную роль сыграли эксперименты известного французского геолога и минералога Г. О. Добрэ (1814—1896), выдвинувшего в обновленном виде значение параллельности и направления штрихов. Базируясь на лабораторных экспериментах, он нашел закономерности расположения трещин в породах в зависимости от направления тектонического сжатия. С помощью устанавливаемых на плоскостях движений Г. О. Добрэ подразделил трещины и сбросы на диаклазы, параклазы и литоклазы (диаклазы — тектонические трещины, вдоль которых не произошло перемещений горных пород; параклазы — тектонические трещины, вдоль которых происходили перемещения в виде сбросов и сдвигов; литоклазы — вообще все трещины в горных породах независимо от их происхождения).

Временно прервем исторический обзор М. Кирхмайера и обратимся к данным о развитии структурной петрологии, содержащей богатейший материал по симметрии геологических (петрологических) объектов. Роль русских ученых в открытии и становлении этой новой научной дисциплины хорошо обрисована на страницах обширной монографии чл.-корр. АН СССР Н. А. Елисеева. В своей книге под общим названием «Структурная петрология» он объединил два раздела науки о горных породах: структурный анализ интрузивных массивов и микроструктурный анализ. Эти два раздела составляют «единое учение об анизотропии интрузивных массивов и различных горных пород» [149, с. 3].

О зарождении данной научной дисциплины тот же автор сообщает следующие сведения: «В начале двадцатых годов текущего столетия профессор А. А. Полканов у нас в Советском Союзе и профессор Г. Клоос в Германии, независимо один от другого — один при изучении структуры интрузивных массивов на севере СССР, другой при изучении структуры интрузий в Германии — пришли приблизительно к одним и тем же выводам, к одной и той же идее о тесной генетической связи между характером движений индивидуального блока в земной коре и его внутренней структурой».

К моменту появления в свет работы Г. Клооса «О механизме глубинных вулканических явлений» (1921), в которой излагаются принципы структурного анализа интрузивных массивов, А. А. Полканов демонстрировал в Минералогическом обществе в Ленинграде результаты своих многолетних работ по структурному анализу. Таким образом, методику структурного анализа следует называть, по мнению автора, методикой Клооса — Полканова, а не методикой Клооса, как принято ее называть в иностранной и нашей литературе» [48, с. 6].

До сих пор речь шла о возникновении структурного анализа интрузивных горных массивов. Приведем далее цитату из той же монографии, касающуюся развития микроструктурного анализа: «Основные идеи микроструктурного анализа были разработаны и опубликованы Г. Ф. Беккером в 1893 г., но не встретили сочувствия среди геологов-современников, а затем были временно забыты... Одновременно с опубликованием работы Г. Ф. Беккера была опубликована в том же 1893 г. на русском и немецком языках замечательная работа великого русского ученого Е. С. Федорова «Теодолитный метод в минералогии и петрографии» [128], сыгравшая исключительную роль в развитии микроструктурного анализа.

Дело в том, что для определения как закономерной ориентировки отдельных минералов, так и степени совершенства ориентированных узоров необходимо применение статистического изучения ориентировки отдельных зерен того или иного материала. Такое статистическое изучение возможно лишь на основе федоровского теодолитного метода оптического изучения минералов.

Таким образом, развитие микроструктурного анализа происходило и происходит на основе работ Г. Ф. Беккера и Е. С. Федорова. Считающиеся основоположниками микроструктурного анализа Б. Зандер и В. Шмидт (микроструктурный анализ часто называют методикой Зандера) использовали основные идеи Г. Ф. Беккера и Е. С. Федорова и разработали методику микроструктурного анализа, приблизив ее к решению практических задач в геологии» [48, с. 159].

Все сказанное выше, касающееся роли русских ученых в открытии и разработке структурной петрологии, следует твердо помнить при изучении соответствующей иностранной литературы.

Отмечая достижения отечественных ученых, Н. А. Елисеев вместе с тем высоко оценивает и заслуги иностранных авторов, способствовавших развитию структурной петрологии. В частности, им подробно разбирается работа Г. Ф. Беккера [173] о так называемых стресс- и стрейн-эллипсоидах \*, используемых в микроструктурном анализе. Стресс- и стрейн-эллипсоиды представляют собой чисто теоретические вспомогательные построения, которыми удобно пользоваться для практических целей (в этом отношении их можно сравнить с оптическими индикатрисами в кристаллооптике) \*\*. Объясняя

---

\* Стресс-эллипсоид является эллипсоидом давлений, стрейн-эллипсоид — эллипсоидом деформаций.

\*\* Как и всякое научное понятие, понятия об эллипсоидах напряжений и деформаций имеют строго определенные области (пределы) применения. Многие последователи Г. Ф. Беккера использовали эти понятия без достаточной строгости. Вульгаризируя сравнение эллипсоида деформации с оптической индикатрисой, они приходили, в частности, к ошибочному выводу о недеформированности вещества в направлениях, совпадающих с круговыми сечениями эллипсоида. обстоятельный разбор таких ошибок был выполнен в 1954—1955 гг. Г. И. Гуревичем [31, 32].

эти понятия, Н. А. Елисеев вслед за А. Кнопфом приводит в качестве наглядного примера деформацию пачки листов бумаги или колоды карт (рис. 13). На образе деформированной колоды мы видим, что квадрат превратился в параллелограмм, круг в эллипс и т. д. Вписанный в недеформированную колоду шар перейдет в общем случае в трехосный эллипсоид. От себя добавим, что здесь мы имеем ярко выраженные проявления гомологических операций. Петрологи, анализирующие деформации горных пород, должны учесть это обстоятельство и своевременно взять на вооружение учение о гомологии, разработанное В. И. Михеевым [77].

Исключительно важная роль симметрии в структурной петрологии явствует из самой сущности этой дисциплины. В подтверждение сказанному приведем следующие основные положения.

1. Между движениями отдельного блока интрузивного массива в земной коре и его внутренней структурой имеется строго закономерная связь.

2. Определенный характер движений горных пород порождает тот или иной закономерно ориентированный узор в их структуре.

3. По структурным узорам горных пород и симметрии их анизотропного сложения можно восстановить характер движений, а по ним расшифровать и историю геологического процесса, возбудившего такие движения [48, с. 5].

Микроструктурный анализ изучает микростроение горных пород, обращая особое внимание на узоры, связанные с закономерной ориентировкой минеральных зерен. Статистические приемы исследования позволяют получить строго симметричные картины в виде суммарных проекций, показывающих максимумы наиболее характерных ориентировок.

В «Структурной петрологии» Н. А. Елисеева находится множество прекрасных примеров и иллюстраций, требующих расшифровки и истолкования со строго симметричных позиций.

Возвратимся же к историческому обзору М. Кирхмайера.

Трудности нахождения природных элементов симметрии натолкнули И. Блааса в 1898 г. на разработку способа наглядного изображения пространственных макроструктур с помощью хорошо знакомой в кристаллографии сетки русского ученого Г. В. Вульфа. После

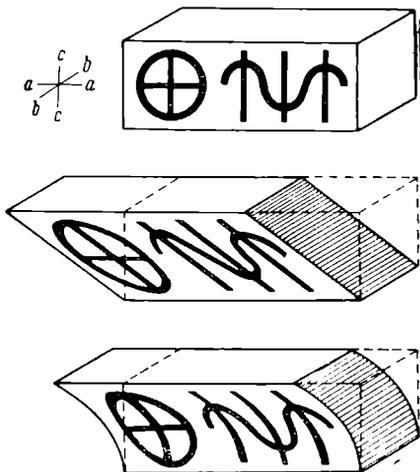


Рис. 13. Гомогенная деформация при помощи скользящих движений вдоль системы параллельных плоскостей. По А. Кнопфу.

него эту сетку применяли О. Зейтц в горной геометрии (1914—1917) и В. Шмидт при изучении микроструктур (1917 г.).

В 1925 г. австрийский ученый Б. Зандер заменил проектирование на сетке Г. В. Вульфа ламбертовской проекцией на сетке В. Шмидта. В 1926 г. последний применил ламбертовское проектирование для исследования макроструктур. Школа Б. Зандера получила широкое распространение и в Австрии, и за ее пределами. Известны работы этой школы по изучению микро- и макроструктур в областях тектонической складчатости. Принцип параллельности К. Ф. Науманна и Г. О. Добре использовал в 1903 г. Флек при изучении геологии Рурской области. Г. Клоос широко распространил этот принцип в теоретической геологии (1936 г.).

Заканчивая исторический обзор, М. Кирхмайер отмечает, что применение концепций симметрии П. Кюри в геологии нашло отражение в трудах ученых СССР, ГДР, Новой Зеландии и США. Сам М. Кирхмайер, работающий в Клаустале, связывает себя с американской школой.

Как видим, небольшая историческая сводка М. Кирхмайера дает беглое представление о предшествующих геотектонической симметрии теориях в зарубежной литературе. К сожалению, эта сводка грешит полным отсутствием конкретных упоминаний о достижениях русских ученых. Мы в ней не находим указаний на теодолитный метод Е. С. Федорова, давшего основу для исследований Б. Зандера и Г. Клооса. Ничего не сказано о трудах А. А. Полканова и Н. А. Елисеева в области структурной петрологии. Автор не пользуется работами А. В. Шубникова об антисимметрии, симметрии подобия и пространственных группах континуума. Не известна ему и криволинейная симметрия Д. В. Наливкина. Все эти достижения русской и советской науки могли бы существенно обогатить данные М. Кирхмайера, а во многом и уточнить и углубить его собственные выводы.

Перейдем к современной литературе о симметрии в геологии. Этот новейший этап характеризуется применением конкретных законов симметрии при трактовке геологических явлений.

В 1956 г. И. И. Шафрановский опубликовал статью «Группы симметрии в структурной петрологии» [140]. В ней впервые указывалась целесообразность применения пространственных групп А. В. Шубникова, отвечающих бесконечной симметрии непрерывных и частично прерывных однородных трехмерных пространств к петрографическим объектам. Попутно отмечалась необходимость всемерного использования в петрологии принципа симметрии П. Кюри (подробно см. гл. 5).

В статье того же автора «К вопросу об уточнении универсального принципа симметрии Кюри» [146] на примерах палеонтологических объектов, искаженных кристаллических форм и контура бархана (по Г. А. Дмитриеву) показано, что исчезающие элементы классической симметрии переходят в элементы криволинейной.

В 1972 г. авторы настоящей книги описали симметрию тектонических и некоторых других структур с помощью бесконечной симметрии бордюров и федоровских пространственных групп [96]. Там же

приводятся примеры криволинейной симметрии и симметрии подобия для таких структур (см. гл. 4). Рассмотрение выводов о влиянии симметрии кристаллообразующей среды на искажение кристаллических природных форм представлено в гл. 6.

Идеи о закономерных структурах в углепетрографии интенсивно развивались чл.-корр. АН СССР Ю. А. Жемчужниковым (1885—1957) [450]. Приложение симметричных понятий к таким структурам осуществил Г. А. Дмитриев, один из первых наших геологов, ясно создававших значение законов симметрии в геологии. В 1956 г. изучение кливажа каменных углей Инты позволило ему установить для них симметрию подгруппы переносов (трансляций) [38]. Существенный интерес представляют его же выводы о наследовании симметрии конуса слоев осадочной породы [40]. Принципиальное значение имеет также работа о симметрии кластических даек с вытекающими из нее широкими обобщениями [38]. Программная статья того же автора и М. С. Потаповой о симметрии как общем методе познания геологических закономерностей уже цитировалась нами в гл. 1 [41].

Тесно связан с нашей темой и ряд работ по горной геометрии и маркшейдерии. Особого внимания заслуживает методика геометризации месторождений полезных ископаемых, разработанная профессором П. К. Соболевским (1869—1949) [114].

Дальнейшее развитие этого направления мы находим в монографии Л. И. Четверикова «Теоретические основы моделирования тел твердых полезных ископаемых» [137]. Подход Л. И. Четверикова к геометрии тел твердых полезных ископаемых во многом напоминает геометрический подход к анализу кристаллографических конфигураций. По примеру кристаллографов, автор выделяет «оси», «центр» и «срединные поверхности» (т. е. аналоги плоскостей симметрии) в описываемых телах. Разработанная им классификация явно сходна с классификацией габитусных кристаллических форм, принятой в кристаллографии и минералогии.

Интересны обобщающие выводы исследователей, группирующихся во Всесоюзном научно-исследовательском геологическом институте, относительно пространственно-временных соотношений в геоморфологии, геотектонике, закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых и др. (В. И. Васильев, Я. Д. Виньковецкий, В. И. Драгунов, И. В. Круть, Д. В. Рундквист, В. А. Черепанов и др.). Их взгляды и направления нашли свое выражение в монографии «Проблемы развития советской геологии» и нескольких сборниках [86, 102, 111].

Нельзя не остановиться на ряде идей упомянутых авторов, хорошо понимающих важность учения о симметрии для геологии. Заслуживает внимания их предложение ввести в систему основных геологических понятий концепции об уровнях организации вещества (подобно тому, как это осуществляется в биологии, кибернетике и др.) [86, с. 55].

В неживой природе различаются уровни организации элементарных частиц, атомов, молекул, минералов, горных пород, формаций

(парагенераций) и т. д. [111, с. 177]. Назревает необходимость сравнительного анализа соответствующих проявлений симметрии на разных уровнях организации. «Концепция уровней и принцип симметрии должны дополнять и в какой-то мере объяснять друг друга» [111, с. 17].

Первоочередной задачей является построение систематики горных пород и формаций. Для этого необходимо выявить мотивы повторяемости, т. е. соответствующие законы симметрии в объектах данного уровня. Отсюда возникает идея о моделировании «элементарных ячеек» для объектов любого уровня — своеобразных аналогов элементарных ячеек в кристаллических структурах [102, с. 95—100, 146—152, 153—162].

Напомним, что элементарной ячейкой кристаллической структуры называется выбранный по определенным правилам минимальный параллелепипед, содержащий определенную совокупность атомов, ионов или молекул. Полная структура получается с помощью переносов этого параллелепипеда вдоль его ребер на расстоянии, равные длинам ребер.

Приведем несколько цитат, дающих понятие о сущности вышеупомянутой идеи. «Систематику горных пород и формаций можно существенно улучшить, используя понятие об элементарной ячейке. Вид элементарной ячейки, очевидно, будет определять вид, к которому следует относить тот или иной индивидуальный объект, будет ли им минерал, горная порода или формация. Трансляция элементарной ячейки определенного вида позволяет выполнить весь объем тела, в систематическом отношении отождествляемого с данным видом. Естественно, что в основу систематики структур и горных пород формаций, равно как и минералов, в таком случае приходится положить геометрические — пространственные — соотношения составляющих их элементов предшествующих уровней вещества \*, иными словами: и петрографии, и учению о формациях необходим аналог кристаллографии, на которой основывается в значительной ее части систематика минералов» [102, с. 89].

За «элементарную ячейку» горной породы следует принять минимальную часть данной породы (элементарный объем), сохраняющую состав и структуру целого (в основе этого определения лежит тезис об однородности горных пород как минеральных агрегатов).

Возможный конкретный подход к выявлению однородности, а вместе с тем и нахождению «элементарной ячейки» горной породы, выясняется из следующей цитаты. «Аппаратом описания однородности является аппарат симметрии, точнее теории групп, в комплексе с методами статистического описания, помогающими выявить эмпирические зависимости и на следующем этапе определить конкретную группу преобразований, относительно которой данную породу можно считать вполне однородной» [102, с. 149].

---

\* Для минерала это будут атомы и молекулы, для горных пород — минералы, для формаций — горные породы.

Переходя к горным формациям, напомним четкую формулировку акад. Н. С. Шатского, дающую предельно краткое и вместе с тем ясное понятие о них: «Если минералы — парагенезы элементов, горные породы — парагенезы минералов, то геологические формации — парагенезы горных пород» [138, с. 53]. Отсюда напрашивается само собой и соответствующее понятие об «элементарной ячейке» формации, аналогичное понятию об элементарной ячейке структуры окристаллизованного минерала. Вид «элементарной ячейки» формации определяется «определенным набором видов горных пород и определенными отношениями слагаемых ими слоев в ритме (структурой ритма)» [102, с. 160].

Дальнейшим шагом в развитии этих идей представляются публикации Д. В. Рундквиста, посвященные применению учения о симметрии к структурам минеральных образований, а также пространственно-временным закономерностям размещения месторождений полезных ископаемых [106, 107]. Заслуживает внимания его любопытная попытка систематики формаций для целей прогнозирования по элементам симметрии [105].

Характерная симметрия расположения рудоносных зон в складчатых областях описана в книге «Грейзеновые месторождения» Д. В. Рундквиста, В. К. Денисенко и И. Г. Павловой [108, с. 27—35]. Идея, выдвигаемые коллективом авторов ВСЕГЕИ, не могут не привлечь внимания специалистов. Следует отметить ту ведущую роль, которая отводится в них учению о симметрии. Интересно неоднократно подчеркиваемая мысль о необходимости создания систематики структур горных пород и геологических формаций, аналогичной структурно-кристаллографической систематике в минералогии [111, с. 24]. Все это вышеупомянутые авторы относят к важнейшим задачам ближайшего будущего.

В 1970 г. Р. И. Гришкян и В. Л. Леонов опубликовали небольшую заметку о принципах структурной симметрии и их применении [29]. В ней отмечается, что тектониты, складки, разломы, системы складок и разломов отличаются по своей симметрии. По их мнению, структурная симметрия исчерпывается всего пятью (вернее, шестью) группами конечной симметрии: сферической ( $\infty L_\infty \infty PC$ ), «осевой» (?) ( $L_\infty \infty P$ ), ромбической ( $L_2 2P$  и  $3L_2 3PC$ ), моноклиной ( $P$ ) и триклинной (—). Как будет видно далее, выводы Р. И. Гришкяна и В. Л. Леонова частично перекликаются с положениями М. Кирхмайера [181]. Здесь лишь отметим, что взятые из отдельных эмпирических наблюдений случаи симметрии явно не исчерпывают все возможные случаи, встречающиеся в природе. Укажем также, что наряду с конечной симметрией в геологических структурах огромную роль играет бесконечная симметрия (см. гл. 1 и 4).

В последнее время понятия симметрии привлекают также большое внимание со стороны географов. Богатый материал по глобальной симметрии и антисимметрии собран в книгах Л. П. Шубаева по общему землеведению [157, 158]. Географическая оболочка Земли рассматривается автором с позиций учения о симметрии и ее наруше-

ния — диссимметрии. Ему же принадлежит основополагающая статья «Симметрия и диссимметрия в географической оболочке» [159].

Введение симметричных понятий в область геологических наук неразрывно связано с проблемой их математизации. Последняя невозможна без самого тесного союза геологов-«симметристов» с представителями математической геологии. Поэтому наш очерк будет не полным, если мы не упомянем труды основателя математической геологии в СССР проф. А. Б. Вистелиуса и его школы [19]. Развитие статистической симметрии в геологии немислимо без учета их достижений.

Переходя к современной зарубежной литературе, ограничимся обзором лишь нескольких наиболее интересных публикаций. Считаем нужным остановиться на них подробнее, так как знакомство с ними может оказаться полезным для наших читателей.

Наиболее значительной среди работ, посвященных симметрии в геологии, является обширный мемуар М. С. Патерсона (Австралия) и Л. Е. Вейсса (Калифорния) «Понятия о симметрии в структурном анализе деформированных горных пород» [185].

Во вступлении, приводя наглядные примеры, иллюстрирующие важность применения симметричных понятий при изучении геологических объектов (барханов, складок, напластований, линейных структур и т. д.), авторы статьи высказывают следующее характерное замечание: «В интерпретации структур, возникающих в результате смещения осадочных образований под влиянием некоторого сдвигающего фактора, геологи обычно используют понятия симметрии, делая это отчасти даже бессознательно»\*. Заменить это «бессознательное» использование симметричных понятий строго обоснованным подходом с учетом математических законов симметрии в отношении геологических объектов и является основной задачей М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса.

Свою статью они начинают со ссылки на работы Б. Зандера и В. Шмидта, основывавшихся на простейших симметричных понятиях при трактовке геологических явлений вообще и деформированных горных пород, в частности [187—189]. Б. Зандер сформулировал правило, согласно которому симметрия структурных характеристик сильно деформированных пород отражает симметрию «моментов», обусловивших деформацию. М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс отмечают сходство этого правила с уже известным нам универсальным принципом симметрии. П. Кюри. И тут и там связываются между собой симметрии «причин» с симметрией «следствий». (По словам самого П. Кюри, «Когда некоторые причины производят некоторые следствия, элементы симметрии причин должны обнаруживаться в результатах произведенных действий» [66, с. 102].

Статья М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса состоит из двух частей. В первой дается обзор основных положений учения о симметрии, во второй — применение законов симметрии в области анализа де-

---

\* Здесь и далее перевод Т. В. Пахомовой.

формированных горных пород. Нет надобности останавливаться здесь на чрезвычайно тщательном изложении авторами основ учения о классической симметрии с соответствующими элементами конечной и бесконечной симметрии, видами симметрии и пространственными группами (см. гл. 1, табл. 1—3).

Отметим лишь, что вслед за П. Кюри и А. В. Шубниковым авторы придают особенно большое значение семи предельным видам конечной симметрии (предельным точечным группам), содержащим оси симметрии бесконечного порядка. Характеризуя группы симметрии, они пользуются символами А. Шенфлиса. В дальнейшем тексте мы всюду будем добавлять к этой мало распространенной у нас символически развернутые формулы симметрии О. Браве, хорошо известные по учебным курсам кристаллографии, а также символы, соответствующие международной номенклатуре Германа — Могаэна (табл. 1 и 2).

Учитывая сказанное, приведем симметричную характеристику и поясняющие примеры для семи вышеупомянутых точечных групп (табл. 4; рис. 14).

ТАБЛИЦА 4

СИМВОЛИКА СЕМИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВИДОВ КОНЕЧНОЙ СИММЕТРИИ

Номер	Символы			Поясняющие примеры (рис. 14)
	Шенфлис	Браве	Герман—Могаэн	
1	$C_{\infty}$	$L_{\infty}$	$\infty$	Вращающийся конус
2	$D_{\infty}$	$L_{\infty} \infty L_2$	$\infty 2$	Скрученный цилиндр
3	$C_{\infty v}$	$L_{\infty} \infty P$	$\infty m$	Конус
4	$C_{\infty h}$	$L_{\infty} PC$	$\infty/m$	Вращающийся цилиндр
5	$D_{\infty h}$	$L_{\infty} \infty L_2 \infty PPC$	$\infty/mm$	Цилиндр
6	$K_{\infty}$	$\infty L_{\infty}$	$\infty/\infty$	Шар, заполненный оптически активной жидкостью
7	$D_{\infty h}$	$\infty L_{\infty} \infty PC$	$\infty/\infty m$	Шар

Особенное внимание М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс уделяют двум новым разделам симметрии, а именно симметрии текстур (пространственные группы трехмерного континуума) А. В. Шубникова и статистической симметрии. К вопросу о симметрии текстур, в которых присутствуют бесконечно малые трансляции по любым направлениям, мы вернемся в гл. 5. Статистическая симметрия играет большую роль при изучении кристаллических агрегатов, некристаллических скоплений разнородных частиц, полей турбулентных движений и т. п. Для таких систем приходится обращаться к статистическому нахождению средних симметричных характеристик. Типы операций

симметрии здесь будут такими же, как и в классической симметрии для систем идеализированных фигур.

Следует отметить знакомство авторов с литературой о симметрии вообще и с советскими работами в частности (в приложенном списке литературы помимо работ зарубежных ученых названы публикации А. В. Шубникова, В. А. Баженова, И. М. Желудева, В. А. Копчика, Е. И. Пархоменко, И. И. Шафрановского).

Тем большее недоумение вызывает отсутствие ссылок на новые понятия, существенно расширившие и раздвинувшие рамки классической симметрии, а именно понятия об антисимметрии и симметрии подобия А. В. Шубникова, криволинейной симметрии

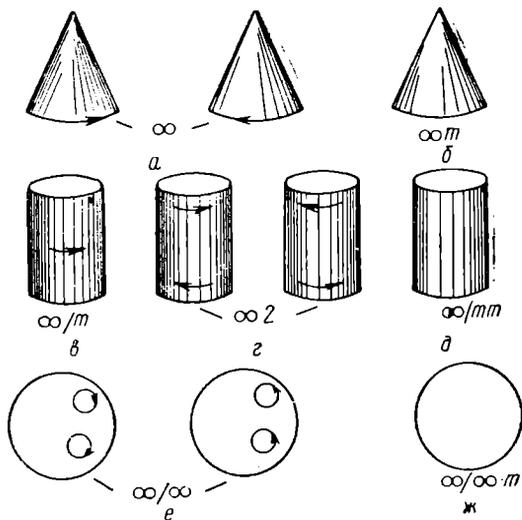


Рис. 14. Фигуры, характеризующие семь предельных видов конечной симметрии.

По А. В. Шубникову.

а — вращающийся конус,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ ; б — конус,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ ; в — вращающийся цилиндр,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ ; г — цилиндр,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ ; д — скрученный цилиндр,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ ; е — шар, заполненный оптически активной жидкостью,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ ; ж — шар,  $L_{\infty}$  —  $\infty$ .

Д. В. Наливкина, гомологии В. И. Михеева, цветной симметрии Н. В. Белова, А. М. Заморзаева и др. Эти новые разделы (в особенности симметрию подобия и криволинейную симметрию) с успехом можно использовать при динамической трактовке природных объектов вообще и геологических образований в частности.

М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс, очевидно, не знакомы и с трудами по структурной петрологии А. А. Полканова и Н. А. Елисева, имеющих прямое отношение к геологической симметрии. Из относящихся сюда работ дважды отмечается лишь статья И. И. Шафрановского [140]. М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс пишут: «Шубниковская концепция текстуры и ее симметрии широко применялась им самим и другими русскими авторами при обсуждении пьезоэлектрических поликристаллических материалов (например, Желудев, 1957; Баженов, 1957), в то время как Шафрановский (1956) использовал ее также в структурной петрологии» [185, с. 855]. И далее: «Недавно Шубников (1956) снова рассмотрел работу Кюри в области симметрии. Другие русские авторы также используют принцип симметрии Кюри,

особенно в связи с пьезоэлектричеством (например, Желудев, 1957; Колпик, 1957), в то время как Шафрановский (1956) обратил внимание на его уместность в структурной петрологии» [185, с. 857].

При обсуждении принципа П. Кюри М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс выделяют три следующих пункта:

- 1) значение диссимметрии (отсутствие некоторых элементов симметрии или расстройтво симметрии);
- 2) правило наложения элементов симметрии (сохраняются только те элементы, которые являются общими для двух сосуществующих систем);
- 3) вывод о сохранении элементов симметрии «причины» и «следствия».

Особый интерес представляет для нас вторая часть мемуара М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса, рассматривающая применение положений симметрии к анализу деформированных горных пород. Основная задача при изучении таких пород состоит в том, чтобы, исходя из их сложения (структуры и текстуры), выявить историю их деформации. Симметрия позволяет уловить переходы от симметрии структуры (текстуры) породы к симметрии факторов, обусловивших ее деформацию. При решении этой задачи большую роль играет статистическая картина преобладающей ориентировки составляющих зерен. Исходя из принципа П. Кюри, можно ожидать, что симметрия такой картины соответствует симметрии обусловившего его механизма деформации.

Демонстрацию решения подобной задачи авторы дают на примерах тектонитов (к тектонитам они относят любую породу, структурные геометрические черты которой являются результатом деформаций, связанных с частичными передвижениями в твердом состоянии; принятые во внимание тектониты являются по своей природе в основном метаморфическими). Если любой вид пород может быть деформирован до степени тектонита, то, следовательно, его первоначальная структура может иметь любую симметрию, характерную для структур осадочных, изверженных и метаморфических пород. Наиболее обычные общие типы симметрии для распространенных структур осадочных и изверженных горных пород, приведены в табл. 5.

Далее авторы переходят к кинематике деформаций, передающей картину передвижений внутри породы.

Симметрия кинематических свойств, характеризующих локальные нарушения, сводится к пяти видам симметрии, дублирующим виды симметрии (табл. 5). Эти виды соответствуют симметрии эллипсоида растяжений — форме, которая изменяется от шара к эллипсоиду вращения и трехосному эллипсоиду. При этом учитывается и ориентировка эллипсоида относительно некоторых осей подобно тому, как это делается в кристаллооптике при решении вопроса об ориентировке оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей.

Затем М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс переходят к динамическим свойствам, характеризующим поля давления, полученные в результате

## СИММЕТРИЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ СТРУКТУР И ТЕКСТУР

Симметрия	Осадочные породы	Изверженные породы
Сферическая $\infty L_{\infty} \infty PC -$ $-\infty/\infty m$	Агрегаты равных зерен, например массивные песчаники со сферическими кварцевыми зернами без преимущественной ориентации кристаллографических направлений	Агрегаты с беспорядочно ориентированными зернами, например некоторые граниты и базальты; роговики — метаморфические породы, которые могут иметь эту симметрию
Плاناксиальная $L_{\infty} \infty L_2 \infty PPC -$ $-\infty/mm$	Пластовые осадки равных и неравных зерен, например глинистые сланцы и известняки	Агрегаты с пластовой и нелинейной слоистостью течения или слаболинейной структурой течения, например некоторые лавовые потоки малых и больших интрузий
Орторомбическая $3L_2 3PC - mmm$	Встречаются редко	
Моноклиная $L_2 PC - 2/m$	Пластовые осадки, содержащие линейные структуры, например граувакки с канавками и следами, складчатыми формами, чешуйчатостью и линейностью зерен	Агрегаты, содержащие ламинарные и линейные структуры потоков, например некоторые плутонические и вулканические породы
Триклиная $C - \bar{1}$	Пластовые осадки, содержащие ненаправленные линейные структуры потоков, изогнутое напластование и т. д.	Агрегаты, содержащие нерегулярные структуры потоков, например изгибы

приложения некоторой системы сил. Статистически гомогенное поле давления может иметь сферическую  $\infty L_{\infty} \infty PC - \infty/\infty m$ , плаксаксиальную  $L_{\infty} \infty L_2 \infty PPC - \infty/mm$  или орторомбическую  $3L_2 3PC - mmm$  точечную симметрию. Гомогенное односторонне направленное гравитационное поле имеет симметрию  $L_{\infty} \infty P - \infty m$ . Нам уже известно, что именно эта симметрия играет первостепенную роль в поле земного тяготения, порождая на земной поверхности и возле нее тела с преобладающей симметрией  $L_n nP (nm)$ ,  $P (m)$  и  $-(1)$  (все эти виды симметрии являются подгруппами  $L_{\infty} \infty P$ ). На это обстоятельство авторы не обращают достаточного внимания.

Вместе с тем нельзя не отметить тщательного и скрупулезного подхода М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса к анализу деформирован-

ных горных пород. При исследовании конечной структуры они выделяют структурные элементы трех видов: 1) унаследованные (следы исходной структуры); 2) приобретенные (черты, возникшие в результате деформаций); 3) составные (результат комбинации унаследованных и приобретенных признаков). Среди элементов симметрии структуры различают некристаллические (унаследованные и приобретенные) и кристаллографические.

Согласно Б. Зандеру, симметрия структуры тектонита отражает симметрию движения при деформации. Еще раз напоминая о сходстве этого положения с универсальным принципом симметрии, П. Кюри, М. С. Патерсон и Л. Е. Вейсс предлагают использовать их в объединенном виде, учитывая правило наложения элементов симметрии. «В кинематической интерпретации структуры тектонита первоначальная структура и компоненты деформации являются независимо действующими факторами или «причинами», а конечная структура представляет «следствие». По принципу наложения результирующая симметрия действующих факторов отвечает симметрии, которая является общей для исходной структуры и для компонентов деформации» [185].

Сделанный нами краткий обзор капитальной работы М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса показывает, что ее авторы, будучи специалистами в области теории симметрии, сумели с большим знанием дела приложить основные симметричные закономерности к трактовке и генетическому истолкованию структурных особенностей деформированных горных пород. Заинтересованным читателям полезно будет ознакомиться с этим солидным мемуаром с тем, чтобы практически использовать основные его положения. При этом, однако, надо учесть и некоторые его дефекты.

К недостаткам и упущениям данной работы следует отнести игнорирование новейших разделов расширенной симметрии (симметрии подобия, криволинейной симметрии, гомологии) и недоучет огромного значения симметрии  $L_\infty \infty P(\infty m)$  и его подгрупп в условиях земного тяготения.

Наряду с мемуаром М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса заслуживает внимания, а вместе с тем и критического разбора уже упоминавшаяся статья М. Кирхмайера под заглавием «Концепция симметрии Кюри (1884) в учении о макроструктурах» [181].

Автор статьи широко использовал рассмотренные выше положения М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса и подобно им характеризует группы симметрии с помощью символов А. Шенфлиса. Основой для симметричных обобщений послужили материалы геологических исследований М. Кирхмайера в горной области Западногерманского каменноугольного бассейна. Найденные здесь структурные элементы получены для систем трещин (кливажа) в рурском карбоне. Суммирующие результаты оформлены в виде специальной таблицы. По выражению самого автора, эта таблица иллюстрирует «справедливость принципа, основывающегося на изначальной идее о единстве всего естествознания» [181]. Действительно, приведенные им геологические примеры

могут быть заменены другими соответствующими примерами, взятыми из различных областей естественных наук.

После уже рассмотренного исторического обзора М. Кирхмайер переходит к подробному истолкованию своей таблицы, а также и к примерам, иллюстрирующим отдельные ее пункты.

В первом ряду таблицы даны обобщающие названия, символы А. Шенфлиса и изображения конечных фигур, симметрия которых позволяет характеризовать симметрию геологических тел. Это изображенные на рис. 14 формы, характеризующие семь предельных групп П. Кюри с осями бесконечного порядка (два шара, три цилиндра, два конуса). Затем М. Кирхмайер приводит две ромбические комбинации из трех пинакоидов в виде «кирпичика» ( $D_{2h}-3L_23PC-tmm$ ) и из двух диэдров и моноэдра ( $C_{2v}-L_22P-2mm$ ). Далее появляются две моноклинные комбинации с симметрией  $C_{2h}$  ( $L_2PC-2/m$ ) и  $C_s$  ( $P-m$ ). Пять следующих фигур обладают триклинной симметрией  $C_i$  ( $C-1$ ) и  $C_1$  ( $- -1$ ). Фигуры, соответствующие предельным группам, полностью исчерпывают семь видов симметрии с осями бесконечного порядка и не вызывают никаких возражений. Очевидно, наряду с ними следует подразумевать и их возможные подгруппы, где шаровая симметрия снижается до пяти видов симметрии кубической сингонии или до двух видов додекаэдро-икосаэдрической системы, а в случае единственной  $L_\infty$  последняя заменяется осью  $L_n$  ( $n$  — целое число любого порядка; см. табл. 1, 2).

Недоумение вызывает неполнота приведенных видов симметрии для низших категорий сингоний: среди ромбических фигур отсутствует фигура с симметрией  $D_2-3L_2-222$ , а среди моноклинных нет фигуры с симметрией  $C_2-L_2-2$ . Вряд ли здесь можно сослаться на то, что М. Кирхмайеру не удалось найти геологических объектов с такой именно симметрией, ведь привел же он шар с осевой симметрией  $K_\infty-\infty L_\infty-\infty/\infty$ , не имеющей соответствующих примеров среди геологических макро- или микроструктур.

В связи с указанной неполнотой приведенных видов симметрии возникает замечание о неправильности самого названия статьи. Если бы автор строго следовал концепции П. Кюри, он не допустил бы такого чисто выборочного подхода по отношению к законам симметрии. Любопытно отметить еще и то обстоятельство, что М. Кирхмайер совершенно обошел вопрос о принципе симметрии П. Кюри, так подробно разобранным М. С. Патерсоном и Л. Е. Вейссом. В списке литературы, цитируемой М. Кирхмайером, знаменитая статья П. Кюри 1894 г. не упоминается.

Ссылаясь на вышеупомянутые фигуры первого ряда таблицы, автор отмечает, что им дается точечная (конечная) симметрия, а при характеристике геологических образований следует иметь в виду также и бесконечную симметрию. Второй ряд содержит наглядные примеры из области осадкообразования (седиментологии). Помещенные в таблице изображения соответствующих осадочных структур дают более или менее ясное понятие о них. Симметрия каждой соответствует симметрии вышележащей идеальной фигуры «пер-

вого ряда». В третьем ряду таблицы представлены примеры симметрии для тектонических сдвигов и разломов (здесь автор использовал свои исследования в каменноугольных породах Рурской области). Четвертый ряд таблицы содержит изображения и симметричные характеристики тектонических складок (волнообразных, скрученных, куполообразных, равнобочных, опрокинутых и др.).

В конце статьи, солидаризуясь с М. С. Патерсоном и Л. Е. Вейсом, автор приходит к следующему выводу: «Строгая классификация исследуемых структурных элементов требует, помимо геометрии (описания), кинематики (выявления происхождения структурных элементов) и динамики (экспериментальных данных), выдвижения на первый план концепции симметрии П. Кюри для полного освещения структурно-геологических элементов» [181].

Статья М. Кирхмайера сопровождается обширным списком литературы, в котором, к сожалению, полностью отсутствуют работы русских авторов.

В отличие от М. Кирхмайера И. Ротхамель в небольшом сообщении снова поднимает вопрос об использовании принципа симметрии (а не концепции) П. Кюри при трактовке конкретных геологических образований [186].

Заканчивая обзор наиболее интересных, по нашему мнению, зарубежных публикаций, посвященных симметрии в геологии, приведем небольшую цитату из оригинальной научно-популярной статьи проф. Г. С. Амштутца «Симметрия в природе и искусстве»: «Я осмеливаюсь предсказать, что широкое применение статистической симметрии и симметрии подобия (А. В. Шубников) в последующие тридцать лет приобретут поистине огромное значение. Особенно в отношении проблем генезиса горных пород и руд точное установление степеней подобия и статистических симметрий выяснит многие нерешенные вопросы. К этому следует добавить, что любое сопоставление геохимических кривых распределения относится к исследованиям симметрии подобия» [172].

В настоящее время, как уже отмечалось выше, круг ученых, интересующихся и использующих симметричные понятия в области геологических исследований, непрерывно расширяется. Существенный вклад в это дело вносят специальные совещания и конференции, на которых заслушиваются многочисленные доклады и широко обсуждаются проблемы геологической симметрии.

О том, что наши геологи хорошо сознают важность применения симметричных понятий в сфере их исследований, лучше всего свидетельствует следующая цитата из монографии «Проблемы развития советской геологии»: «В настоящее время определилась необходимость вывода полных групп структур горных пород и формаций. Такие выводы не могут быть сделаны, минуя учение о симметрии, значение которого, вслед за В. И. Вернадским, сознается за пределами традиционной для этого учения области минералогии...» [102, с. 91].

Этим знаменательным высказыванием мы и закончим наш обзор литературы о симметрии в геологии.

---

## СИММЕТРИЯ ЗЕМЛИ КАК ПЛАНЕТЫ

Обзор законов симметрии, проявляющихся на конкретных геологических объектах, следует начать с рассмотрения вопроса о симметрии Земли как планеты в целом. Ведь именно Земля как планета является наиболее высокой таксономической категорией в существующей классификации морфологических геотекстур земного рельефа [102, с. 237].

Форма Земли, отождествлявшаяся прежде с идеальным шаром (отсюда и название «земного шара»), позднее уподоблялась эллипсоиду вращения, трехосному эллипсоиду, геоиду. Наблюдения с помощью искусственных спутников установили ее принадлежность к кардиоиду или кардиоидальному эллипсоиду, в котором южное полушарие более сжато, чем северное.

Однако, как увидим далее, ряд характерных явлений, наблюдающихся на поверхности Земли, обусловлен ее близостью к шару и эллипсоиду. Поэтому приступая к выявлению симметрии нашей планеты в целом, нам придется учесть и симметрию идеального шара, и симметрию эллипсоида вращения и трехосного эллипсоида, и симметрию более сложных фигур [145, с. 95; 149, с. 164—171].

Как согласовать между собой эти различные виды симметрии, относящиеся к одному и тому же объекту — фигуре Земли?

Очевидно, что здесь мы имеем прежде всего дело с различной точностью измерений и соответственно определений вида симметрии. В принципе точность измерений может возрасти бесконечно. Абсолютная точность, строго говоря, недостижима, а любые измерения носят в той или иной мере приближенный характер. Несомненно, что наши представления о фигуре Земли будут и дальше уточняться и чем точнее будут измерения, тем менее симметричной будет оказываться эта фигура.

Таким образом, упоминаемые далее различные виды симметрии фигуры Земли отражают различные степени приближения к объективной реальности. Вместе с тем важно заметить, что каждая из этих степеней приближения имеет вполне определенный физический смысл, а сопоставление их позволяет проанализировать динамику формирования фигуры Земли, т. е. природу формирующих ее сил.

Приближение фигуры Земли к сферической форме обусловлено гравитационным полем Земли, т. е. притяжением всех составляющих

ее материальных частиц друг к другу. Если бы было возможно изолировать Землю от влияния всех внешних факторов, в том числе и от гравитационного воздействия всех других космических тел, и остановить все ее движения, то под воздействием собственного гравитационного поля Земля рано или поздно приняла бы форму идеального шара. Таким образом, приближение фигуры Земли к сферической форме отражает действие собственного гравитационного поля Земли.

Приближение фигуры Земли к форме эллипсоида вращения обусловлено вращением Земли вокруг ее географической оси. Возникающие при вращении центробежные силы растягивают Землю в экваториальной плоскости. Если бы на Землю воздействовало только ее собственное гравитационное поле и единственным ее движением было вращение вокруг оси, то она имела бы форму идеального эллипсоида вращения. Таким образом, приближение фигуры Земли к форме эллипсоида вращения отражает взаимодействие собственного гравитационного поля Земли с центробежными силами, вызываемыми ее вращением.

Количественное выражение отклонения земного эллипсоида от сферической формы, определяемое отношением разности экваториального и полярного радиусов Земли к экваториальному радиусу, составляющее около  $1/297$ , выражает также относительное значение роли центробежных сил и собственного гравитационного поля Земли в формировании ее фигуры. Небольшая по отношению к среднему радиусу разность экваториального и полярного радиусов довольно значительна в ее абсолютном значении (около 21 км).

Рассматривая отклонения фигуры Земли от идеального эллипсоида вращения, мы должны учесть, что гравитационное поле, воздействующее на любую материальную точку Земли и играющее, как мы видели, наиболее существенную роль в формировании этой фигуры, включает в себя кроме собственного гравитационного поля Земли гравитационные воздействия всех других космических тел, причем наиболее значительны воздействия Солнца и Луны.

Аналогичным образом мы должны учесть, что вращение Земли вокруг собственной оси отнюдь не единственное ее движение, воздействующее на форму.

Рассмотрим взаимодействие гравитационных и центробежных сил, воздействующих на Землю, движущуюся по ее околосолнечной орбите (рис. 15).

В системе Солнце — Земля действуют те же гравитационные и центробежные силы, с которыми мы имели дело, рассматривая взаимодействие собственного гравитационного поля Земли и центробежных сил, связанных с ее вращением. На рис. 15 Земля может рассматриваться как часть вращающегося диска, совпадающего с плоскостью эклиптики, испытывающая растяжение под влиянием противоположно ориентированных центробежных (инерционных) и центростремительных (гравитационных) сил. И те и другие имеют максимальное значение на линии, проходящей через центры Солнца и Земли. В то же время величины их одинаковы, чем и обуслови-

вается устойчивое нахождение Земли на орбите. Поэтому их взаимодействие направлено на придание земной сфере формы эллипсоида, удлинённого вдоль оси системы Солнце — Земля, а земному эллипсоиду — формы трехосного эллипсоида.

Аналогичное воздействие на форму Земли оказывают гравитационные и инерционные силы, проявляющиеся в системе Земля — Луна.

Вхождение Земли в системы Солнце — Земля и Земля — Луна обуславливает воздействие на нее гравитационно-инерционных силовых полей, обладающих симметрией эллипсоидов вращения, удлинённых вдоль осей вращения, совпадающих соответственно с осями этих систем

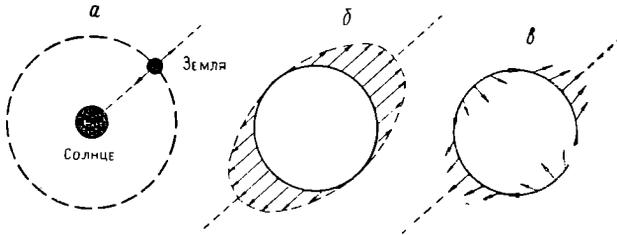


Рис. 15. Схемы гравитационно-инерционного растяжения Земли вдоль оси Солнце — Земля (а), распределения приливообразующих сил на сферической недеформируемой Земле (б) и перемещений материальных точек поверхности Земли под действием приливообразующих сил (в).

Полные величины сил, растягивающих Землю вдоль осей Солнце — Земля и Земля — Луна, равны величинам центробежных сил, действующих в соответствующих системах и уравновешиваемых гравитационными взаимодействиями. Они могут быть определены по формуле гравитационного взаимодействия  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ . Соответственно растягивающая сила, действующая на Землю вдоль оси Солнце — Земля составляет около  $3,5 \cdot 10^{27}$ , вдоль оси Земля — Луна —  $2 \cdot 10^{25}$  дин.

Обычно рассматривая причины растяжения Земли вдоль осей Солнце — Земля и Земля — Луна, исследователи [117 и др.] анализируют различия гравитационного воздействия Солнца и Луны на материальные точки (единичные массы) вещества Земли, расположенные на различном расстоянии от Луны или Солнца. Масса, находящаяся на поверхности Земли на стороне, обращенной к Солнцу (Луне), притягивается Солнцем (Луной) с большей силой, чем такая же масса на противоположной стороне. Разность сил, действующих на эти точки, представляет собой растягивающую силу, действующую между ними. Исходя из этого факта, можно, исследуя распределение гравитационных воздействий на различные точки тела Земли, определить интегральные значения растягивающих сил, действующих в теле Земли вдоль осей Солнце — Земля и Земля — Луна.

Однако проще это сделать непосредственно исходя из приведенного выше соображения о том, что устойчивое положение Земли и Луны на их орбитах обусловлено равенствами сил гравитационного притяжения и противодействующих им центробежных сил, удерживающих рассматриваемые тела от падения друг на друга.

В предыдущем рассуждении мы пренебрегли изменениями расстояний от Солнца и Луны до Земли, выраженными, в частности, в эллиптичности земной и лунной орбит. Эти изменения должны рассматриваться как свойственные любым механическим системам колебания около положения равновесия. Эллиптичность орбит соответствует основным тонам этих колебаний. Обертоны выражаются наложением на эллиптические орбиты синусоидальных отклонений различных порядков. Рассмотрение симметрии всех этих колебаний несложно, и мы здесь на нем не останавливаемся.

До сих пор рассматривая силы, определяющие фигуру Земли, мы принимали во внимание только гравитационные и инерционные силы, так или иначе воздействующие на Землю. При этом мы не учитывали действия в веществе Земли электромагнитных сил взаимодействия материальных частиц, соединяющих в твердые, жидкие и газообразные тела, отдельные атомы, ионы и молекулы и обеспечивающих устойчивость атомов, связывая электронные оболочки с ядром\*.

В предшествующем обзоре этими силами можно было пренебречь, поскольку нас интересовал лишь характер симметрии фигуры Земли, но не ее размеры, и поскольку постоянный характер собственного гравитационного поля Земли и ее собственного вращения позволял нам молчаливо допускать бесконечную длительность формирования фигуры Земли. Если бы не эти обстоятельства, то нам уже раньше пришлось бы отметить, что размеры фигуры Земли отражают взаимодействие между гравитационным полем, сжимающим Землю, и полем электромагнитных сил упругости, противодействующих сжатию.

Если бы гравитационное поле не встречало противодействия электромагнитных сил, то оно сжимало бы Землю бесконечно или, по крайней мере, разрушило бы все атомы (а, следовательно, и все сооружения из них).

Также пришлось бы еще раньше отметить, что для превращения Земли под действием собственного гравитационного поля в идеальный шар (если она не обладала такой формой первоначально) потребовалось бы очень продолжительное (практически бесконечное) время, необходимое для разрушения (перестройки) электромагнитных связей между материальными частицами, слагающими выступы Земли над поверхностью шара, и вообще для перераспределения вещества Земли, соответствующего симметрии ее собственного гравитационного поля. Во взаимодействии друг с другом атомов, ионов и молекул,

---

\* Не учтены также появляющиеся внутри атомных ядер ядерные силы и так называемые слабые взаимодействия, но их мы не будем касаться и в дальнейшем, поскольку их влияние на фигуру Земли незначительно и проявляется через электромагнитные силы.

образующих все геологические тела, гравитационные силы имеют количественные значения во много порядков меньше, чем электромагнитные, и сами по себе не смогли бы произвести необходимое перераспределение вещества Земли. Реально осуществляющееся перераспределение (процессы денудации — аккумуляции на поверхности и миграция подвижных фаз внутри твердого тела Земли) протекает сравнительно быстро, благодаря тому, что помимо собственного гравитационного поля, задающего сферичность Земли, на последнюю воздействуют другие силовые поля, разрушающие или перестраивающие электромагнитные связи в твердых телах и тем самым способствующие перераспределению вещества Земли под воздействием гравитационного поля.

В частности, контролируемые гравитационным полем процессы денудации — аккумуляции на поверхности Земли не могли бы иметь

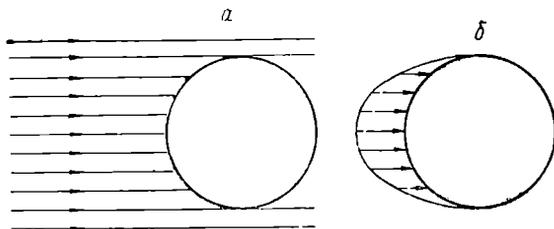


Рис. 16. Поле солнечной радиации в окрестностях Земли — симметрия цилиндра (а) и распределение солнечной радиации, поглощаемой поверхностью Земли, — симметрия конуса (б).

сколько-нибудь существенные скорости без переменного воздействия солнечной радиации. Это воздействие, обуславливающее перестройку электромагнитных связей в атмосфере, гидросфере и на поверхности твердого тела Земли, обеспечивает энергией инсоляцию, дефляцию, эрозию и т. д. и вызывает перемещение огромных масс в атмосфере и гидросфере.

Симметрия воздействующего на Землю поля солнечной радиации соответствует, очевидно, симметрии конуса, ось которого совпадает с осью Солнце — Земля (рис. 16). Симметрия солнечной радиации, поглощаемой Землей, также соответствует симметрии конуса. Благодаря сферичности поверхности Земли плотность солнечной энергии, падающей на нее, распределяется по синусоидальному закону  $E = E_0 \sin \varphi$ , где  $E$  — солнечная энергия, падающая на единицу площади поверхности Земли,  $E_0$  — то же при вертикальном падении солнечных лучей;  $\varphi$  — угол между солнечными лучами и поверхностью Земли. Величина поглощаемой Землей части солнечной энергии также зависит от  $\varphi$ ,  $E_a = KE \sin \varphi = KE_0 \sin^2 \varphi$ , где  $E_a$  — солнечная энергия, аккумулируемая единицей площади,  $K$  — коэффициент аккумуляции (поглощения). Следовательно, обра-

зующие конусов солнечной радиации, падающей на Землю и поглощаемой ею, имеют синусоидальный характер.

Собственно гравитационное поле Земли и поле центробежных сил, обусловленных ее вращением, жестко связаны с веществом Земли (с достаточной для данного рассмотрения точностью можно считать, что векторы этих полей в каждой материальной точке Земли постоянны и по направлению и по величине). В то же время силовые поля, обусловленные вхождением Земли в системы Солнце — Земля и Земля — Луна, не имеют такой связи. Вследствие «собственного» вращения Земли оси этих полей проскальзывают по ее телу, отражаясь на поверхности в виде пробегающих по ней волн лунно-солнечных приливов. В фиксированных точках поверхности Земли такое проскальзывание предстает в виде приливно-отливных движений, повторяющихся с определенной периодичностью. В силу значительной разницы в подвижности литосферы и гидросферы человечество с незапамятных времен знакомо с приливно-отливными движениями вод Океана. В настоящее время специальными геофизическими исследованиями установлено, что эти движения испытывает и литосфера, причем амплитуды их достигают нескольких дециметров. Имеются достоверные данные о приливно-отливных движениях подземных вод. Интенсивно исследуются приливно-отливные движения атмосферы [136].

Аналогично гравитационно-инерционным силовым полям, обуславливающим приливно-отливные движения в веществе Земли, проскальзывает по телу Земли и поле солнечной радиации. В настоящее время установлены связанные с этим проскальзыванием приливные движения в атмосфере — «температурные приливы» [136]. Можно предполагать, что в дальнейшем из состава приливных движений гидросферы будет выделена часть, аналогичная температурным приливам атмосферы.

Изменения фигуры Земли, связанные с воздействием силовых полей, проскальзывающих по ее телу, означают перестройку электромагнитных связей в веществе Земли, а всякая такая перестройка сопровождается возникновением в веществе звуковых, в частности сейсмических волн. Сами приливно-отливные движения вещества Земли являются, в сущности, вынужденными звуковыми колебаниями Земли, частоты и скорости распространения которых заданы скоростями ее вращения относительно осей систем Солнце — Земля и Земля — Луна.

Периоды приливных колебаний (23 ч для солнечных приливов и 14,5 — для лунных) более чем в 10 раз превышают период основного тона собственных колебаний Земли, составляющего несколько менее 1 ч [117]. Поэтому приливы не вызывают резонансных явлений и не могут разорвать Землю. Вместе с тем они представляют собой непрерывно протекающую гигантскую деформацию всей Земли, и поглощение веществом Земли даже незначительной части энергии, обеспечивающей эту деформацию, может приводить к накоплению веществом энергии, достаточной для реализации разнообразных

геологических явлений. По-видимому, они являются одним из существеннейших энергетических источников для этих явлений.

Связанные с приливо-отливными движениями изменения напряженного состояния вещества Земли вызывают возникновение звуковых волн (волн напряжений), соответствующих собственным частотам Земли в целом и ее оболочек. Эти волны распространяются во все стороны от осей симметрии приливов со скоростями, соответствующими скоростям звука в средах, по которым распространяются волны. Энергии этих волн незначительны. Возможно, что эти волны находят отражение в составе микросейсм, фиксирующихся в качестве фона при любых сейсмических наблюдениях. Однако постоянно пронизывая все тело Земли и в силу ограниченности Земли, интерферируя внутри нее и на ее поверхности, они могут обусловить формирование правильных (симметричных) сеток планетарной трещиноватости, привлекающих внимание многих исследователей [20, 56, 75].

С интерференцией звуковых волн в теле Земли, с возникновением в нем правильной системы узловых радиусов может быть связано некоторое приближение фигуры Земли к полиэдрической форме [13, 72].

На возможную роль стоячих волн собственных колебаний Земли в формировании фигуры Земли и отдельных деталей этой фигуры обратил внимание В. А. Пирогов [89].

В связи с несовпадением экваториальной плоскости Земли с плоскостью эклиптики оси симметрии силовых полей приливов и солнечной радиации, проскальзывая по телу Земли, совпадают с экваториальной плоскостью только 2 раза в год, совершая в течение года колебания относительно нее с амплитудой в  $47^\circ$ .

С наклоном земной оси к плоскости эклиптики связана антисимметрия распределения времен года на Земле. Благодаря годичному обращению Земли вокруг Солнца распределение климатических зон оказывается симметричным относительно экваториальной плоскости.

Переходим далее к попытке охарактеризовать симметрию Земли в целом с помощью формул симметрии, хорошо известных нам по учебникам кристаллографии.

Помимо вышесказанного, здесь необходимо также принять во внимание замечание А. В. Шубникова, неоднократно отмечавшего, что одно и то же реальное тело «может иметь различную симметрию, в зависимости от изучаемого свойства или явления» [160, с. 162]. В качестве иллюстрации напомним, что симметрия правильно развитого кристаллического многогранника отвечает одному из 32 видов конечной кристаллографической симметрии, тогда как симметрия его оптических свойств и явлений теплопроводности характеризуется симметрией шара  $\infty L_\infty \infty PC - \infty/\infty m$ , эллипсоида вращения  $L_\infty \infty L_2 \infty PPC - \infty/m m$  или трехосного эллипсоида  $3L_2 3PC - m m m$ . Описание симметрии структуры все того же кристалла требует учета элементов бесконечной симметрии (трансляций, винтовых осей симметрии, плоскостей скользящего отражения).

Наконец, внешняя (видимая) симметрия реального кристаллического тела обычно отличается от его идеальной (истинной) симметрии, неся на себе отпечаток симметрии кристаллообразующей среды (см. гл. 6).

Высказывания А. В. Шубникова относились преимущественно к кристаллам, однако именно такой подход является целесообразным по отношению к любым реальным телам вообще и к земному шару, в частности. При этом необходимо учитывать универсальный принцип симметрии П. Кюри, играющий огромную роль в области явлений окружающего нас мира.

Исходя из вышесказанного, остановимся прежде всего на обобщенной симметрии внешней формы нашей планеты. К числу формообразующих факторов земного тела следует отнести силу земного тяготения, воздействие космического гравитационного поля, однанадцатая различных видов движений Земли, деформации земной коры, связанные с перетеканием подкорового вещества и др. [157].

Из перечисленных два фактора сыграли и продолжают играть доминирующую роль в деле формирования земного геоида — это сила земного тяготения и центробежная, обусловленная вращением Земли вокруг своей оси. Под влиянием первой силы Земля стремится принять шаровую форму. Вторая сила придает ей форму несколько сплюсненного вдоль оси вращения одноосного эллипсоида (сфероида).

Суммарное воздействие силы земного тяготения можно идеализированно изобразить в виде пучка бесчисленного множества одинаковых стрелок (векторов), направленных к одной общей точке — центру Земли. Симметрия такого пучка, так же как и симметрия идеального и неподвижного шара, отвечает бесчисленному множеству осей симметрии бесконечного порядка (осей вращения) и бесчисленному множеству плоскостей симметрии, пересекающихся в одной точке — центре шара:  $\infty L_{\infty} \infty PC (\infty/\infty m)$ .

Проявляется ли реально указанная симметрия на земном шаре и если проявляется, то в чем?

Прежде всего мы видим ее проявление в общей форме Земли, весьма близкой к шару. Кроме того, влияние этой симметрии ярко сказывается на внешней форме всех объектов, находящихся на поверхности Земли и испытывающих воздействие земного тяготения (внутри твердых тел электромагнитные силы несоизмеримо больше гравитационных).

Поясним вышесказанное. Хорошо известно, что видимая симметрия природных объектов в подавляющем большинстве случаев отвечает либо  $P - m$  (листья и ветви деревьев, насекомые, птицы, животные, а в том числе и мы сами), либо  $L_n n P - nm$  (цветы с чашечкой, обращенной вверх, грибы, деревья и т. д.).

Классифицируя эти явления, можно сформулировать следующий общий закон, повсеместно проявляющийся в природе: все то, что растет или движется по вертикали, т. е. вверх или вниз относительно земной поверхности, имеет симметрию типа  $L_n n P - nm$  или

соответствующих подгрупп  $L_n - n, P - m, - -1$ . Все то, что растет и движется горизонтально или косо по отношению к земной поверхности, характеризуется симметрией  $P - m$  или  $- -1$ .\*

Наглядную иллюстрацию к сказанному мы находим на примере симметрии цветов (закон Г. Спенсера): цветочные чашечки, обращенные кверху (крестоцветные, розоцветные и др.), подчиняются симметрии  $L_n n P$ ; в то же время цветы, расположенные на стебле сбоку (орхидеи, мотыльковые, губоцветные), обладают, подобно листьям, только одной плоскостью симметрии  $P$  [68, с. 22].

В чем же кроется объяснение столь широкого распространения двух типов симметрии.

Все вокруг нас находится в поле земного тяготения и, следовательно, должно неизменно нести на себе отпечаток его воздействия. Примем какую-либо точку земной поверхности за исходную и изобразим действие на нее земного тяготения в виде вертикальной стрелки, направленной острием вниз.

Вокруг исходной точки находится бесчисленное множество других точек земной поверхности, на которые также действует сила земного тяготения. Следовательно, изображенную стрелку следует окружить бесконечным множеством аналогичных стрелок, направленных к центру земного шара и образующих в совокупности конус. Ясно, что симметрия стрелки над исходной точкой с учетом всех окружающих стрелок отвечает симметрии конуса  $L_\infty \infty P$ . Такая симметрия строго согласована с шаровой симметрией Земли: ось симметрии бесконечного порядка  $L_\infty$  конуса совпадает с одним из диаметров шара, также являющимся осью симметрии бесконечного порядка, а бесчисленные плоскости симметрии конуса совпадают с бесчисленными плоскостями симметрии шара, пересекающимися в одной из точек на его поверхности.

Итак, любая точка земной поверхности под влиянием силы земного тяготения получает «симметрию конуса», которая и налагает свой отпечаток на симметрию каждого тела, находящегося в данной точке.

С одной стороны, все то, что растет в вертикальном направлении, не сходя с какой-либо точки земной поверхности, обязательно совпадает с осью симметрии бесконечного порядка, проходящей через упомянутую точку и лежащую на стыке бесчисленного множества плоскостей симметрии, пересекающихся в ней. Симметрия  $L_\infty \infty P - \infty m$  и накладывает свой отпечаток на внешнюю (видимую) симметрию объекта, получающую в общем вид симметрии

---

\* Само собой разумеется, что при обсуждении частных случаев проявления этого закона необходимо учитывать местные факторы, оказывающие влияние на формирование природных тел. В качестве примера напомним искривление деревьев под влиянием ветра, симметрию потока воды, стекающего вниз по плоской трещине, и т. д.

$L_n n P$  — *nm*. В частных случаях при более низкой собственной симметрии объекта возникают подгруппы вида  $L_n n P$  ( $nm$ ), а именно  $L_n$  ( $n$ ),  $P$  ( $m$ ) и  $—(1)$ .

С другой стороны, все то, что растет или передвигается по горизонтали и вкось, отклоняется от вертикальной  $L_\infty$ , но обязательно совпадает с одной из бесчисленных вертикальных плоскостей симметрии. Эта плоскость симметрии и накладывает свой отпечаток на листья, ветки, животных и насекомых.

Так объясняется универсальный закон симметрии, царящий на земной поверхности и обусловленный шаровой симметрией сил земного тяготения. Отметим, что этому всеобщему закону подчиняется не только органический мир, но и каменный природный материал, а именно кристаллы, главная ось которых ориентирована во время роста вертикально или косо относительно горизонтальной плоскости (см. гл. 6).

Мы сознательно идеализировали проявление силы земного тяготения, игнорируя отклонения реального геоида от идеального шара и не учитывая фактов неодинакового ускорения силы тяжести на разных полушариях. Однако несмотря на это, рассмотренные выше закономерности показывают, что подобная идеализация является вполне правомерной и что симметрия природных явлений на земной поверхности достаточно хорошо согласуется с симметрией идеального и даже неподвижного шара.

Далее перейдем к рассмотрению воздействия силы вращения Земли вокруг своей оси на симметрию формы и поверхности нашей планеты. Как известно, эта сила придает ей форму эллипсоида вращения.

Симметрия неподвижного эллипсоида вращения  $L_\infty \infty L_2 \infty PPS$  ( $\infty/mm$ ). Ось симметрии бесконечного порядка  $L_\infty$  совпадает с малой осью земного сфероида; оси симметрии второго порядка  $L_2$  лежат в плоскости экватора; плоскости симметрии  $P$  проходят по меридиональным плоскостям; плоскость симметрии  $\Pi$  отвечает экваториальной плоскости. Необходимо, однако, учесть воздействие самого вращения Земли вокруг ее оси на симметрию тела планеты. Для того чтобы объяснить воздействие вращения на симметрию любого тела, воспользуемся нижеследующим наглядным примером из известной книги А. В. Шубникова «Симметрия»: «Представим себе деревянный конус, боковая поверхность которого оклеена сукном. Если такой конус, зажав в патрон токарного станка, привести во вращение вокруг своей оси и хорошо «причесать» на ходу щеткой, то после такой обработки конус потеряет все свои плоскости симметрии, так как ворс сукна будет иметь вполне определенное направление. В зависимости от направления вращения токарного станка мы получим либо правый, либо левый конус. Поверхность вращающегося или «ворсистого» конуса анизотропна, т. е. обладает по разным направлениям разными свойствами. Когда мы проводим рукой по поверхности сукна, то испытываем различное трение в зависимости от направления движения руки. То же можно сказать и про

поверхность вращающегося конуса: если мы будем проводить по ней рукой по направлению вращения или против него, то испытаем неодинаковое сопротивление движению руки» [162, с. 15].

Симметрия неподвижного конуса  $L_\infty \propto P (\infty m)$ , где ось бесконечного порядка (ось вращения) совпадает с осью конуса, а плоскости симметрии направлены вдоль этой оси. Как показал А. В. Шубников, вращения конуса вокруг его оси аннулирует все плоскости симметрии. Следовательно, симметрия вращающегося конуса  $L_\infty (\infty)$ . Совершенно аналогичным образом вращение земного сфероида приводит к тому, что все плоскости симметрии, совпадающие с плоскостями меридианов, должны исчезнуть; остается лишь одна плоскость симметрии, перпендикулярная оси вращения и совпадающая с экваториальной плоскостью. В результате получаем симметрию  $L_\infty ПС - \infty/m$ . Такая симметрия отвечает одновременно вращающемуся одноосному эллипсоиду и вращающемуся вокруг одного из своих диаметров шару.

Симметрии  $L_\infty ПС (\infty/m)$  подчиняются, помимо общей формы геоида, климатическая и почвенная зональности земного шара. Большую роль в деле возникновения именно такой симметрии играет воздействие подвижных оболочек (гидросферы и атмосферы) на литосферу в условиях вращения Земли.

Отсутствие меридиональных плоскостей симметрии наглядно иллюстрируется асимметричным развитием континентальных очертаний по широтным направлениям, а также законом Бэра для берегов рек, текущих вдоль меридианов. Подчеркнем, что в отношении распределения климатических и почвенных поясов симметрия земной поверхности хорошо согласуется с симметрией эллипсоида вращения. Сказанное можно пояснить словами В. И. Вернадского: «На всей поверхности планеты в общих основных чертах, идя к экватору от северного или южного полюса, мы наблюдаем единообразное повторение процессов природных вод.

Скопления льда и снега повторяются у южного и северного полюсов; области тундр и болот, лесов холодных и умеренных широт, степей и пустынь, подтропических богатых водными осадками областей могут быть отмечены по обе стороны от экватора, в обоих полушариях, в одинаковой последовательности» [15, с. 44]. Как видим, ни о какой антиподальности или асимметрии южного и северного полушарий здесь не может быть и речи. Симметрия климатических поясов обладает центром инверсии и плоскостью симметрии, совпадающей с плоскостью экватора.

Известно, что в результате более точных определений размеров земного эллипсоида была установлена его трехосность, т. е. наличие не только полярного, но и экваториального сжатия. Симметрия неподвижного трехосного эллипсоида  $3L_2 3PC - mmm$ . Однако по Г. Н. Катгерфельду [56, 57], Земля не только трехосна, но и характеризуется асимметрией относительно плоскостей экватора, наибольшего и наименьшего меридиана. Если учесть это, то вообще говорить о каких-либо элементах симметрии земного геоида не приходится.

Он является полностью асимметричным, т. е. характеризуется совершенным отсутствием элементов симметрии (—). Отмечая асимметрию тела Земли, можно предположить, что по-видимому, «ее современная форма является лишь стадией на пути к правильному сфероиду» и что «фигура Земли стремится к сфероидальной форме, соответствующей равновесию вращающихся тел» [157, с. 13—15]. Здесь мы явно имеем дело с возникающими элементами динамической симметрии, о которых шла речь в гл. 1. При достижении равновесия тела они явятся в виде элементов классической симметрии.

С этой точки зрения полная асимметрия Земли или следы в ее форме элементов симметрии трехосного эллипсоида являются лишь временными, переходными на пути к конечной симметрии вращающегося одноосного эллипсоида или шара  $L_{\infty} PC - \infty/m$ . Как было показано выше, наиболее податливые элементы структуры земного шара — климатические и почвенные пояса — уже и сейчас почти всецело подчиняются этой симметрии. Конечно, и здесь приходится прибегать к некоторой идеализации. Отклонения от строгой закономерности вызываются, по-видимому, «блужданием оси» вращения в теле Земли [170, с. 382]. Эти же соображения следует принимать во внимание при выявлении роли активных меридианов, намеченных А. П. Карпинским и математически подтвержденных Г. Н. Каттерфельдом [54, 56, 57]. Два таких меридиана, направленных под углом в  $90^\circ$ , возникли, согласно Г. Н. Каттерфельду, благодаря тому, что подкорковый субстрат, стремясь занять правильную форму эллипсоида вращения, перетекает от плоскости меридиана наибольшей оси в плоскость меридиана наименьшей оси. С первым активным меридианом связаны тектонические опускания, а со вторым — поднятия.

Симметрия совокупности меридианов большой и малой осей экватора отвечает симметрии трехосного эллипсоида  $3L_2 3PC (mmm)$ . Очевидно, эту симметрию следует рассматривать как переходную от полного отсутствия симметрии к симметрии вращающегося одноосного эллипсоида. По-видимому, с симметрией трехосного эллипсоида связана установленная П. С. Вороновым закономерность в распределении тектонических трещин на поверхности земного шара. Увеличение и ускорение вращения Земли влечет за собой сплющивание и растягивание земной поверхности вдоль меридианов, что сказывается и на поверхностной симметрии распределения трещин, близкой к  $L_2 2P - 2mm$  [20].

До сих пор мы имели ввиду лишь симметрию общей формы геоида, не принимая во внимание деталей его поверхности. Обратимся далее к закономерностям распределения материков и океанов на земном шаре. Прежде всего вспомним диссимметрию (вернее антисимметрию) в положении природных вод на земной коре. Это явление, по В. И. Вернадскому, состоит в «резком различии двух полушарий, из которых в одном резко выражена суша, а в другом море» [15]. С точки зрения симметрии отмеченное явление характеризуется отсутствием центра инверсии. Поэтому, описывая его, следует

приведенные выше виды симметрии для неподвижного и вращающегося одноосного эллипсоида заменить следующими:  $L_{\infty} \infty P - \infty m$  (неподвижный эллипсоид без центра инверсии) и  $L_{\infty} - \infty$  (вращающийся эллипсоид без  $C$ ).

Под эту же характеристику подходит и явление «асимметрии в фигуре планеты», по Н. А. Козыреву: «Большая выпуклость южного полушария Земли по сравнению с северным; асимметрия в расположении деталей поверхности планеты, как например предпочтительное расположение материков в северном полушарии Земли и их вытянутость к югу» [58].

Нельзя ли, однако, более точно охарактеризовать отмеченную закономерность, связав воедино оба полушария Земли одним геометрическим законом? Думается, что здесь можно с успехом использовать упоминавшиеся выше понятия об антисимметрии, выдвинутые А. В. Шубниковым [164].

Возможно, что в отношении антисимметрии Земли следует приводившуюся выше симметрию вращающегося эллипсоида  $L_{\infty} PC - \infty m$  заменить видом антисимметрии  $L_{\infty} P'C' - \infty m'$ . Наличие антицентра подчеркивает здесь отсутствие центра инверсии. Антиплоскость, совпадающая с плоскостью экватора, показывает положение суши с одной стороны и воды с другой. Напомним, что суша с отмелью и материковым склоном занимает свыше 42% земной поверхности, а ложу мирового океана принадлежит площадь в 56%, т. е. приблизительно половина земного шара отвечает суше, а другая его половина покрыта водой. С этим же видом антисимметрии хорошо согласуются округлые очертания суши вокруг южного полюса (Антарктида) и океана вокруг северного полюса (Северный Ледовитый океан).

Следует отметить, что вышеуказанный вид антисимметрии  $L_{\infty} P'C' (\infty m')$  проявляется и в отношении глобального рельефа Земли на суше. П. С. Воронов на основании морфометрических параметров материков подразделил их на два семейства: семейство южных материков (Австралия, Антарктида, Южная Америка, Африка) и северных (Европа, Северная Америка, Азия). Такое подразделение явно согласуется с известной гипотезой, согласно которой северные материк являются осколками древнего материка Лавразии, а южные — древнего континента Гондваны [21].

Та же антисимметрия  $L_{\infty} P'C'$  намечается и в гидрогеологии. Согласно Н. И. Толстихину: «Симметрия Земли выражается в том, что поясам артезианских бассейнов северного полушария отвечают пояса южного полушария. Антисимметрия Земли выражается в том, что строение каждого пояса северного полушария отличается от соответствующего ему пояса южного полушария» [122, с. 29].

Перейдем к рассмотрению закономерностей распределения материков и океанов. Для этого воспользуемся следующими положениями Дж. Грегори [24].

1. В северном полушарии преобладают материки, в южном — океаны.

2. Формы основных материков и океанов отвечают треугольникам. Треугольники материков основаниями обращены к северу, а суживающимися концами — к югу, тогда как океанические треугольники обращены широкой стороной к югу и суживаются к северу.

3. Прямая линия, проходящая через центр Земли и повстречавшая по одну сторону от центра сушу, в подавляющем большинстве случаев по другую сторону от центра встретит воду. Если катить глобус по столу, то когда на вершине катящегося глобуса находится суша, точка, прикасающаяся к столу, почти всегда оказывается водой. Каждый материк антиподален какому-нибудь океану.

Пользуясь понятиями учения о симметрии, можно сказать, что поверхность земного шара имеет не центр, а антицентр инверсии. Именно такому отсутствию центра инверсии соответствует и уже упоминавшееся понятие антисимметрии планеты, выдвинутое Н. А. Козыревым.

В 1958 г. Б. Л. Личков и И. И. Шафрановский отметили, что закономерности, сформулированные Дж. Грегори, а также парадоксальное, казалось бы, совпадение углов для критических параллелей М. В. Стюаса с характерными углами кубического кристалла могут быть

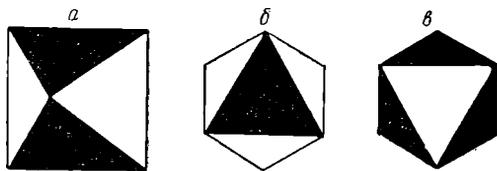


Рис. 17. Октаэдр с белыми и черными гранями.

наглядно, но, конечно, весьма приблизительно охарактеризованы сугубо идеализированной геометрической моделью в виде комбинаций двух одинаково развитых правильных тетраэдров, в которых одна из тройных осей совпадает с осью земного вращения [72]. Понятие о подобной комбинации дает модель «октаэдра», грани которого попеременно окрашены в два цвета. На рис. 17, а изображен такой «октаэдр» с белыми и черными гранями. Грани белого цвета принадлежат одному тетраэдру, грани черного цвета — другому. Данная модель наглядно иллюстрирует перечисленные выше особенности земной поверхности. Пусть белые грани модели условно изображают сушу, а черные — океаны. Положим наш «октаэдр» на стол так, чтобы с плоскостью стола совпала одна из белых граней. При этом противоположная ей черная грань окажется поверху в горизонтальном положении, а тройная ось симметрии, перпендикулярная обеим этим граням, примет вертикальное положение. Верхняя черная грань изобразит при этом Северный Ледовитый океан, белая грань, совпавшая с плоскостью стола, — Антарктиду.

Глядя сверху на модель, мы видим вокруг верхнего черного треугольника три обращенные вверх наклонные белые треугольные грани (рис. 17, б). Это материки: Америка (Северная и Южная), Евразия и Азия. Как и требует вторая из вышеприведенных

закономерностей, по Дж. Грегори, основания белых треугольников обращены вверх (к северу), а вершины — вниз (к югу). Перевернув модель, мы увидим вокруг центрального белого треугольника (Антарктида) три наклонных черных треугольника, отвечающих океанам (рис. 17, е). Их расположение вполне соответствует характеристике Дж. Грегори. Само собой разумеется, что раскрашенный таким образом двухцветный «октаэдр» не обладает центром инверсии и тем самым хорошо иллюстрирует антиподальность материков и океанов. При углубленной трактовке вышеописанной модели можно широко использовать идеи акад. А. В. Шубникова об антисимметрии или двухцветной симметрии, представив, например, белые грани выпуклыми, а черные — вогнутыми.

Вышеупомянутый черно-белый «октаэдр» характеризуется следующей совокупностью элементов симметрии и антисимметрии:  $3L_4'(3L_{i_4})4L_36L_23P'6PC' - m'3m$  (обычная симметрия для такого двухцветного многогранника с учетом разницы его граней отвечает симметрии тетраэдра  $3L_{i_4}4L_36P - \bar{4}3m$ ; симметрия обычного октаэдра с одноцветными гранями соответствует  $3L_44L_36L_29PC - m3m$ ).

Само собой разумеется, что рассмотренная нами геометрическая фигура, в какой-то мере напоминающая старинные гипотезы о полиэдричности Земли (см. с. 25, 26), является сугубо идеализированной вспомогательной моделью. Однако все же эта модель наглядно выявляет основные закономерности в распределении воды и суши на земной поверхности. Сказанное относится, конечно, и к формулам симметрии — антисимметрии для данного многогранника. О некоторой согласованности симметрии черно-белого «октаэдра» с симметрией сфероида свидетельствует совпадение тройной оси симметрии первого с осью вращения Земли ( $L_3$  вышеупомянутого «октаэдра» является осью высшего наименования, так как его четвертные антиоси совпадают с двойными осями простой симметрии)\*.

Нами рассмотрен целый ряд различных характеристик земного шара в отношении его симметрии. Противоречат ли друг другу эти характеристики? Напомним еще раз, что одно и то же реальное тело может получить различную симметрию в зависимости от тех свойств или явлений, которые принимаются во внимание. Поэтому приведенные выше различные группы симметрии имеют вполне реальное значение и не зачеркивают друг друга.

Резюмируя вышеизложенное, мы приходим к следующим выводам.

Земной шар, так же как и любое реальное тело, характеризуется различной симметрией в зависимости от изучаемых свойств и явлений. При установлении симметрии таких свойств и явлений необходимо исходить из универсального принципа симметрии П. Кюри.

Общее действие земного тяготения обуславливает геометрию большинства природных явлений на земной поверхности, подчиня-

---

\* Интересные доводы в пользу геометрических моделей форм Земли приведены В. И. Васильевым [12].

ющихся симметрии неподвижного шара  $\infty L_{\infty}^{\infty} \infty PC - \infty/\infty m$ . Климатическая и почвенная зональности характеризуются симметрией неподвижного эллипсоида вращения  $L_{\infty} \infty L_2 \infty PPC - \infty/mm$ , а точнее — симметрией вращающегося шара или одноосного эллипсоида  $L_{\infty} PC - \infty/m$ . Совокупность критических меридианов и параллелей земного шара обладает симметрией неподвижного трехосного эллипсоида  $3L_2 3PC - mmm$ .

Для характеристики «диссимметрии» [15] или «асимметрии» планеты [58] следует использовать понятия антисимметрии А. В. Шубникова ( $L_{\infty} P'C' - \infty/m'$ ).

Идеализированной моделью распределения суши и воды на земном шаре может служить черно-белый «октаэдр» (комбинация двух тетраэдров) с антисимметрией  $3L_4'(3L_{i4})4L_3 6L_2' 3P' 6PC' - m'3m$ . Большинство этих видов симметрии является, быть может, переходными ступенями на пути к идеальной симметрии вращающегося одноосного эллипсоида или шара с симметрией  $L_{\infty} PC - \infty/m$  (без учета суши и воды) или с антисимметрией  $L_{\infty} P'C' - \infty/m'$  (с учетом распределения основной массы материков и океанов).

В нашем обзоре мы ограничились лишь самыми обобщенными схемами, трактующими симметрию Земли в наиболее упрощенном и сугубо идеализированном виде. Многие из вышесказанного является общеизвестным, однако, думается, что и в таком виде некоторые стороны вопроса еще недостаточно учитываются, хотя и представляют несомненный интерес.

Сейчас проблема уточнения и детализации симметричных особенностей земного кардиоида привлекает внимание многочисленных исследователей, активно выступающих с новыми выводами и гипотетическими построениями.

---

## СИММЕТРИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

При рассмотрении структур земной коры, изучаемых с помощью разнообразных геологических исследований, обнаруживается множество проявлений симметрии. Определенные законы симметрии свойственны как элементам той или иной исследуемой структуры (структурным формам), так и сочетаниям этих элементов (структурным рисункам, или собственно структурам).

Рассматривая структуру как сочетание структурных форм, необходимо иметь в виду условность отнесения того или иного структурного объекта к таким формам. В зависимости от масштаба, в котором рассматривается объект, т. е. от уровня организации вещества Земли, на котором ведется исследование, один и тот же объект может выступать и в качестве элемента структуры и в качестве самой исследуемой структуры. Так, например, геосинклинальный прогиб при рассмотрении структуры земной коры в целом или крупного ее сегмента выступает в качестве элемента исследуемой структуры. В то же время он сам обладает структурой, в которой при более детальном исследовании выделяются элементы (структурные формы) меньших размеров, в свою очередь обладающие структурой еще более низкого уровня организации и т. д.

Кроме различий размеров геологических структур обычно учитываются различия в способе образования тех или иных структур, различают их генетические типы: седиментогенные, тектонические, метаморфогенные и др. Генетические условия, разумеется, находят отражение в симметрии структурных форм и структур, возникающих в различных условиях, однако симметрия вообще свойственна структурам любого происхождения и в сопоставлении симметрии структуры и ее генезиса следует исходить из особенностей симметрии, основывая на них генетические представления, но ни в коем случае не наоборот.

Основным элементом структуры осадочных толщ земной коры является слой.\* Решающая роль в формировании слоистой структуры (или текстуры) осадков принадлежит гравитационному полю Земли.

---

\* При рассмотрении таких толщ в относительно мелком масштабе в качестве элемента структуры могут выступать пласт, пачка и другие геометрически подобные слою геологические тела, в относительно крупном — слоек, микрослой и др.

Структурные ограничения слоя ориентируются в плоскости, нормальной к направлению силы тяжести. Отклонения структурных ограничений слоев от горизонтального положения (в период образования осадков: косая слоистость, знаки ряби, волноприбойные знаки и др.) всегда связаны с существенным воздействием на формирующий осадок других силовых полей, в частности с интенсивным механическим движением среды, из которой выпадает осадок.

Наиболее резкое отклонение структурных ограничений осадочных образований от горизонтального положения наблюдается при образовании конкреций. Сферическая форма конкреций отражает резкое преобладание энергии химического взаимодействия (электростатических кулоновых сил), проявляющегося при их образовании, над энергией гравитационного поля. При сопоставимых значениях энергии гравитационного поля и поля электростатических сил конкреции могут быть в различной мере уплотнены. Обычно сингенетические конкреции располагаются в осадке слоями или, точнее, занимают какую-то часть объема определенного слоя осадка. В отличие от обычного слоя, рассматриваемого нами в качестве непрерывно-однородного, слой с конкрециями наглядно неоднороден и его неоднородность отражает неоднородность (градиентный характер) поля кулоновых сил, в котором формировался этот слой. Соответственно, симметрия распределения конкреций в слое отражает симметрию неоднородности поля кулоновых сил.

Существенно, что, строго говоря, неоднородность строения слоев является более общим свойством, чем однородность. Слой, рассматриваемый нами в качестве однородного, на самом деле всегда неоднороден. В песчаниках, например, промежутки между песчинками заполнены цементом, отличающимся по своим свойствам от вещества песчинок. Даже в полнокристаллических мономинеральных породах (кварцитах, мраморах и др.) свойства вещества на границах кристаллических индивидов отличаются от свойств вещества внутри этих индивидов. В этом свете однородное строение слоя предстает в качестве частного случая неоднородного, в котором при соответствующем масштабе исследований неоднородностью можно пренебречь. При более детальном изучении слоя такое пренебрежение может оказаться уже недопустимым и неоднородность обязательно выявится. Другими словами, неоднородность — абсолютна, однородность — относительна.

Имея в виду отмеченное выше обстоятельство, можно рассмотреть симметрию осадочных толщ земной коры, образованных различными наборами однородных слоев, полагая при этом, что при исследовании осадочных образований в различных масштабах (на различных уровнях организации вещества) в качестве однородного элемента структуры могут быть приняты геологические тела различной мощности (от микрослоев до геологических формаций). Общие закономерности их повторяемости в разрезе будут при этом одинаковыми.

На рис. 9 изображены три варианта сочетания мощностей слоев различного литологического состава. Три разнородных слоя

одинаковой мощности (рис. 9, а) можно интерпретировать с помощью понятий цветной симметрии как три слоя, выводящихся друг из друга посредством трехцветной трансляции  $T_3$ . Вектор такой трансляции равен мощности одного слоя. При переходе одного слоя в другой изменяется его «окраска». Симметрия трех разнородных слоев с закономерно уменьшающимися вверх по разрезу мощностями этих слоев (рис. 9, б) может быть охарактеризована операцией трехцветной симметрии подобия  $-T'_3$ . Знак минус указывает на уменьшение мощностей слоев. Соответственно симметрия колонки из трех разнородных слоев с прогрессивно увеличивающейся мощностью слоев (рис. 9, в) описывается формулой трехцветной трансляции

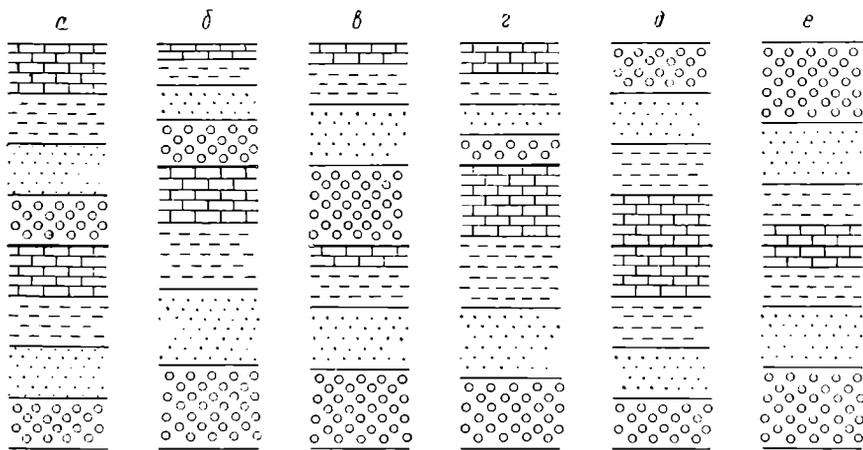


Рис. 18. Различные варианты симметрии строения стратиграфических разрезов (колонок).

а —  $T + T_4$ ; б —  $T' + T'_4$ ; в —  $T + T_4$ ; г —  $T' + T_4$ ; д —  $P + T_4$ ; е —  $P + T$

подобия  $+T'_3$ . Д. В. Рундквист [107] обоснованно трактует колонки, изображенные на рис. 9, в качестве членов единого гомологического ряда.

На рис. 18 изображены различные варианты симметрии строения стратиграфических разрезов (колонок), образованных слоями четырех видов пород (четыре видов формаций и т. п.). Рис. 18, а иллюстрирует классическую вертикальную трансляцию  $T$ , создающую закономерную повторяемость отрезков колонки (наборов из четырех разнородных слоев).

Суммарная мощность этих четырех слоев соответствует величине переноса (вектор трансляции). Прибегая к понятиям многоцветной (в данном случае четырехцветной) симметрии, эту же колонку можно охарактеризовать операцией четырехцветной трансляции, переводящей один слой в другой с изменением его «окраски» ( $T_4$ ). Длина вектора такой трансляции равна мощности одного слоя. При описании

симметрии таких разрезов целесообразно использовать понятия и классической и многоцветной симметрии, употребляя соответствующие символы ( $T + T_4$ ).

Симметрия разреза на рис. 18, б описывается символами  $T' + T'_4$ , отражающими наличие трансляций подобия четырехслойных отрезков колонки и четырехцветной трансляции подобия слоев всей колонки. Симметрия разреза, изображенного на рис. 18, в, описывается символами  $T + T'_4$ , отражающими сочетание классической трансляции с четырехцветной трансляцией подобия внутри этих отрезков. Рис. 18, г иллюстрирует симметрию разреза, сочетающую трансляцию подобия четырехслойных отрезков колонки с четырехцветной трансляцией внутри отрезков ( $T' + T_4$ ). На рис. 18, д изображен разрез с плоскостью симметрии, разделяющей его на два четырехслойных отрезка с четырехцветной трансляцией внутри них ( $P + T_4$ ). На рис. 18, е плоскость симметрии разделяет колонку на два четырехслойных отрезка с четырехцветной трансляцией подобия ( $P + T'_4$ ).

Приведенные примеры, разумеется, не исчерпывают всего многообразия стратиграфических разрезов, однако наглядно иллюстрируют возможность математически строгого их описания с помощью понятий и операций симметрии. Для количественного сопоставления разрезов с одинаковыми видами симметрии формулы симметрии могут быть дополнены коэффициентами, отражающими метрическую величину вектора трансляции при классической трансляции, начальную величину вектора и коэффициент подобия при трансляции подобия.

При выявлении симметрии слоистых и складчатых геологических структур, а также петрологических текстур уместно пользоваться понятием о «семиконтинуумах», сформулированным А. В. Шубниковым [162, 167, 190, 191].

Семиконтинуумами называются бесконечные фигуры, построенные в одних направлениях прерывно, а в других — непрерывно. Различают пространственные семиконтинуумы двух родов. Примерами первого рода могут до известной степени служить стопа бумаги или колода карт. В области геологии сюда же можно отнести свиту слоистых пород или слоистые и складчатые текстуры. Такие семиконтинуумы могут быть получены из плоскостей с соответствующей симметрией (односторонней или двусторонней) путем переноса вдоль перпендикуляра к ним. Пусть, например, некоторая плоскость (поверхность слоя) в каждой точке обладает симметрией круга  $t \cdot t \cdot L_\infty \infty P (t \cdot t \cdot \infty m)$ , где  $t$  — бесконечно малые переносы в плоскости. Симметрия соответствующего семиконтинуума будет  $T \cdot t \cdot t \cdot L_\infty \infty P (T \cdot t \cdot t \cdot \infty m)$ , где  $T$  — трансляция вдоль перпендикуляра к исходной плоскости. Простейшим примером семиконтинуумов второго рода может служить система бесконечно протяженных вдоль шестерной оси гексагональных призм, нацело выполняющих пространство при условии равенства, параллельности ориентировки и смежности по целым граням (плоскость или сечения,

перпендикулярные  $L_6$  призм, представят торцевой узор, нацело покрытый одинаковыми правильными шестиугольниками). Системы трещин в горных породах, столбчатая отдельность базальтов, параллельно-шестоватые агрегаты в минералогии могут описываться как пространственные семиконтинуумы второго рода.

Проявления симметрии в строении стратиграфических разрезов (колонок) осадочных образований земной коры отражают в пространственных соотношениях соответственно симметричные изменения условий осадконакопления во времени.

Наряду с симметрией строения стратиграфических разрезов, характеризующих изменения состава осадочных образований в вертикальном (во время формирования осадка) направлении, достаточно многочисленны проявления симметрии в строении этих образований в горизонтальных направлениях (в геологических разрезах). Прежде

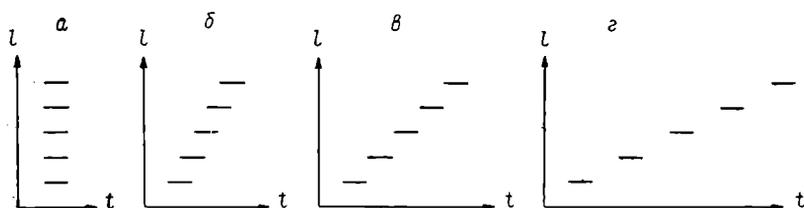


Рис. 19. Различные варианты соотношений пространственной и временной периодичности формирования элементов периодических структур.

*Формирование периодически распределенных элементов: а — одновременно; б — одновременно-последовательное; в — непрерывно-последовательное; г — прерывно-последовательное.*

всего из таких проявлений должна быть упомянута симметрия фациальных изменений стратиграфических горизонтов, представленная теми же видами симметрии, которые характерны для стратиграфических разрезов. Эта симметрия отражает симметрию распределения условий осадкообразования для одного и того же отрезка времени.

Кроме того, в осадочных образованиях достаточно широко распространены симметрично распределенные (транслирующиеся в одном или нескольких направлениях) различного типа и размера конседиментационные структурные формы, связанные с движениями среды, перекрывающей осадок (волноприбойные знаки, знаки ряби, дюны, барханы и т. п.), или подстилающего его ложа (конседиментационные поднятия и прогибы).

Симметрии пространственного распределения этих структурных форм также соответствует определенная временная симметрия (ритмичность), связанная с более или менее одинаковой продолжительностью формирования симметричных элементов структуры (структурных форм). Соотношения этих отрезков на общей шкале времени могут варьировать в широких пределах. Основные вариации этих соотношений изображены на рис. 19.

В целом пространственной периодичности в распределении структурных форм всегда соответствует определенная временная. Это обстоятельство, отражающее неразрывность пространственных и временных соотношений, наблюдаемых в разнообразных природных явлениях, имеет весьма существенное значение для правильного понимания механизмов образования периодических структур. Наличие вариаций в относительноном положении во времени периодов формирования отдельных элементов периодической структуры сводится к количественным различиям временных условий образования структуры.

После образования осадков последние претерпевают многообразные изменения, обстоятельное рассмотрение которых не входит в нашу задачу. Отметим только, что любые постседиментационные изменения осадков отражают симметрию строения силовых полей, обусловивших изменения, накладываемые на симметрию исходной осадочной толщи. В частности, уже в стадии диагенетического преобразования осадков в них могут возникать диагенетические конкреции, подобно конседиментационным, отражающие неоднородность поля электростатических сил, обусловившего их образование.

На погребенный литифицирующий осадок поле силы тяжести уже не оказывает сколько-нибудь существенного воздействия, поскольку сила гравитационного взаимодействия частиц осадка друг с другом во много порядков меньше силы их электромагнитного взаимодействия. Поэтому в однородных (массивных) породах диагенетические конкреции обычно приобретают практически идеальную сферическую форму (симметрия шара  $\infty L_{\infty} \infty PC - \infty/\infty m$ ). В качестве примера могут быть указаны цементированные карбонатом шары различных размеров, широко распространенные в песчаниках из угленосных отложений Тунгусской синеклизы, описанные А. Г. Вологдиным и Н. А. Елисеевым [18].

В слоистых породах сферическая симметрия поля точечного электрического заряда, накладываясь на слоистую текстуру породы, искажается.

В слоистых глинистых породах из тех же угленосных отложений Тунгусской синеклизы встречаются глинисто-карбонатные конкреции, как бы сложенные из различных размеров плоских дисков, соответствующих слоям осадка. Размер дисков зависит от состава слоев, для данного случая, в конечном счете, от диэлектрической проницаемости слоя (рис. 20). Симметрия отдельного идеально образованного диска  $L_{\infty} \infty L_2 \infty PPC - \infty/m m$ .

Весьма существенные преобразования первичной структуры осадочных образований связаны с так называемыми тектоническими

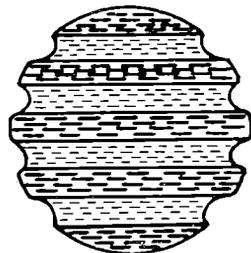


Рис. 20. Характерный разрез карбонатно-глинистой диагенетической конкреции (из слоистых аргиллитов (Тунгусская синеклизы).

процессами: складкообразованием, образованием разрывных нарушений и др. Физическое содержание этих процессов состоит в разрядке (релаксации) полей механических напряжений в геологических телах, выражающейся в деформациях или нарушениях сплошности геологических тел под воздействием этих полей.

Тектонические процессы накладывают свои отпечатки не только на осадочные образования, но и на геологические тела любого происхождения: вулканогенного, интрузивного, метаморфогенного. В строении геологических тел самых различных размеров и различного состава и происхождения во многих случаях запечатлены наглядные следы многократных проявлений тектонических процессов в ходе становления и существования того или иного геологического тела.

Помимо структурных преобразований, относимых обычно к тектоническим, релаксация полей механических напряжений в геологических телах приводит к образованию структур, изучаемых, как правило, независимо от тектонических: трещинных структур усыхания осадков, контракционных трещин в массивах магматических пород, складок гравитационного оползания осадков и др.

Отличие генетических условий образования перечисленных выше разновидностей геологических структур от условий образования структур, относимых к тектоническим, несомненно. Вместе с тем несомненно и единство характера непосредственной причины образования всех этих структур — существования и релаксации полей механических напряжений в геологических телах. Различия генетических условий связаны с различиями причин, порождающих эти поля. Но ни одна из этих причин не создает названные выше структуры непосредственно. Она только генерирует (возбуждает) поле механических напряжений, создающее структуры. Так, в частности, образование трещин усыхания связано с релаксацией механических напряжений, возникающих в глинистом осадке в результате его дегидратации, а образование контракционных трещин в магматических телах — с релаксацией механических напряжений, возникающих в результате охлаждения тел.

Поэтому целесообразно одновременное рассмотрение симметрии всех геологических структур, связанных с релаксацией механических напряжений. Как будет видно из дальнейшего изложения, особенности симметрии таких геологических структур весьма сходны для структур различного генезиса. В то же время совместное рассмотрение структур различного генезиса делает общее рассмотрение симметрии таких структур более полным.

Элементы структур, возникающих в результате деформации или нарушения сплошности ранее существовавших геологических тел (слоистых осадочных толщ, магматических тел и т. д.), весьма многообразны. Здесь могут быть упомянуты разнообразие складки, купола, флексуры, разрывные нарушения с различными смещениями по ним (сбросы, надвиги, сдвиги и т. д.), трещины с различной степенью их приоткрытия и др. Характеристика морфологических

особенностей этих элементов обычно приводится в курсах общей и структурной геологии и геотектоники. Характеристика симметрии этих элементов не составляет сколько-нибудь сложной задачи, и мы здесь на ней специально не останавливаемся, а рассматриваем лишь некоторые примеры, приведенные в связи с освещением более общих вопросов.

Наиболее общим и наиболее важным свойством всех этих структурных элементов является их закономерная повторяемость, определенная периодичность их пространственного распределения, описываемая в учении о симметрии с помощью трансляций. Как уже отмечалось выше и как можно видеть из материала, излагаемого в настоящей главе, трансляции распространены в геологических структурах больше любых других проявлений симметрии. Если же учесть, что классическая симметрия представляет собой частный случай криволинейной, то в рамках последней любые операции классической симметрии можно с известными оговорками свести к трансляции по определенным образом искривленным линиям.

Операции конечной симметрии можно при этом рассматривать как операции бесконечной симметрии с трансляциями по замкнутым круговым или эллиптическим контурам, сферическим или эллипсоидальным поверхностям. Это относится и к симметрии поворотов (оси симметрии различных порядков), и к операциям зеркального отражения. Классическая прямолинейная трансляция выступает при таком рассмотрении в качестве частного случая криволинейной трансляции с бесконечно большим радиусом кривизны в каждой ее точке.

Задачей дальнейшего изложения является привлечение внимания к широкому распространению в рассматриваемых структурах проявлений трансляций их элементов.

На рис. 1 изображены характерные примеры общеизвестных проявлений классической трансляции структурных элементов, наблюдаемые в разрезах геологических структур.

Рис. 1, *a* изображает одну из весьма многочисленных морфологических разновидностей структур будинаж — четковидных структур, возникающих при растяжении неоднородно-слоистых геологических тел в направлении, совпадающем со слоистостью [8, 31, 48, 90, 91, 119—121, 123, 124, 177, 183].

Узор на рис. 1, *a* следует рассматривать как обрывок «бордюра», который мысленно можно продолжить до бесконечности как вправо, так и влево. Симметрия бордюров — фигур, бесконечно повторяющихся или вытянутых вдоль одной прямой (рис. 5), хорошо известна [162, 167]. Узор на рис. 1, *a* обладает прежде всего осью переносов или трансляций, т. е. вектором, сдвигающим узор вправо или влево на отрезок, равный промежутку между центрами двух соседних будин по направлению прямой, проходящей через эти центры. При условии бесконечности узора при таком сдвиге он совместится сам с собой. Помимо трансляции легко обнаружить серию (семейство) взаимно параллельных плоскостей симметрии,

перпендикулярных как оси переноса, так и плоскости чертежа, и аналогичную серию двойных осей симметрии, также перпендикулярных плоскости чертежа. И те и другие проходят как через центры будин, так и посередине между ними.

Кроме того, имеется еще одна плоскость симметрии, идущая вдоль оси трансляции перпендикулярно плоскости бумаги (рис. 5). Общая формула для бордюра с этой симметрией  $T \cdot L_2 2P$  или  $T \cdot 2mt$ , где  $T$  — трансляция (добавление этой буквы к формуле конечной симметрии переводит ее в бесконечную симметрию).

Перейдем к пространственной симметрии данной структуры. Отдельно взятая будина имеет симметрию  $3L_2 3PC - mmm$ . Наглядной моделью такой симметрии служит фигура в форме кирпича (спичечный коробок). Бесконечная серия таких кирпичиков, приложенных друг к другу вдоль одного направления имеет симметрию  $T \cdot mmm$ . Конечный аналог ее, знакомый нам по кристаллографии, — планаксиальный вид ромбической сингонии  $3L_2 3PC - mmm$ .

На рис. 21 изображена реальная структура будинаж, мало отличающаяся по своим морфологическим особенностям от схематизированного изображения рис. 1, а. Подобно этому все схематизированные изображения рис. 1 и всех других схем в этой книге можно сопроводить многочисленными изображениями аналогичных реальных структур. Реальные примеры таких структур большинству геологов-полевиков хорошо знакомы по собственным наблюдениям. Кроме того, они иллюстрированы в упоминаемых нами литературных источниках. Обширная литература посвящена, в частности, структурам будинаж. Описанные впервые в 1909 г. бельгийским геологом Максом Лоостром [183], они постоянно привлекают внимание исследователей, работающих в регионах с различным геологическим строением [8, 90, 91, 119, 120]. Особенно полно и детально описаны эти структуры в специальной монографии Г. В. Тохтуевым [124].

Весьма существенно для нашего рассмотрения то обстоятельство, что внимание исследователей к структурам будинаж привлекает прежде всего их пространственная периодичность, т. е. трансляционная симметрия. Все исследователи отмечают, что для будин, на которые разделяются слои при образовании структур будинаж характерны более или менее одинаковые размеры. Это свойство структур будинаж имеет существенное практическое значение, поскольку к межбудиным пережизам и разрывам бывают приурочены проявления полезных ископаемых (пегматитовые жилы в гранитизированных образованиях, скопления богатых железом руд в железистых кварцитах и др.). Знание размеров будин может помочь выявлению не вскрытых рудных тел.

Как уже отмечалось, морфологические разновидности структур будинаж весьма многообразны. Наиболее обстоятельная характеристика этого многообразия дана в упоминавшейся работе Г. В. Тохтуева [124]. Однако при всем этом многообразии симметричные характеристики их одинаковы. Поэтому для выражения индивидуальных особенностей морфологических разновидностей и коли-

чественного их сопоставления необходимо введение дополнительных численных характеристик (продольных и поперечных размеров будин, относительной величины сокращения поперечного сечения, отношения горизонтального размера к вертикальному в межбудинном пережиге и др.), так же как для индивидуальных характеристик симметричных стратиграфических разрезов, описанных в начале



Рис. 21. Структура будинаж. Будинирован пласт кварцита, залегающий среди кварцево-глинистых сланцев (Енисейский кряж).

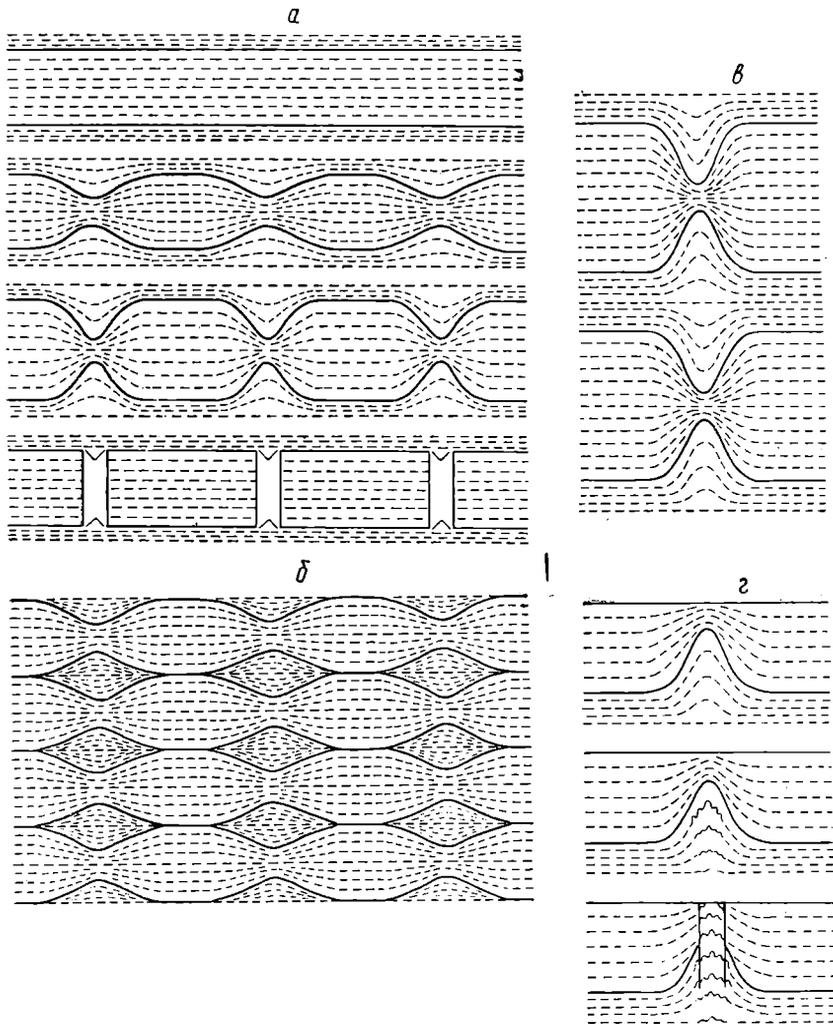
данной главы и любых симметричных объектов в любой отрасли знания. При дальнейшей характеристике симметрии геологических структур мы не будем упоминать о необходимости введения дополнительных численных характеристик для индивидуализации описания разновидностей, имеющих одинаковую симметрию, но ее необходимо иметь в виду. В то же время не следует забывать, что индивидуализация описания необходима для решения относительно частных вопросов, от которых при решении общих вопросов можно и необходимо абстрагироваться. Поэтому для решения наиболее общих

вопросов неиндивидуализированный материал, сгруппированный по его симметричным характеристикам. представляет собой более благоприятную основу, чем индивидуализированный. Мера необходимой детальности (индивидуализации) рассмотрения материала определяется характером поставленной задачи. Группировка материала по симметричным характеристикам при условии достаточно строгого физического истолкования наблюдаемых проявлений симметрии дает основания для выявления наиболее общих физических закономерностей, отраженных в этом материале.

Возвращаясь к характеристике структур будинаж рассмотрим некоторые их особенности, позволяющие придти к выводам, существенным в практическом и теоретическом отношениях. На рис. 22, а изображены различные морфологические разновидности структур, возникающих при продольном растяжении слоя. Слой, растянутый без образования межбудинных пережимов или разрывов, и слой, при растяжении которого возникли вертикальные разрывы (трещины), могут рассматриваться в качестве конечных членов непрерывного ряда, промежуточные члены которого характеризуются постепенным нарастанием (или убыванием) кругизны межбудинных пережимов. Другими словами, последовательность расположения членов в этом ряду может быть охарактеризована нарастанием (или убыванием) неравномерности распределения деформации по длине слоя. Поскольку все эти морфологические разновидности во многих случаях наблюдаются в пределах одного и того же обнажения в одновременно и одинаково деформированной слоистой толще, различия их могут быть отнесены только за счет различий механических свойств слоев, проявившихся в момент (период) деформации.

Существование слоев, растягивающихся без образования пережимов или разрывов (обычно такие слои составляют большую часть толщи или пачки слоев, подвергшейся растяжению), указывает на то, что пачка или толща слоев, испытавшая растяжение, может не иметь наглядных индикаторов растяжения в виде будин или трещин. Если при сжатии слоистых толщ в них возникают складчатые структуры, резко изменяющие характер их симметрии и бросающиеся в глаза при первом взгляде на обнажение, при растяжении характер симметрии этих толщ может и не изменяться. С этим обстоятельством связано довольно широкое распространение среди геологов ошибочного мнения о том, что растяжение редко встречается в геологической практике. На самом деле растяжение встречается не так уж редко, но редко выявляется [91, 94]. В свое время малая наглядность проявлений растяжения слоистых толщ способствовала распространению и упрочению контракционной гипотезы, предполагавшей общее сжатие земной коры в результате охлаждения Земли. В настоящее время известны глобальные проявления растяжения земной коры в виде рифтовых зон, впечатляющие не меньше, чем проявления сжатия в виде складчатых горных цепей.

Широкое признание приобрела роль растягивающих напряжений в образовании мелких структурных форм, главным образом



**Рис. 22.** Примеры разрывов структур, возникающих при растяжении слоистых толщ.

**а** — различные варианты деформаций слоев при их растяжении: без образования пережимов или разрывов (верхний слой), с образованием разрывов (нижний слой), с образованием пологих или крутых пережимов (промежуточные слои); **б** — сочетание будин и «кантибудин» при сближенном расположении одинаково будинированных слоев и трансляции их по стратиграфической вертикали; **в** — трансляция по стратиграфической вертикали межбудинных пережимов в сочетании с горизонтальной плоскостью симметрии; повторение в разрезе слоев с одинаковыми механическими свойствами; **г** — разрезы диапировых структур: простейшей (сверху), усложненной складчатостью в ядре антиклинали или купола (посередине) и разрывами (внизу).

рудоконтролирующих и рудовмещающих, обычно изучаемых с наибольшей детальностью и обстоятельностью. Однако роль растягивающих напряжений в формировании региональных тектонических структур пока еще не получила достойной оценки, хотя имеются основания считать результатом регионального растяжения формирование структур областей траппового магматизма и платформенных солянокупольных областей [94].

На рис. 22, б изображен разрез, сложенный сближенными одинаковыми будинированными слоями. Будины в таком разрезе транслируются как вдоль слоев, так и по вертикали. Промежутки между межбудинными пережимами двух соседних слоев заполняются в таких случаях либо материалом слоев, первоначально разделявших будинированные, либо минеральными новообразованиями (жильным материалом). Симметрия строения и распределения этих промежутков аналогична таковой для будин. Поэтому в некоторых случаях они принимаются за будины, тогда как на самом деле являются антибудинами. Принятие антибудин за будины влечет за собой серьезные ошибки при количественной оценке деформации, испытанной породами. Так, оценивая растяжение, приведшее к образованию структуры, иллюстрируемой рассматриваемым рисунком, приняв антибудины за будины, мы получим величину 200—300%, тогда как на самом деле она не превышает 5%. По-видимому, во всех случаях, когда в литературе растяжение будинированных толщ оценивается сотнями процентов, мы имеем дело с принятием за будины антибудин.

На рис. 22, в представлена деталь разреза толщи с одинаковыми будинированными слоями, чередующимися с достаточно мощными более пластичными слоями, деформация которых приспособляется к деформации будинированных слоев. Здесь также наряду с трансляцией будин вдоль слоев (на рисунке не отраженной) имеет место трансляция будин (и межбудинных пережимов) по стратиграфической вертикали. Имеются также плоскости симметрии, совпадающие с осевыми плоскостями слоев как будинированных, так и разделяющих. Этот рисунок примечателен тем, что отражая на достаточно характерном примере особенности симметрии структур, возникающих при продольном растяжении слоистых пачек и толщ, он в то же время может служить иллюстрацией к разрезам геологических структур, в формировании которых растяжение также играет решающую роль, не получившую еще соответствующего отражения в геологической литературе. Мы имеем в виду разрезы платформенных областей развития диапировых (прежде всего соляных) структур. Вторая и четвертая (сверху) четверти рис. 22, в могут быть приняты за изображения типичного разреза простейшей диапировой структуры (антиклинали или купола). В пределах каждой из названных частей рисунка верхний слой соответствует породам рамы диапировой структуры, нижний — породам, слагающим ее ядро.

Мы обратились прежде всего к сходству разрезов диапировых структур с отдельными частями рассматриваемого рисунка потому,

что именно эти части отражают наиболее широко известные и обычно принимаемые во внимание геометрические особенности диапировых структур. Однако если обратиться к разрезам областей развития диапировых структур, а не отдельных структур, то обнаружатся дополнительные элементы сходства этих разрезов с разрезом, изображенным на рис. 22, в. В частности, давно известно [8, 91], что в разрезах солянокупольных областей под куполами во многих случаях обнаруживаются зеркально-симметричные им прогибы подсолевого ложа. Известно также [91], что в разрезах некоторых солянокупольных областей соляные антиклинали располагаются под зеркально-симметричными им синклиналями. Таким образом, в сводном разрезе солянокупольной области могут быть выделены все элементы симметрии, свойственные разрезу пачки пород с будипированными слоями. Только из-за больших размеров диапировых структур наблюдать эти элементы в пределах одного обнажения, как в случае структур будинаж, невозможно. По-видимому, дело здесь не ограничивается чисто геометрическим подобием. Последнему соответствует подобие физических механизмов образования тех или других структур.

В геологической литературе распространены два представления о причинах образования диапировых структур. Часть исследователей связывает их возникновение с вязким всплыванием легких пород диапирового ядра под давлением вышележащих более тяжелых пород рамы. Проводившиеся измерения плотности пород показывают, что такое соотношение плотностей в реальных структурах наблюдается далеко не всегда, что во многих случаях породы ядра тяжелее пород рамы. Кроме того, этому представлению противоречит наличие горизонтальных плоскостей симметрии в структуре соленосных и надсолевых толщ, которое было отмечено выше. При одностороннем (вверх) действии вдоль вертикальных осей куполов или осевых плоскостей антиклиналей, в качестве которого предстает вязкое гравитационное всплывание, горизонтальные плоскости симметрии соленосных надсолевых толщ не могли бы сохраниться. Соответственно, не могли бы возникнуть прогибы подсолевых толщ, симметричные куполам, и симметричные соляным антиклиналям синклинали в надсолевых толщах. Таким образом, рассмотренное представление не соответствует особенностям симметрии разрезов солянокупольных областей и не может быть принято.

Сторонники второго представления связывают образование диапировых структур на платформах с тангенциальным сжатием последних в эпохи складкообразования в прилегающих геосинклинальных областях. С точки зрения симметрии структур это представление не вызывает возражений. При горизонтальном (продольном) сжатии слоистых толщ горизонтальные плоскости симметрии могут (в принципе) сохраниться (хотя обычно они обращаются в плоскости скользящего зеркального отражения). Однако против этого представления давно уже выдвигаются серьезные возражения физического характера. Дело в том, что в областях развития диапировых структур

отсутствуют какие бы то ни было другие проявления горизонтального сжатия и, напротив, широко распространены признаки интенсивного горизонтального растяжения в виде многочисленных сбросов, грабенов и т. п. [8, 91].

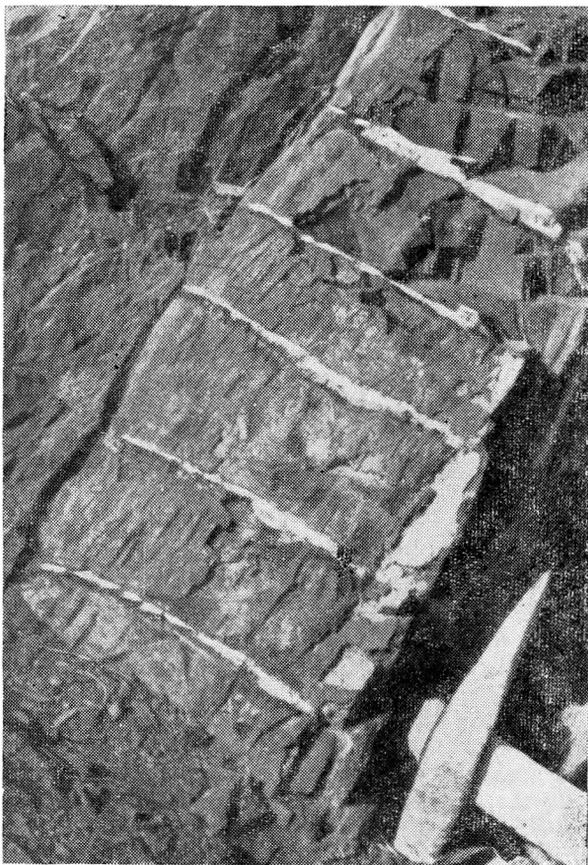


Рис. 23. Периодическое распределение кварцевых жил в пласте кварцито-песчаника (Енисейский край).

При принятии представления об образовании диапировых структур в результате продольного растяжения неоднородно-слоистых толщ возражения, выдвигаемые против обоих рассмотренных выше представлений, отпадают. Надо полагать, что это представление будет рано или поздно принято всеми исследователями.

На рис. 22, *г* изображены варианты различной сложности диапировых структур: простейшая (вверху), осложненная складчатостью пород диапирового ядра (посередине) и разрывами в раме (внизу).

Важно отметить, что точно такие же осложнения зачастую проявляются и в структурах будинаж.

Как видим, рассмотрение особенностей симметрии геологических структур может помочь решению вопросов, весьма важных в практическом и теоретическом отношениях.

Рис. 1, б изображает серию периодически распределенных разрывов в пластообразном теле, сложенном магматической породой. Такие разрывы, заполненные жильным материалом, достаточно широко известны под названием «лестничных жил». На рис. 23 можно видеть, что такие же лестничные жилы встречаются и в пластах осадочных пород. Симметрия этой структуры полностью совпадает с симметрией структуры, изображенной на рис. 1, а.

Структура пласта или пластообразного тела, рассеченного периодически

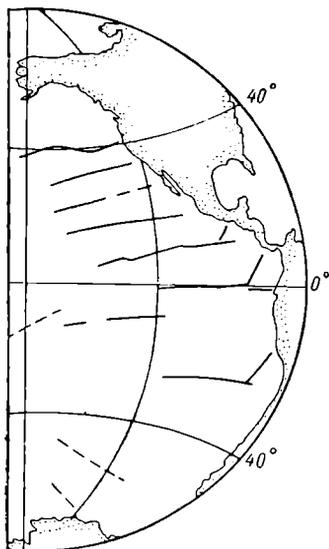


Рис. 24. Периодическое распределение разломов в северо-восточной части Тихого океана. По В. Е. Ханну.

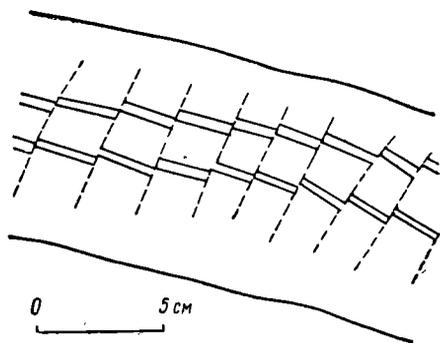


Рис. 25. Периодическое распределение микроразрывов в слоистом известняке (Енисейский край).

распределенными трещинами, представляет собой частный случай структуры будинаж (рис. 22, а). В то же время это один из частных случаев структуры, элементами которой являлись трещины или разрывные нарушения. В распределении последних проявления трансляционной симметрии известны достаточно широко. Рядом авторов таким проявлениям посвящались специальные публикации [4, 35, 52]. Часто эти проявления отмечаются попутно с изложением других вопросов [83, 88, 133]. Во многих публикациях периодичность распределения разрывных нарушений различных масштабов и типов документируется в графических материалах, хотя и не обсуждается в тексте.

Рис. 23—26 в какой-то мере иллюстрируют разнообразие форм и размеров периодических разрывных структур, наблюдаемых при

геологических исследованиях. Из этих рисунков видно, что периодическое распределение разрывных нарушений наблюдается в геологических телах самых различных размеров от крупных блоков земной коры (рис. 24) до небольших участков горных пород (рис. 26).

Рассмотрим симметрию структур, образованных различного рода разрывными нарушениями (рис. 1, *в—д*).

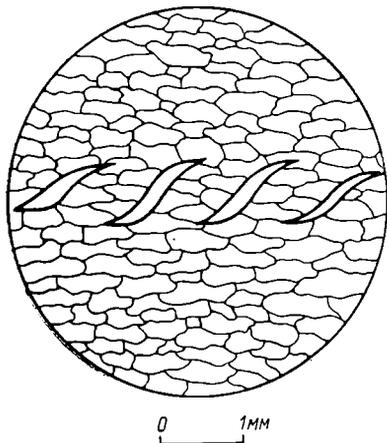
Рис. 1, *в* изображает серию S-образных жил. В соответствующем бесконечном бордюре кроме оси переноса  $T$  присутствуют взаимно параллельные двойные оси, перпендикулярные трансляции  $T$  и плоскости чертежа. Они проходят через центры жил на чертеже и через середины промежутков между ними. Формула соответствующей симметрии  $T \cdot L_2 (T \cdot 2)$  (рис. 5, б).

Перейдя к пространственной системе, кроме вышеперечисленных элементов симметрии мы обнаружим еще плоскость симметрии, совпадающую с плоскостью чертежа. Формула пространственной бесконечной симметрии для данной системы  $T \cdot L_2 PC (T \cdot 2/m)$ . Отметим, что такая симметрия, если перейти к конечным фигурам, соответствует в кристаллографии планаксиальному виду моноклинной сингонии  $L_2 PC - 2/m$ . Такая же симметрия свойственна структурам, изображенным на рис. 1, *г* (ступенчатый сброс) и 1, *д* (чешуйчатый надвиг).

Характерные примеры трансляционной симметрии обнаруживаются при изучении складчатых структур земной коры. Пространственная периодичность складчатых структур всех масштабов является настолько неотъемлемым их свойством, что практически никогда не обсуждается в геологической литературе. Вместе с тем как само собой разумеющаяся особенность складчатых структур она интуитивно учитывается геологами с давних пор.

Рис. 26. Периодическое распределение кварцевых прожилков в кварците (Урал).

Симметрия бордюры  $T \cdot L_2 - T \cdot 2$  (см. рис. 5).



Из рис. 27, заимствованного из старого учебника геологии, можно видеть, что при схематизации их описания складчатые структуры издавна изображались строго симметричными, хотя о симметрии структур, как таковой, авторы в этих описаниях ничего не говорили. Симметрия складчатых структур может быть рассмотрена на примере рис. 1, *ж*, изображающего прямые складки. Здесь двойные оси и плоскости симметрии, перпендикулярные оси трансляций, не совпадают друг с другом, а возникают попеременно. Плоскости симметрии проходят через гребни и впадины складок, а двойные оси располагаются по середине между ними. Вместо плоскости сим-

метрии, идущей вдоль оси трансляции, здесь возникает плоскость скользящего отражения  $a$ . Симметрия соответствующего бордюра  $T \cdot 2m\bar{a}$  (рис. 5,  $\epsilon$ ). Отдельно взятая складка, если ее рассматривать как конечное тело, имеет симметрию  $L_2 2p - 2mm$ . В бесконечной

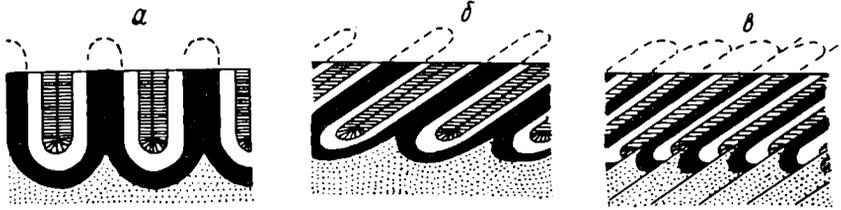


Рис. 27. Комплексы изоклиальных складок. По И. В. и Д. И. Мушкетовым.

Складки:  $a$  — прямые стоячие;  $б$  — наклонные косые;  $в$  — чешуйчатые.

совокупности складок пространственная симметрия соответствует симметрии стержня  $T \cdot 2m\bar{a}$ .

Симметрия наклонных складок (рис. 1,  $\epsilon$ ) аналогична симметрии разрывных структур (рис. 1,  $\epsilon-\delta$ ):  $T \cdot L_2 (T \cdot 2)$  на плоскости и  $T \cdot L_2 PC (T \times 2/m)$  в пространстве.

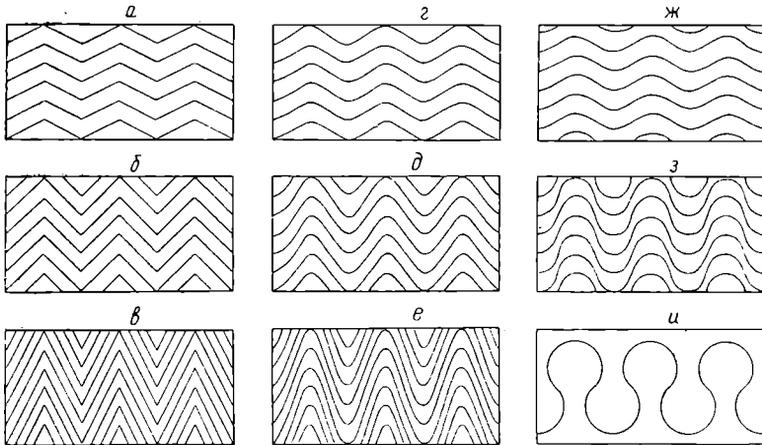


Рис. 28. Примеры складчатых структур различных геометрических типов с различной степенью дислоцированности  $D$ , выраженной отношением высоты складок (амплитуды) к их ширине (длине волны).

Складки:  $a-\epsilon$  — шевронные;  $г-е$  — синусоидальные;  $ж$  — дуговые;  $а, г, ж$  —  $D = 0,25$ ;  $б, д, з$  —  $D = 0,5$ ;  $в, е$  —  $D = 1,0$ ;  $и$  —  $D = 1,25$ .

Симметрия бордюра  $T \cdot L_2 P_4 P - T \cdot 2 a m$  (см. рис. 5).

По геометрическим особенностям складчатых структур среди них выделяются три основные разновидности (рис. 28): шевронные, синусоидальные и дуговые, структурные рисунки которых образованы

соответственно изменениями залегания слоев по ломанным линиям, синусоидам и дуговым линиям.

В нашу задачу не входит анализ механических условий образования геометрических различных типов складок. Тем не менее уместно отметить, что указанные их геометрические особенности имеют и вполне определенный физический смысл, определяясь физико-механическими свойствами слоистой толщи или пачки, подвергшейся складчатости, и условиями нагружения, приведшего к складкообразованию.

Среди названных геометрических разновидностей складчатых структур наиболее широко распространены синусоидальные. Шевронные и дуговые складки встречаются значительно реже, но относительно последних нужно сделать оговорку о том, что при малой интенсивности складчатости (при отношении амплитуды складок к их ширине до 0,25) они визуальнo трудно отличимы от синусоидальных (рис. 28).

Выше речь шла о трансляции складок вдоль поверхности напластования. На рис. 28 наглядно видно, что в однородно-слоистых толщах структурные рисунки шевронных и синусоидальных складок транслируются и по нормали к поверхности напластования. Это имеет место при любой интенсивности складчатости. Каких-либо геометрических ограничений для такой трансляции не существует. В случаях наклонных шевронных или синусоидальных складок (рис. 29) их структурные рисунки транслируются под углом к плоскости напластования также без каких-либо геометрических ограничений. Вертикальная (или наклонная) трансляция дуговых складок уже чисто геометрически возможна лишь при малой интенсивности складчатости (рис. 28). При большой ее интенсивности контуры изгибов не могут повторяться вверх и вниз от плоскости напластования. Соответственно такая складчатость может быть только дисгармоничной. Наиболее резко дисгармоничность складчатых структур слоистых толщ выражена в случаях изоклиальной складчатости (рис. 30, *в*, *е*), когда отдельный пласт или пачка пластов образуют складки, противоположные крылья которых залегают параллельно друг другу, а породы, залежавшие выше и ниже этого пласта, оказываются выжатыми из замковых частей складок.

Непрерывным условием образования изоклиальной и дисгармоничной складчатости вообще является различный характер деформированности слоев, пачек или толщ, связанный либо с различиями их физико-механических свойств (т. е. литологического их состава), либо с локальностью действия формирующих нагрузок. При воздействии однородного складкообразующего напряжения на однородно-слоистую толщу дисгармоничная складчатость возникнуть не может. В реальных геологических условиях дисгармоничность складчатости обычно связана с различиями литологических свойств слоев, слагающих деформируемую толщу.

Как уже отмечалось, изменения литологического состава осадочных толщ по стратиграфическому разрезу характеризуются

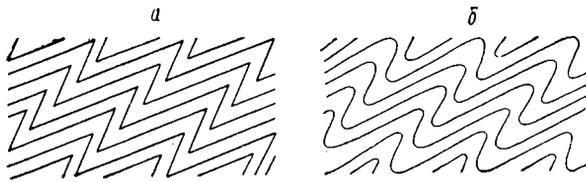


Рис. 29. Наклонные шеврошные (а) и синусоидальные (б) складки.

Симметрия бордюра  $T \cdot I_2 - T \cdot 2$  (см. рис. 5)

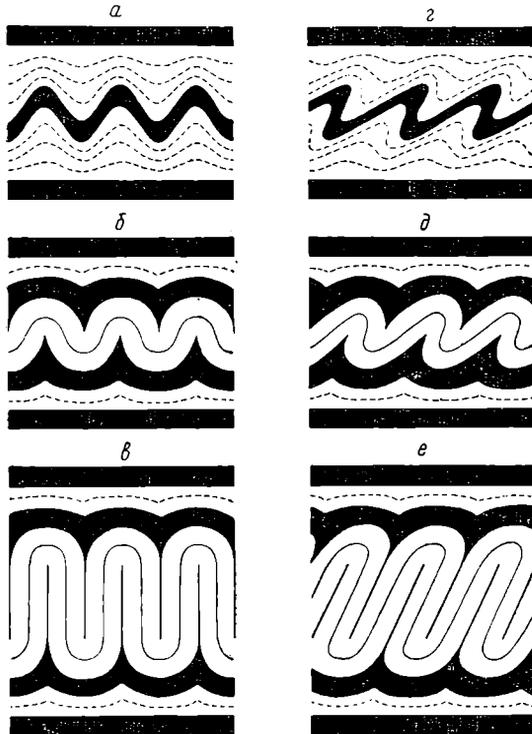


Рис. 30. Примеры затухания складчатости вверх и вниз по разрезу.

Складки: а-в — вертикальные; симметрия бордюра  $T \cdot L_2 P_1 P - T \cdot 2$  ам (см. рис. 5). Кроме того, трансляция основного ритма сопровождается сжатием перпендикулярно оси трансляции; г-е — наклонные; симметрия бордюра  $T \cdot I_2 - T \cdot 2$  (см. рис. 5). Трансляция основного ритма сопровождается вектором сжатия, косо расположенным относительно оси трансляции; а, г — синусоидальные; б, д — дуговые; в, е — изоклинные.

разнообразными видами симметрии. В соответствии с принципом П. Кюри такая симметрия находит отражение в симметрии формирующихся в этих толщах складчатых структур. В однородно-слоистых толщах, образованных трансляцией одинаковых слоев по вертикали, транслируются по вертикали и складчатые структуры. В неоднородно-слоистых толщах наиболее характерные и часто наблюдаемые проявления дисгармоничной складчатости связаны с наличием в деформируемой толще пласта или слоя, резко отличающегося по своим физико-механическим свойствам от вмещающих пород и образующего отчетливо выраженную складчатую структуру (рис. 30, а, б, г, д), постепенно затухающую во вмещающих породах по мере удаления от этого пласта.

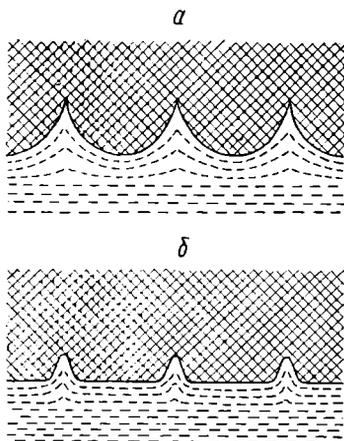


Рис. 31. Складчатые структуры, возникающие на границах разнородных сред.

а — дуговые; б — гребневидные.  
Симметрия бордюра  $T \cdot P - T \cdot m$ .

Приведенные нами примеры (рис. 30) предполагают наличие в деформированной толще (до ее деформации) плоскости симметрии, совпадающей с осевой плоскостью пласта. Вверх и вниз от этой плоскости распределение механических свойств пород зеркально-симметричное. В образовавшейся складчатой структуре также имеется плоскость симметрии, параллельная плоскости напластования. Только это уже не обычная плоскость зеркального отражения, а плоскость скользящего отражения, свойственная всем правильным складчатым структурам.

Разумеется, зеркальная симметрия в распределении механических свойств пород относительно того или иного слоя, хотя и встречается достаточно часто, не является обязательной. Возможны весьма разнообразные вариации этого распределения. Соответственно возможно и существование складчатых структур, не имеющих плоскости скользящего отражения (рис. 31). Такие структуры обычно приурочены к границам раздела резко различных по физико-механическим свойствам пачек или толщ.

Преобразование плоскостей зеркального отражения в плоскости скользящего отражения, связанное со складкообразованием, в случаях гармоничной складчатости равнозначно искривлению плоскостей зеркального отражения, что и происходит в действительности при складкообразовании. При этом осуществляется переход их в криволинейные поверхности, относительно которых сохраняется криволинейная зеркальная симметрия структуры. В случаях дисгармоничной складчатости плоскости зеркального отражения преобразуются в плоскости скользящего отражения, соответствующие криволинейным поверхностям гомологичного зеркального отражения.

Рассмотренные выше обстоятельства наглядно иллюстрируют известное положение о том, что классическая симметрия является частным случаем более общих систем — криволинейной симметрии и гомологии.

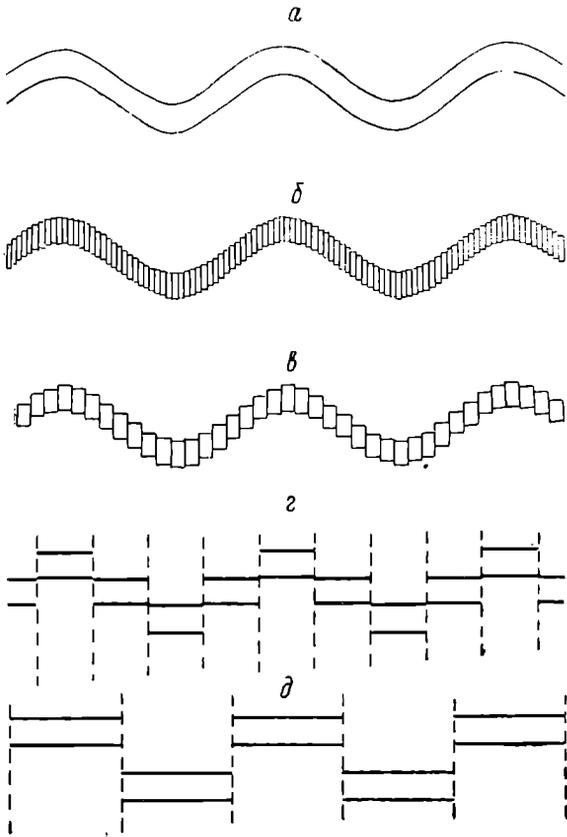


Рис. 32. Ряд структур, образованных смещениями блоков слоя по поперечным (вертикальным) разрывам. (Направления и величины смещений подчиняются синусоидальному закону).

*a* — «нормальная» синусоидальная складчатая структура, размер блока по горизонтали стремится к нулю, количество блоков в складке (волне) — к бесконечности; *б, в* — синусоидальные складчатые структуры с выраженным кливаж-будинажем; *г* — периодическая система ступенчатых горстов (грабенов); *д* — то же, простых.

Всюду симметрия бордюра  $T \cdot L_2 P_f$   $P - T \cdot 2am$  (см. рис. 5).

В связи с этим определенный интерес представляет рассмотрение симметрии непрерывного ряда структур, в котором «обычная» синусоидальная складчатая структура предстает в качестве предельного случая разрывной структуры, образованной закономерным смещением по разрывам равновеликих участков (блоков) слоя (рис. 32). Этот ряд наглядно иллюстрирует количественную основу качественного

различия разрывных и складчатых структур. В складчатой структуре количество блоков, на которые разделен слой в промежутке между соседними крайним верхним и крайним нижним положениями блоков, и соответственно количество разделяющих блоки разрывов в этом промежутке стремятся к бесконечности, а расстояния между разрывами — к нулю.

Кроме классической трансляции в горизонтальном направлении с шагом, равным ширине складок, в структурах, изображенных на рис. 32, усматривается трансляция блоков по синусоидальной

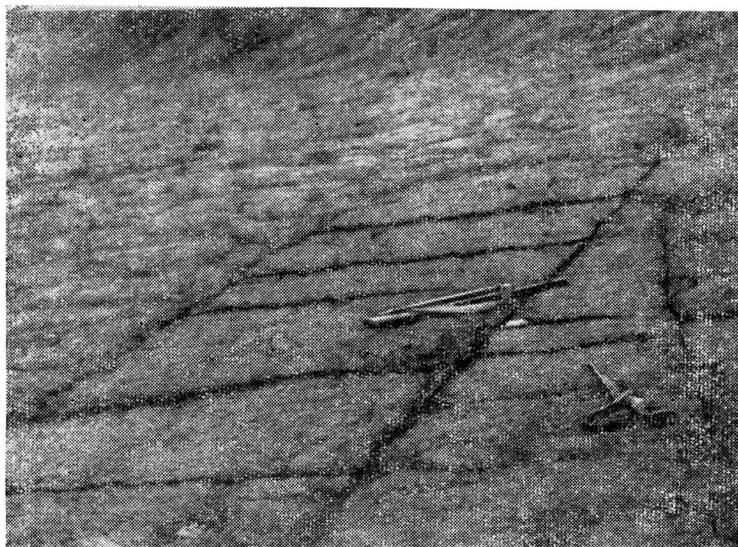


Рис. 33. Прямоугольная сетка тектонической трещиноватости в базальтовых туфах (Тунгусская синеклиза).

поверхности. С физической точки зрения именно трансляция блоков по синусоидальной поверхности и обуславливает возможность классической трансляции более крупных элементов структуры (складок); образованных из блоков. Здесь также проявляется большая фундаментальность (первичность) криволинейной симметрии по отношению к симметрии классической.

В предшествующем изложении речь шла преимущественно о трансляциях элементов геологических структур (структурных форм) в одном направлении. В некоторых случаях рассматривались трансляции структурных форм в двух направлениях, лежащих в плоскостях вертикальных геологических разрезов. Одно из таких направлений обычно совпадает с плоскостью напластования пород, или «зеркалом складчатости», второе ориентируется под прямым

или косым углом к этим поверхностям. Сочетания двух направлений трансляции в плоских срезах геологических разрезов образуют узоры, в которых структурные формы располагаются в узлах прямоугольных или косоугольных сеток.

В случае трещинных структур две пересекающиеся серии периодически распределенных трещин или разрывов образуют сетчатый узор в буквальном смысле этого слова. Такие сетчатые узоры во многих случаях наблюдаются и в плоских срезах, параллельных

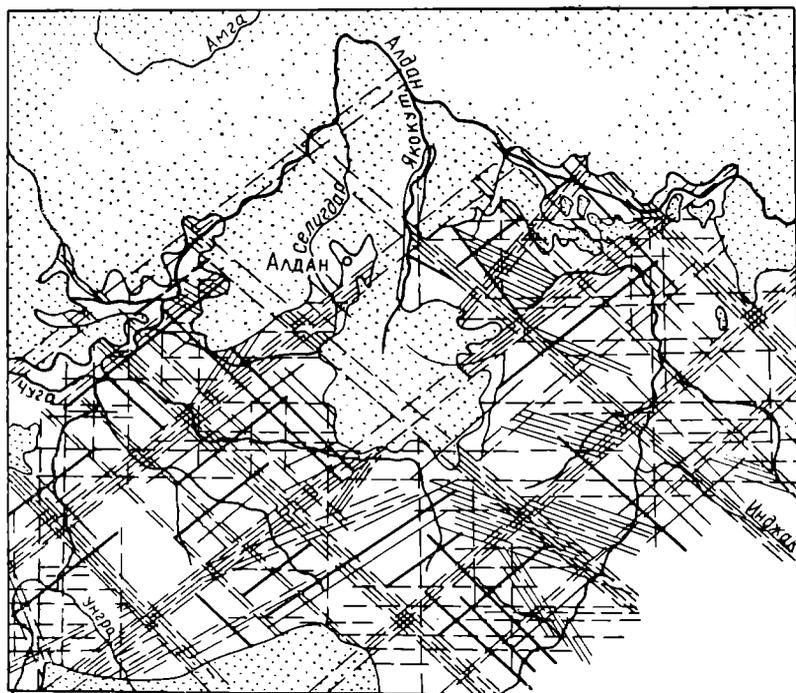


Рис. 34. Прямоугольная сетка разломов Алданского щита. По Р. И. Гришкяну.

напластованию пород, и в срезах геологических структур дневной поверхностью. Среди наблюдаемых сеток тектонических трещин обнаруживаются аналоги всех пяти типов сеток О. Браве (рис. 6), характеризующих возможные группы трансляций на плоскости [96]. Рис. 33 иллюстрирует прямоугольную сетку тектонических трещин, наблюдаемую в пределах одного обнажения. На рис. 34 показана близкая к квадратной сетка региональных зон разломов, развитая в пределах Алданского щита, по данным Р. И. Гришкяна [28]. Сходная сеть региональных разломов описана Э. Л. Варандом в западной части Сибирской платформы [14].

Обширная литература посвящена описанию квадратных и прямоугольных сеток растрескивания мерзлых грунтов. В работах С. В. Обручева [85], А. И. Гусева [34] и других исследователей полярных областей приведено много впечатляющих иллюстраций

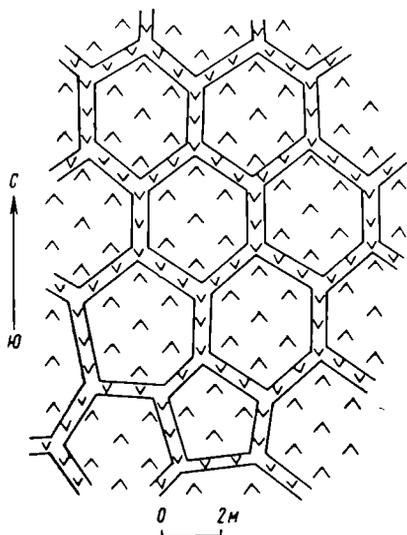


Рис. 35. Гексагональная сеть даек среднезернистого долерита в мелкозернистом (Тунгусская синеклиза).



Рис. 36. Распределение будин в будинкованном слое кварцита по ромбической сетке (Криворожье). По Г. В. Тохтуеву.

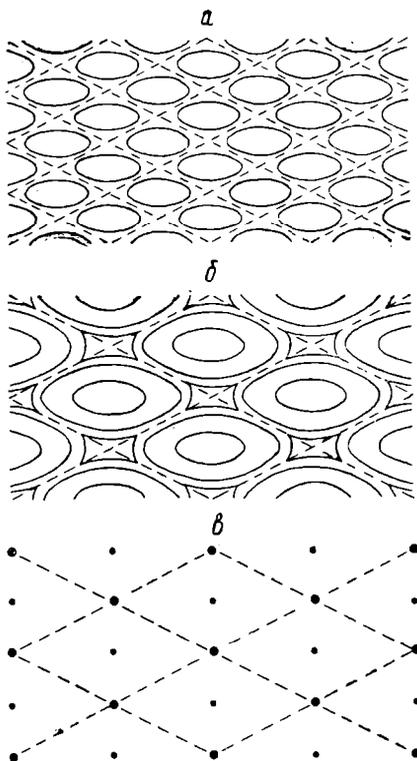


Рис. 37. Схемы ромбического распределения структурных элементов, деформаций и напряжений.

*а* — схематизированные изображения поверхности будинкованного слоя, изображенного на рис. 36; *б* — то же, более детально в изолиниях; *в* — распределение максимумов (черные кружки) и минимумов (черные точки) деформаций и обусловивших их напряжений, соответствующее 36 и 37, *б* (ср. рис. 38, 39).

правильного расположения морозобойных трещин и разграничиваемых ими участков.

На рис. 35 изображена гексагональная сеть разрывных нарушений в пластовой интрузии долерита, выполненных дайками более крупнозернистого долерита. Гексагональные сетки трещин харак-

терны для весьма распространенной так называемой базальтической отдельности горных пород, изображения которой фигурируют во многих учебниках геологии. Известны также поразительно правильные гексагональные сетки растрескивания мерзлых грунтов [184] и трещин усыхания.

Правильные сетки образуют различно ориентированные (пересекающиеся друг другом) серии параллельных межбужинных пережимов в пределах одного пласта (рис. 36).

На рис. 37, а дано схематизированное изображение реальной структуры будинаж (рис. 36). Рис. 37, б дает более детальное изображение части той же структуры. Оно может трактоваться как изображение поверхности будинированного слоя в изолиниях. В то же время оно может служить графическим изображением распределения деформаций, приведших к образованию рассматриваемой структуры и механических напряжений, обусловивших деформацию слоя. Очевидно, что в местах пересечения межбужинных пережимов растягивающие напряжения имели максимальные значения, в центрах будин — минимальные. Точки максимальных и минимальных значений напряжений и обусловленных ими деформаций образуют соответственно ромбические узоры, располагаясь в узлах сеток (рис. 37, в).

Здесь мы должны снова обратиться к сходству симметрии структур будинаж и областей развития диапиризма, рассмотренному на с. 75, 76.

Рис. 38, заимствованный нами из книги А. Т. Асланяна [5], наглядно отражает определенную упорядоченность распределения соляных куполов и антиклиналей в Эмбенской провинции. Возможно, «направления зарождения куполов» могли бы быть проведены на этом рисунке и каким-либо другим образом. Нужно учитывать, что точки, размещенные в узлах правильной, например квадратной, сетки могут быть соединены прямыми линиями как по сторонам квадратов, так и по их диагоналям. Тем не менее достаточно четкая группировка диапировых структур в линейные цепочки пересекающихся направлений, т. е. расположение их в узлах правильной сетки, не вызывает сомнения.

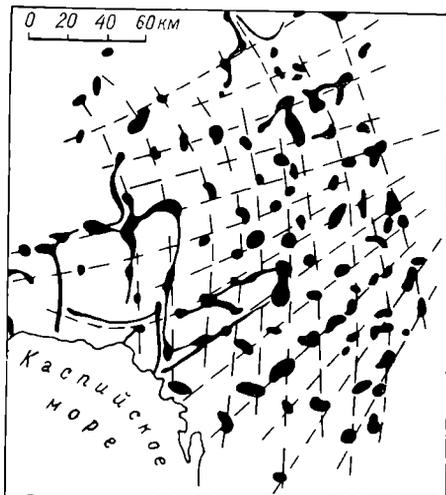


Рис. 38. Расположение соляных куполов и антиклиналей в Эмбенской провинции в узлах сетки пересекающихся «направлений зарождения куполов». По А. Т. Асланяну.

На примере структур будинаж мы выше выяснили, что при растяжении слоя по узлам правильной сетки могут располагаться максимумы растягивающих напряжений, обуславливающих деформацию слоя. Такого же эффекта можно ожидать и при растяжении надсолевой толщи, слагающей раму, вмещающую диапировые структуры. Естественно, что соль, находящаяся под тяжестью надсолевой толщи в лабильном состоянии, будет перемещаться в ослабленные участки, соответствующие максимумам растягивающих напряжений и деформаций рамы, подобно тому как материал слоев, вмещающих будинированные слои, внедряется в межбудинные пережимы и разрывы. При этом в качестве причины движения пород диапирового ядра выступают нарушение равновесия давлений (точнее — механических напряжений), наличие градиентов в поле напряжений, являющееся обязательным условием перемещения (миграции) любых подвижных фаз в земной коре [91, 94, 96], а не «гравитационное всплывание», представление о котором вступает в противоречие с отмечавшимися выше фактами (с. 75). Таким же образом, по-видимому, может быть объяснено симметричное расположение (приуроченность к узлам правильных сеток) кимберлитовых трубок, отмеченное А. А. Турским в Далды-Алакитском районе Якутии, и многих других «сетчатых» структурных форм.

Параллелограммы и шестиугольники, образующие плоские узоры сеток, являются основаниями параллелепипедов и призм, соответствующих формам элементарных ячеек пространственных решеток (решеток О. Браве), характеризующих семь кристаллографических сингоний (рис. 7). Такие именно формы характерны для блоков горных пород, ограниченных тектоническими трещинами. В качестве широко известных наглядных примеров этого могут быть названы призматическая, матрацевидная (параллелепипедальная) и ромбоэдрическая отдельности горных пород. Исследование симметрии пространственных тектонических решеток крупных масштабов сопряжено с серьезными трудностями, поскольку ограничены возможности непосредственного наблюдения различных гилсометрических уровней земной коры. Однако такое исследование представляется в настоящее время весьма целесообразным в связи со все более углубляющейся необходимостью поисков «слепых» рудных тел и месторождений, контролируемых разрывными нарушениями.

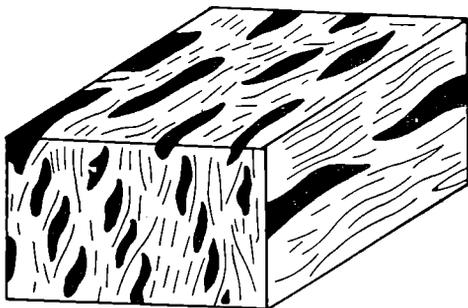
Правильные пространственные решетки контролируют размещение будин в некоторых структурах будинаж, что хорошо видно на приводимой блок-диаграмме обнажения (рис. 39), заимствованной из книги В. В. Белоусова [8].

С физической точки зрения формирование всех рассмотренных выше структур представляет собой результат деформации или нарушения сплошности геологических тел под воздействием полей механических напряжений. Симметричное размещение структурных форм в пределах того или иного геологического тела означает при этом, что деформации или нарушения сплошности распределились неравномерно, но с определенной периодичностью, т. е. симметрично.

При равномерном их распределении ни структурные формы, ни нарушения сплошности не могли бы возникнуть вообще — изменился бы только контур тела. Возникновение любых структурных форм в деформируемом теле отражает неравномерность распределения деформаций в нем, а периодичность (симметрия) их распределения — симметрию этой неравномерности.

Симметричное распределение структурных форм, образовавшихся в результате деформации первично однородных (в том масштабе, в котором обнаруживается симметрия) геологических тел, естественно, может быть связано только с соответствующим симметрично-неравномерным распределением механических напряжений в этих телах во время их деформации [92, 98].

Рис. 39. Симметричное распределение будни известняков в мергелях. Блок-диаграмма обнажения (Каратау). По В. В. Белоусову.



Помимо геологического материала аналогичная симметричная неравномерность распределения деформаций (и обусловивших их напряжений) устанавливается также в технической механике. В ней известны эффекты образования нескольких периодически расположенных шеек при растяжении длинных металлических стержней за пределами упругости материала, а также нескольких периодически расположенных боченкообразных раздувов на удлиненных металлических цилиндрах, подвергавшихся продольному сжатию [126]. Известны также эффекты образования нескольких полуволн продольного изгиба при внезапном сжатии стержня (вдоль его оси) и образования гофра при обжатии труб силами взрыва [53]. Отчетливо проявляется периодичность распределения линий Людера, которые могут рассматриваться в качестве аналога кливажа.

В целом периодичность пространственного распределения деформаций и обусловивших их напряжений в однородных твердых телах, очевидно, является общим свойством этого распределения. Возникновение при деформации одной структурной формы (одной складки, одной трещины, одной шейки и т. д.) можно рассматривать как частный случай образования периодически распределенной серии структурных форм при числе структурных форм  $n$ , равном единице. Равномерное распределение деформации в пределах деформированного тела соответствует частному случаю  $n \rightarrow \infty$ .

Симметричная неравномерность распределения механических напряжений в однородных твердых телах, проявляющаяся в телах различного состава и различных размеров и формы при разнообразных условиях деформации, должна иметь в своей основе действие единого физического механизма, способного делать это распределение симметрично-неоднородным.

Для понимания природы этого механизма имеет значение учет некоторых геологических феноменов, давно уже привлекающих внимание исследователей, но не получивших еще удовлетворительного истолкования. В числе таких феноменов прежде всего должно быть упомянуто явление преломления или рефракции кливажа, рассматривавшееся еще А. Харкером [179]. Аналогичное явление отмечается также для разрывных нарушений различных размеров. Причем А. Кнопф [182], В. М. Крейтер [63] и другие исследователи указывали, что преломление трещин подчиняется законом, аналогичным законам преломления света, подчеркивая теоретическую и практическую важность этого явления.

Достаточно часто встречается при геологических наблюдениях явление отражения кливажа или трещин от поверхностей раздела пород различного состава, причем угол падения равен углу отражения. Специальный анализ данных массовых замеров ориентировки тектонических трещин в вулканических породах и гранитоидах [22] обнаружил взаимосвязи пространственной ориентировки статистически выявляемых серий трещин в блоках горных пород по закону отражения (плоскости трех серий пересекаются в одной линии, причем углы, образованные двумя плоскостями с третьей, равны).

Еще один из упомянутых феноменов состоит в закономерной зависимости расстояний между трещинами в слоях горных пород одинакового состава, совместно подвергавшихся деформации, от мощностей этих слоев. Такая зависимость отмечалась в работах А. С. Новиковой [83], А. И. Петрова [88] и многих других исследователей. При аналогичных условиях обнаруживается закономерная зависимость от мощности слоя ширины (длины волны) складок, которые он образует при продольном сжатии [93]. Это относится также и к складкам пегматитовых жил [115].

Аналогично этому в технической механике устанавливается закономерная зависимость расстояний между периодически распределенными шейками, образующимися при растяжении длинных стержней, от диаметров стержней [126].

Далее, для приближения к решению вопроса о природе физического механизма, предопределяющего симметрично-неравномерное распределение напряжений в однородных телах, необходимо обратиться к некоторым общим положениям, относящимся к деформациям и напряжениям. На деформацию тела (системы) затрачивается энергия, сообщаемая системе внешним источником. Степень деформированности системы определяется, в конечном счете, количеством энергии, сообщенном системе, а скорость ее деформации — ско-

ростью поступления энергии, т. е. мощностью источника. Деформирующие нагрузки (источники энергии), действующие в естественных геологических процессах, так же как и нагрузки, связанные с деятельностью человека в области технической механики и других, весьма разнообразны по количествам энергии, сообщаемым деформируемым системам, и скоростям передачи энергии как в абсолютных их значениях, так и в величинах, отнесенных к массам или объемам систем, а также по характерам приложения к системе (в отдельной точке, на поверхности, во всех точках системы и т. п.).

Для кратковременных импульсных (динамических) нагрузок механизм передачи энергии от источника системе хорошо известен [37, 59, 62]. Энергия передается посредством волн напряжений, возникающих в месте приложения нагрузки и распространяющихся в системе со скоростью звука, т. е. посредством звуковых волн, генерируемых нагрузкой. Звуковые волны в твердых телах (объемные — продольные и поперечные; поверхностные — волны Релея и волны Лява) давно уже широко используются в сейсморазведке [30], а в последние годы стали применяться (в звуковом диапазоне частот) для геоакустических исследований [104].

Очевидно, нет оснований предполагать, что при длительно действующих («статических» или «квазистатических») нагрузках, которые не отделены от динамических нагрузок каким-либо естественным рубежом, может существовать какой-то другой механизм передачи энергии. Строго говоря, применение прилагательного «статическая» неоправдано для любой деформирующей нагрузки, так как любая деформация (процесс) — процесс динамический, обусловленный именно отклонением системы от состояния статического равновесия и направленный на достижение такого равновесия. В процессе деформации частицы, слагающие тело, смещаются относительно друг друга, т. е. им сообщаются ускорения и, следовательно, в них проявляются инерционные силы, как бы ни были последние малы. Если бы сила, действующая на систему, уравновешивалась противодействием системы, т. е. выполнялось бы условие статического равновесия  $\sum F = 0$ , то никакой деформации, разумеется, не происходило бы, поскольку нуль не может произвести работу, затрачиваемую на деформацию.

Представление о статическом характере длительно действующих нагрузок вполне правомерно в технической механике, когда в ней решаются задачи, в которых допустимы лишь пренебрежимо малые деформации. Когда же в геологии или в горной геомеханике мы ставим перед собой задачу исследования самой деформации, принятие нагрузки за статическую недопустимо, поскольку оно равнозначно отбрасыванию объекта исследований и исследованию нуля. Соответственно недопустим и механический перенос представлений и математических аппаратов, используемых в технической механике, в геологию. Неприменимость для целей геологии аппаратов, созданных для технической механики, в частности теории упругости, отмечалась неоднократно [173]. Особенно обстоятельно различия

постановки задач в геологии и технике рассмотрены Г. И. Гуревичем [32, 33] в работах, посвященных критике традиционных методов «механического анализа» в геологии и получивших по достоинству высокую оценку проф. М. М. Тетяева, заметившего, что «вся история с «механическим анализом» напоминает бессмертную сказку Андерсена о голом короле». Вместе с тем именно механическое перенесение в геологию неприменимых в ней методов технической механики и отражает применение к длительно действующим деформирующим нагрузкам термина «статическая».

Установив, что длительно действующие деформирующие нагрузки являются нагрузками динамическими, мы приходим к подтверждению высказанного выше предположения, что механизм передачи энергии при их воздействии на систему должен быть аналогичен тому, который устанавливается при воздействии кратковременных импульсных нагрузок. Для проверки этого предположения рассмотрим различия в характере воздействия на систему тех и других.

Импульсная нагрузка на графике «напряжение — время» или «сила — время» выразится в виде узкого пика, удлиненного по оси ординат ( $\sigma$ ,  $F$ ), а длительно действующая — в виде прямой, параллельной оси времени, сочленяющейся слева с восходящим, а справа с нисходящим отрезками кривых.

О графике импульсной нагрузки известно, что он, являясь периодической кривой, с помощью преобразований Фурье моновариантно раскладывается в ряд синусоидальных кривых (гармоник) с различными частотами и амплитудами и что этот ряд характеризует спектр импульса. Физически это означает, что импульс (нагрузка) и порожденная им волна напряжений в том виде, в котором они зафиксированы, представляют собой результирующие нескольких одновременно совершающихся колебаний величин нагрузок и напряжений.

О длительно действующей нагрузке известно, что приложение ее к системе может быть зафиксировано приборами в любой точке системы через промежуток времени, равный частному от деления расстояния между заданной точкой и точкой приложения нагрузки на скорость распространения звука в данной системе (среде). Также со звуковой скоростью распространяется в системе сигнал о снятии нагрузки. Это принято объяснять распространением «волны нагрузки», соответствующей восходящему отрезку кривой на графике (по приложению нагрузки), и «волны разгрузки», соответствующей нисходящему отрезку (по снятию нагрузки). Состояние системы в промежутке времени между этими двумя «волнами», соответствующем горизонтальному отрезку графика, принято считать стабильным («статическим»), несмотря на то, что в течение всего этого промежутка нагрузка сообщает системе энергию.

Вместе с тем и «волна нагрузки» и «волна разгрузки», взятые в отдельности, характеризуют однонаправленные конечные изменения состояния системы и не могут рассматриваться в качестве волн.

Волну образуют они лишь в совокупности (вместе с разделяющим их «стабильным» состоянием системы). Эта волна отличается от волны импульсной нагрузки формой, периодом и амплитудой, но ее график тоже представляет собой периодическую кривую и также моновариантно раскладывается в ряд гармоник. Из этого следует, что в течение всего времени приложения нагрузки величины самой нагрузки и вызываемых ею напряжений в системе колеблются с частотами и амплитудами, соответствующими таковым гармоник, полученных путем разложения графиков нагрузки и напряжения. Соответственно на всем протяжении действия нагрузки в системе распространяются волны напряжений (звуковые волны), переносящие энергию. При этом, любая напряженная система предстает в качестве автоколебательной, что вполне согласуется с утверждением Р. Бишопа о том, что «...достаточно располагать источником энергии, чтобы самовозбуждение колебаний стало возможным...» [10].

Таким образом, и с помощью предпринятой проверки мы приходим к выводу о единстве механизма передачи энергии, имеющего место при импульсных и длительных воздействиях деформирующих нагрузок. Очевидно, все наблюдаемые качественные различия в деформациях, вызываемых импульсными и длительными нагрузками (например, хрупкое разрушение тела при ударе и пластическая его деформация при длительном слабом воздействии), в конечном счете, обусловлены количественными различиями скорости передачи энергии от источника.

При относительно небольших величинах нагрузок энергия генерируемых ими волн напряжений и соответственно амплитуды этих волн могут быть очень малыми. В сущности в этих случаях мы имеем дело с «микровздуком» (в том числе ультра- и инфранизочастотных), в котором плотность энергии во много раз меньше, чем в привычных для нас звуковых волнах. В то же время величины прочности макроскопических твердых тел представляются нам несравнимо более значительными. Однако надо иметь в виду, что деформация твердых тел представляет собой процесс перестройки или разрушения молекулярных, атомных или ионных связей внутри тела, т. е. процесс, реализующийся на микроуровне. Для этого процесса существенны амплитуды колебаний, измеряемые ангстремами, и соответственно малые энергии.

Расчет, выполненный по материалам упоминавшихся выше опытов Г. В. Трапезникова, показал, что энергия элементарной бегущей волны, генерируемой в стальном стержне радиусом в 1 см растягивающей нагрузкой в 2000 кгс/см<sup>2</sup>, составляет около 22 эрг. Амплитуда волны — 1,44 Å, длина — 6,28 см. Вычисленная энергия волны незначительна в макромасштабах, но она в 10<sup>13</sup> раз превышает величину энергии единичной ионной связи в кристаллической структуре, определяемой Е. Д. Щукиным [171] в 2 · 10<sup>12</sup> эрг, и только в 300 раз меньше энергии, необходимой, исходя из расчетов того же автора, для разрыва всех связей в одном из сечений такого стержня. Если учесть, что частота колебаний в рассматриваемом случае составляет

около  $8 \cdot 10^4$  гц, то станет очевидным, что даже при незначительном поглощении энергии волн в стержне (при высокой его акустической прозрачности) достаточно небольшого отрезка времени для поглощения стержнем энергии, обеспечивающей макроскопически ощутимую его деформацию. Такое представление вполне согласуется с известными данными о накоплении дислокаций в кристаллической структуре и о зависимости величины предела прочности материала от времени воздействия нагрузки [51].

Установив, что при воздействии на систему любых деформирующих нагрузок энергия переносится волнами напряжений, мы получаем возможность объяснить причины симметрично-неравномерного распределения напряжений в геологических телах и существования тех геологических феноменов, о которых говорилось выше. Для этого необходимо учесть еще одно существенное обстоятельство.

Все реальные системы, в которых наблюдается симметричная неравномерность распределения деформаций, являются телами ограниченными. В связи с этим распространяющиеся в них волны напряжений, генерируемые нагрузкой, должны интерферировать внутри них и образовывать системы стоячих волн напряжений подобно тому, как образуются стоячие звуковые волны в воздухе закрытого помещения.

Стоячие волны характеризуются пространственной неравномерностью плотности энергии в отличие от пространственно-временной неравномерности плотности энергии, свойственной бегущим волнам. Образующиеся при этом интерференционные картины в зависимости от формы и свойств системы и характера приложенной нагрузки (в точке, на поверхности и т. д.) могут дать любые виды симметрии в распределении точек, линий или поверхностей с максимальной (пучности стоячих волн) или минимальной (узлы стоячих волн) интенсивностью колебаний и плотностью энергии. В соответствии с этим в нагруженной системе напряжения распределяются симметрично-неравномерно и также симметрично-неравномерно распределяются обуславливаемые ими деформации.

Разнообразные системы стоячих волн напряжений (звуковых волн), возникающие в твердых телах под воздействием импульсных нагрузок, известны уже давно и исследованы весьма обстоятельно. В частности, большое внимание уделено этому явлению еще в фундаментальном труде Д. У. Рэлея «Теория звука», вышедшем в свет в 1877—1878 гг. Наглядные проявления таких систем наблюдаются с помощью классических опытов Э. Ф. Хладни, описываемых во всех курсах физики. Существенно, что при деформации тел под воздействием любых нагрузок импульсных и длительных распределение образующихся в них структурных форм соответствует распределению линий или точек пучностей и узлов в характерных для этих тел хладниевых фигурах. Так, например, при обжатии круглой металлической мембраны на ней образуются концентрические и радиальные изгибы, создающие рисунок, аналогичный рисунку хладниевой фигуры, которая может быть получена на этой мембране.

Отмеченное обстоятельство можно рассматривать как наглядное подтверждение предположения о том, что именно возникновение системы стоячих волн напряжений обуславливает неравномерность пространственного распределения деформаций в однородных телах, приводящую к образованию структурных форм, и симметрия размещения структурных форм отражает симметрию этого распределения. В этом смысле существенно утверждение Р. Бишопа о том, что механические системы ведут себя так, как если бы они стремились непрерывно совершать свободные колебания по собственным формам с соответствующими собственными частотами [10]. В свете изложенного выше можно предположить, что такие колебания осуществляются в этих системах постоянно, только амплитуды их (и соответственно энергия) значительно меньше амплитуд, регистрируемых при обычных исследованиях колебаний механических систем. Собственные колебания системы, осуществляющиеся после поступления в нее энергии от внешнего источника, суть те же колебания, усиленные дополнительной энергией, «проявленные» для нас, но не нечто новое для системы. Скорее всего, микровзвукковые колебания, осуществляющиеся в механических системах без подвода энергии извне и определяющие характер собственных колебаний систем, суть интегральные выражения тепловых колебаний атомов, молекул и ионов, входящих в состав системы.

Что касается явлений отражения, преломления и рефракции, то они свойственны всем волновым процессам и лучи (направления распространения волн) напряжений должны испытывать эти явления на границах сред с различной акустической проницаемостью (с различной скоростью распространения звуковых волн), что и наблюдается в упоминавшихся выше случаях. Следует только заметить, что направления преломляющихся или отражающихся разрывных нарушений или кливажа нельзя отождествлять с направлениями лучей напряжений. Последние могут быть ориентированы под различными (определенными для каждого конкретного случая) углами к плоскостям разрывов или кливажа. Но в силу закономерной связи между ориентировкой лучей напряжений и возникающих разрывов любое изменение направления луча напряжений вызывает отклонение в ту же сторону и на тот же угол плоскости разрыва или кливажа.

Также свойственны всем волновым процессам зависимость частот (и соответственно длин волн) колебаний, осуществляющихся в системе, от размеров и формы самой системы, наличие у каждой системы собственных частот, характеризующих «динамическую индивидуальность системы» [10]. Поэтому естественно, что в слоях одинакового состава, но различной мощности при одинаковых условиях нагружения волны напряжений характеризуются различными длинами и частотами. Соответственно на разных расстояниях располагаются в них плоскости пучностей и узлов стоячих волн напряжений и, следовательно, структурные формы, возникающие при релаксации напряжений. При этом по аналогии со звучащими

(излучающими «макрозвук») струнами длина волны должна быть тем больше, чем больше мощность слоя, как это и наблюдается в природе.

Впервые предположение об интерференционной природе периодичности распределения механических напряжений (в приложении к распределению трещин в плутонах) высказал В. А. Апродов [4], указывая, что «на изменения внешних усилий порода реагирует изменением величины реакции, вследствие чего в ее теле образуются движущиеся упругие волны» и что «отраженная часть волн, идя навстречу основным колебаниям, будет интерферировать с ними и создаст явление, известное в физике под названием стоячих волн... Все это приводит к неравномерному распределению напряжений, действующих в породе, создавая зоны интенсивного дробления, ...соответствующие пучностям стоячих волн. В узлах стоячих волн образуются зоны покоя, где порода сохраняет свою монолитность» [10, с. 67]. В дальнейшем В. А. Апродов, к сожалению, по-видимому, не возвращался к разработке этого вопроса.

Необходимо упомянуть также о работах В. Н. Даниловича [35, 36], в которых он связывал образование волноподобных складчатых структур с волновым движением толщ горных пород в процессе их послойного течения, проводя прямую параллель между волнами, наблюдаемыми на поверхности воды, и складчатыми структурами слоистых толщ. «Замораживание» волнового движения пород В. Н. Данилович объяснял прекращением течения их, не учитывая того обстоятельства, что такая остановка должна была быть мгновенной и сопровождаться выделением огромных количеств энергии. Не говоря уже о том, что геологическими наблюдениями нигде не устанавливается обращения синклиналей в антиклинали и наоборот, что должно бы было наблюдаться повсеместно в случае справедливости представлений В. Н. Даниловича. Необратимость процесса складкообразования общепризнанна и нет никаких оснований предполагать саму возможность внезапной остановки движения огромных масс горных пород. Кроме того, на огромных территориях наблюдаются складчатые структуры, возникновение которых («замораживание» движущихся волн, соответствующее представлениям В. Н. Даниловича) не сопровождалось магматизмом или хотя бы существенным метаморфизмом пород. В целом В. Н. Данилович правильно интуитивно определил, что волнообразная (периодическая) структура складчатых образований должна быть обусловлена волновым движением. Однако он не сумел найти ни само волновое движение, реально осуществляющееся в деформируемых горных породах, ни механизм перехода от волн, пробегающих по телу, к пространственной локализации отражения волнового процесса.

Помимо прямого физико-механического преобразования исходных геологических тел (образование разрывов, структур будинаж, складок, рассланцевания и т. п.) механические напряжения, испытываемые этими телами, в той или иной степени контролируют и физико-химические процессы, происходящие в напряженных телах. Учиты-

вая волновую природу напряжений, мы можем объяснить симметричное распределение продуктов таких процессов.

В частности, ритмическая полосчатость, характерная для многих метаморфических пород, возникающая в первично однородных породах, или секущая первичную слоистость (рис. 40, а), может быть объяснена возникновением в ходе динамометаморфизма между двумя плоскими граничными поверхностями системы плоских стоячих волн с соответственно плоскими зонами интерференционного усиления (зоны пучностей) и ослабления (узловые зоны) напряжений. Расчленение первоначально однородного геологического тела на стабильные (в пространстве) зоны с различным по интенсивности напряженным состоянием приводит к локализации в этих зонах различных минеральных ассоциаций, причем ритмическое чередование зон пучностей и узлов обуславливает ритмический характер пространственного чередования этих ассоциаций.

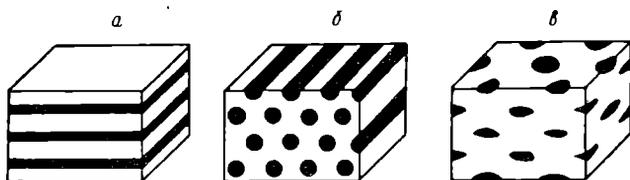


Рис. 40. Примеры симметричных вторичных (метаморфогенных) текстур: ритмично-полосчатая (а), карандашного гнейса (б) и очково-ливзовая (в).

Легко объясняется с этих позиций нередко выявляющееся в ритмично-полосчатых метаморфогенных текстурах наличие ритмов двух и более порядков. Оно связано со сложным спектральным составом волн напряжений, аналогичным сложному составу звука струны, излучающей помимо основного тона несколько обертонов.

В случае последовательного изменения мощностей ритмов, как и в любых других случаях проявления симметрии подобия в распределении напряжений, имеет место интерференция двух колебаний с близкими частотами, обуславливающая так называемые биения.

Аналогичным образом может быть объяснено возникновение ритмической полосчатости (псевдостратификации) интрузивных тел. Расслоение интрузии может произойти как после раскристаллизации большей части магмы (в твердом теле, содержащем интерстициальный расплав), так и до начала кристаллизации, поскольку в жидком расплаве волны напряжений распространяются по тем же законам, что и в твердом теле. Важно только, чтобы соответствующее напряженное состояние после его установления сохранялось достаточно долго и его отражение закрепилось в строении раскристаллизовавшегося интрузива. Для ритмично расслоенных интрузий также характерно проявление ритмов нескольких порядков.

Тот же самый механизм распределения напряжений может обусловить ритмичное расслаивание вязких лавовых потоков, медленно

стекающих по склонам вулканических конусов, т. е. возникновение полосчатых флюидальных текстур в эффузивных породах. В связи с трением подошвы потока о его ложе верхняя поверхность потока движется несколько быстрее, чем нижняя. Между ними возникает сдвиговое напряжение, реализующееся посредством соответствующих волн напряжений. Благодаря интерференции этих волн поток разделяется на плоско-параллельные ритмично чередующиеся зоны с различной величиной сдвигового смещения и соответственно различной степенью раскристаллизации вулканического стекла. Такое представление имеет и более общее значение, поскольку позволяет объяснить причину струйчатого характера любых ламинарных потоков.

Несколько более сложным интерференционным картинам в полях напряжений соответствуют условия возникновения текстур так называемых карандашных гнейсов (рис. 40, б) и очковых текстур с симметричным распределением очков (рис. 40, в).

Как видно из изложенного выше, симметрия распределения тектонических структур имеет весьма существенное теоретическое значение, позволяя подойти к рассмотрению механизма деформаций геологических тел и объяснить причины существования разнообразных геологических феноменов. Обнаруживаемая при этом связь симметрии распределения структурных форм с волновым процессом распространения механических напряжений в веществе, т. е. со звуковым (акустическим) полем, подчеркивает фундаментальность симметрии, связывая ее с фундаментальными волновыми свойствами материи, и в то же время расширяет наши представления о роли этих свойств в макромире и взаимосвязях процессов, проявляющихся на макро- и микроуровнях. Есть основания полагать, что и все остальные проявления симметрии (закономерной повторяемости) в структурах геологических тел, не связанные непосредственно с полями механических напряжений, так или иначе связаны с волновыми свойствами материи, с какими-либо волновыми процессами.

---

## СИММЕТРИЯ СТРУКТУР И ТЕКСТУР ГОРНЫХ ПОРОД

В приведенном выше обзоре литературы (см. гл. 2) уже обсуждался вопрос о возможных группах симметрии в структурной петрологии. Особое внимание было обращено на статью М. С. Патерсона и Л. Е. Вейсса, широко применивших понятия о симметрии к структурному анализу деформированных горных пород [185]. В табл. 4 содержится сводка симметричных характеристик для первичных структур осадочных и изверженных пород, согласно названным авторам. К этой таблице мы еще раз вернемся в конце настоящей главы. До этого остановимся на тех положениях, которые были сформулированы в уже упоминавшейся статье о группах симметрии в структурной петрологии [140].

В 1955 г. М. П. Волярович и Э. И. Пархоменко опубликовали работу о пьезоэлектрическом эффекте кварцсодержащих горных пород (гранитов, кварцитов, песчаников). Исследование ряда образцов показало, что пьезоэффект зависит от степени упорядоченности в ориентировке кварцевых зерен породы, а также от величины этих зерен [17]. Авторы упомянутой статьи справедливо полагают, что обнаруженное ими явление подтверждает правильность теоретических выводов А. В. Шубникова, согласно которым некоторые текстуры (структуры), отвечающие определенным типам симметрии, могут проявлять пьезоэлектрические свойства.

Статья М. П. Воляровича и Э. И. Пархоменко имеет и более широкий интерес: она показывает целесообразность применения понятий симметрии к структурам и текстурам горных пород. Следует сразу же оговориться, что понятия конечной симметрии нередко используются в структурной петрологии. Однако имеет смысл рассматривать текстуры как бесконечно протяженные системы. Именно такой подход получил разработку в трудах А. В. Шубникова, посвященных пьезоэлектрическим текстурам. Тому же автору принадлежит вывод пространственных групп, отвечающих симметрии непрерывных и частично прерывных однородных трехмерных пространств [161, 163, 169, 190, 191]. Остается лишь применить эти понятия к петрографическим объектам.

Попутно отметим необходимость всемерного использования в петрологии идей П. Кюри, неоднократно цитировавшихся выше. Напомним, что симметрия трактовалась П. Кюри, как «состояние

пространства, характерное для среды, где происходит данное явление. Для определения этого состояния надо не только дать отчет о строении среды, но и о состоянии движения изучаемого объекта, а также о физических факторах, действующих на него» [65].

Приведем некоторые примеры применения вышеупомянутых идей к текстурам и структурам горных пород, рассматриваемых как бесконечно протяженные системы. Прежде всего процитируем определение текстуры по А. В. Шубникову: «Под текстурой мы разумеем всякое однородное тело нерешетчатой структуры, состоящее из множества элементарных частиц любой физической природы, определенным образом (по законам симметрии) ориентированных в пространстве» [169]. В качестве примера А. В. Шубников упоминает кристаллические текстуры, состоящие из ориентированных игольчатых или пластинчатых кристаллов. Как видим, приведенное определение вполне приложимо к структурам и текстурам горных пород. Однако применяя его к природным объектам, желательно отделить генетическое значение структур и текстур в петрологии, а также выяснить различие между ними. Поэтому напомним соответствующие определения по В. С. Соболеву: «Структурные признаки горных пород связаны с самим процессом кристаллизации и разрушения минералов, т. е. с движением атомов, ионов и молекул породы в отдельных фазах системы. Тектурные признаки горной породы связаны с относительным движением фаз в процессе ее образования» [113].

Соответственно с этим в современной петрологии под *с т р у к т у р о й* подразумевается способ сочетания минеральных индивидов (в большинстве случаев кристаллических зерен), под *т е к с т у р о й* — минеральных агрегатов в породе (в зарубежной литературе эти понятия нередко трактуются в обратном смысле).

Среди петрографических объектов можно отметить ряд примеров с отчетливо выраженной симметрией (ленточные глины, флиш, метаморфическая полосчатость, расслоенные интрузивы, флюидальные текстуры эффузивных пород и др.).

Вместе с тем с кристаллографической точки зрения большинство петрографических структур и текстур, отвечающих кристаллическим агрегатам с известной упорядоченностью в расположении слагающих их мелких кристалликов, относятся лишь к приближенно закономерным сросткам. Поэтому говоря о симметрии таких объектов, надо помнить, что здесь обычно отсутствуют бросающиеся в глаза идеальные плоскости и оси симметрии, привычные нам по курсу геометрической кристаллографии. Здесь приходится иметь дело с элементами симметрии, устанавливаемыми статистическим путем (статистический подход обычно и применяется петрографами при структурном и микроструктурном анализе). Расположение большинства элементарных деталей структуры или текстуры удовлетворяет данной симметрии, но имеется также множество деталей, отклоняющихся от нее. Следует также иметь в виду, что связанные с движением природные элементы симметрии нередко отличаются

своим динамическим характером, проявляющимся лишь с течением времени. Все это накладывает на них в большинстве случаев отпечаток некоторого несовершенства и приближенности в отличие от идеальных элементов симметрии геометрических фигур идеализированных кристаллических тел.

Разберем в качестве примера симметрию пласта новосадки галита, описанного М. Г. Валяшко [11]. Эволюция кристаллов галита в самосадочных соляных озерах сводится к следующему. На поверхности озера квадратные пластинки NaCl, разрастаясь и погружаясь в раствор, образуют скелетные воронки в виде пирамидок. Такие пирамидки падают на дно и продолжают расти совместно. При этом в результате геометрического отбора те кристаллики, которые вследствие своей ориентировки быстрее всего разрастаются вверх, заглушают рост

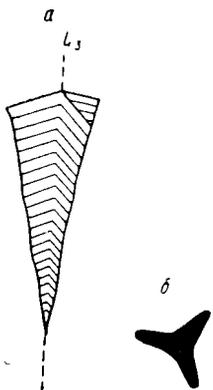


Рис. 41. Соляной «зуб» с симметрией  $L_33P - 3m$ . По М. Г. Валяшко.  
а — вид сбоку; б — вид сверху.

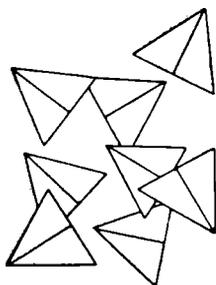


Рис. 42. Схематическое изображение текстуры с симметрией  $tt \cdot (\infty \cdot m)$ . По А. В. Шубникову.

остальных. Направление в кубах галита, соответствующее наиболее интенсивному росту, совпадает с тройной осью симметрии. Поэтому выросший на дне соляной пласт состоит в основном из кристаллических «зубьев», тройные оси которых ориентированы перпендикулярно плоскости дна (рис. 41). Горизонтальное сечение пласта слагается из множества более или менее правильных треугольников, повернутых относительно друг друга на всевозможные произвольные углы.

Изображение такого пласта, помещенное в статье М. Г. Валяшко, очень напоминает схематические рисунки текстур по А. В. Шубникову (рис. 42). Каждый зуб, взятый в отдельности, имеет внешнюю (видимую) симметрию  $L_33P - 3m$  (идеальная симметрия кристаллов NaCl —  $3L_44L_36L_29PC - m3m$ ). Однако если мы перейдем ко всей бесконечной совокупности таких зубьев, слагающих пласт, то увидим, что каждый центр зуба является как бы выходом вертикальной оси бесконечного порядка, в которой пересекается бесконечное количество вертикальных же плоскостей симметрии. Это происходит вследствие того, что каждый отдельный зуб окружен практически

бесконечным количеством подобных же зубьев, повернутых относительно первого на любые углы вокруг тройных осей симметрии.

Итак, статистически для каждой центральной оси зуба получим симметрию  $L_\infty \infty P - \infty m$ . Так как зубьев имеется бесчисленное множество, то мы получим бесчисленное множество параллельных осей симметрии бесконечного порядка, в которых пересекаются плоскости симметрии. Мало того, в любой точке пласта будут также пересекаться бесчисленные плоскости симметрии и, следовательно, также появятся оси симметрии бесконечного порядка. Такая бесконечная совокупность элементов получается из конечной симметрии  $L_\infty \infty P - \infty m$  путем добавления к ней группы переносов  $tt$ , в общем произвольных по величине и направлению, но все же образующих в пределах пласта однородное распределение зубьев. Бесконечная совокупность элементов симметрии  $tt \cdot L_\infty \infty P - tt \cdot \infty m$  относится к виду конечной симметрии  $L_\infty \infty P - \infty m$  аналогично тому, как федоровская пространственная группа относится к соответствующему виду симметрии. Следует лишь иметь в виду, что федоровские группы отвечают решетчатым структурам, тогда как группы А. В. Шубникова соответствуют структурам и текстурам нерешетчатого характера.

Найденные нами конечная и бесконечная симметрии для отдельных зубьев и всего пласта в целом должны согласовываться с симметрией породившей их среды. В последней имеют место вертикальные движения маточного раствора или же вертикальное движение частиц внутри него.

Такая среда как и любое гравитационное поле в любой своей точке имеет конечную симметрию  $L_\infty \infty P - \infty m$  (симметрию конуса), а ее суммарная бесконечная симметрия отвечает  $tt \cdot L_\infty \infty P$  или  $tt \cdot \infty m$ . Разобранный пример уясняет сущность подхода к симметрии структур и текстур горных пород вообще. Напомним, что методы стратиграфического изучения слоистых осадочных пород имеют много общего со структурными методами исследования эффузивных, интрузивных и метаморфических пород [48, с. 295—306].

Перейдем далее к рассмотрению в свете сформулированных выше идей нескольких характерных примеров, взятых из известной книги Н. А. Елисеева «Структурная петрология» [48]. Коснемся проблем, связанных со структурным изучением плутонов. Для этого обратимся к первичным структурам течения — линейным и слоистым [48, с. 9—20].

Параллельное расположение вытянутых или пластинчатых кристаллов, а также обособленных кристаллических скоплений в соответствующих текстурах связано с поступательным передвижением жидких (пластических) масс. Согласно П. Кюри, поток жидкости имеет симметрию стрелы (вернее копья) типа полярного вектора  $L_\infty \infty P - \infty m$ . Множество таких параллельных векторов в бесконечно протяженном пространстве отвечает уже разобранный выше группе симметрии  $tt \cdot L_\infty \infty P - tt \cdot \infty m$ . В породах, образовав-

шихся при подъеме или опускании масс, это и будет симметрией текстуры. В горизонтальном плутоне высота его значительно уступает протяжению по поверхности. В этом случае следует искать соответствующую симметрию не среди трехмерных пространственных групп, а среди групп, выражающих симметрию бесконечно протяженных листов (слоев). Рассматривая пласт породы как слой с различными сторонами (верхней и нижней), мы сохраним из приведенных выше элементов симметрии только бесконечное количество параллельных друг другу вертикальных плоскостей, направленных вдоль линий течения  $tt \cdot P - tt \cdot m$  (рис. 43, а).

Если частицы одновременно и передвигаются совместно со всей массой и медленно опускаются вниз, то сложение двух векторов — горизонтального (течение) и вертикального (сила тяжести) — дает косою диагональный вектор, который при достаточной высоте слоя может превратить плоскости симметрии в плоскости скользящего отражения  $tt \cdot P_t - tt \cdot c$  (рис. 43, б). В случае преобладания гравитации мы снова придем к симметрии  $tt \cdot L_\infty \infty P - tt \cdot \infty m$ , причем оси симметрии бесконечного порядка будут ориентированы перпендикулярно плоскости слоя.

Представляет интерес разоб-  
 рать с точки зрения симметрии закономерности, установленные для первичных трещин в плутонах [48, с. 20—27]. Естественные трещины отдельности  $Q$  (поперечные),  $S$  (продольные) и  $L$  (пологозалегающие) позволяют выкалывать глыбы, имеющие форму параллелепипедов с приближенной симметрией  $3L_2 3PC - mmm$ . Само собой разумеется, что здесь мы имеем дело с псевдосимметрией, обусловленной условиями формирования породы. Из упомянутых трех систем трещин только трещины  $S$ , соответствующие простиранию линий течения, совпадают с плоскостями симметрии, имевшими место в движущемся потоке и оставившими след в структуре закристаллизовавшейся массы. Пластовые трещины  $L$  возникают под нагрузкой, вызванной давлением кровли. Такое давление, направленное сверху вниз, отвечает в отдельных точках симметрии конуса  $L_\infty \infty P - \infty m$  и, казалось бы, исключает всякую возможность появления плоскости симметрии, перпендикулярной направлению давления. Однако массы, подстилающие породы, служат упором, оказывающим противодействие давлению, направленному снизу вверх.

Точечная симметрия этого противодействия также отвечает симметрии конуса. В результате пласт породы оказывается на стыке двух противоположно направленных сил, порождающих нечто вроде горизонтальной плоскости симметрии, параллельной трещинам  $L$ . Здесь мы как бы забываем разницу между верхней и нижней сторонами пласта и приписываем ему точечную симметрию биконуса или цилиндра  $L_\infty \infty L_2 \infty PPC - \infty / m m$  с горизонтальной плоскостью



Рис. 43. Пространственные группы  
 а —  $tt \cdot P (tt \cdot m)$ ; б —  $tt \cdot P_t (tt \cdot c)$ .

симметрии П. Трещины образуются в закристаллизовавшейся массе, в которой действие течения прекратилось.

В такой породе направленный характер текстуры по направлению линий течения и против него в отношении механических свойств проявляется слабо. Поэтому для механических воздействий существуют вертикальные плоскости псевдосимметрии, параллельные поперечным трещинам  $Q$ . Множество параллельных друг другу трещин типа  $Q$ ,  $S$  и  $L$  указывает, что содержащую их породу можно рассматривать как бесконечно протяженное тело с бесконечной псевдосимметрией типа  $tt \cdot 3L_2 3PC - tt \cdot mmm$  \*. Следует иметь в виду, что указанные приближенные плоскости симметрии являются лишь по отношению к механическим свойствам породы, вызывающим образование трещин.

В отношении других свойств, например пьезоэлектричества, ориентировка полярных направлений в природе сохраняет все свое значение. С этой точки зрения порода характеризуется симметрией, имевшей место до ее затвердевания  $tt \cdot P - tt \cdot m$ . Этой же симметрии отвечает и закономерность узоров текстуры, сохранившей следы бывшего движения. Однако представляет интерес и приближенная симметрия трещин, дающая понятие о распределении механических воздействий. Отметим, что по совокупности элементов симметрии механического силового поля  $tt \cdot L_\infty \infty L_2 \infty PPC - tt \cdot \infty/mm$  в породе проявляются лишь те, которые соответствуют ее текстуре. В самом деле в симметрии трещин  $tt \cdot 3L_2 3PC - tt \cdot mmm$  из бесконечного количества плоскостей симметрии появляются только те, которые параллельны линиям течения  $S$ , первичной слоистости  $L$  и плоскостям  $Q$ , перпендикулярным и тем и другим. На пересечении этих взаимно перпендикулярных плоскостей появляются системы взаимно перпендикулярных двойных осей, совпадающих с  $L_\infty$  и с двумя системами горизонтальных двойных осей из бесчисленного множества  $L_2$ . Как видим, симметрия трещин согласуется и с общей симметрией поля, частично совпадая с элементами ее пространственной группы, и со структурой породы.

Н. А. Елисеев в своей книге неоднократно подчеркивает необходимость учета геологического строения участков при анализе относящихся к нему образцов. Нельзя рассматривать отдельные пласты, отрывая их от всей массы породы. Отдельному пласту можно легко приписать симметрию  $tt \cdot L_\infty \infty L_2 \infty PPC - tt \cdot \infty/mm$ , тогда как симметрия всей совокупности пластов отвечает чаще всего либо  $tt \cdot L_1 - tt \cdot 1$  (триклинный сдвиг слоев), либо  $tt \cdot P - tt \cdot m$  (моноклинный сдвиг пластов), либо  $tt \cdot L_\infty - tt \cdot \infty$  (наличие в породе следов вращательных движений), либо  $tt \cdot L_\infty \infty P - tt \cdot \infty m$  (действие гравитационного поля). Это и будут пространственные группы, чаще всего имеющие место в природе и накладывающие свой отпе-

---

\* При характеристике таких пород используется понятие об эллипсоиде деформации (см. с. 32, 33), оси которого совмещены с трещинами  $L$ ,  $S$  и  $Q$ .

чаток на структуры и текстуры пород. В некоторых случаях при действии разностороннего давления силовые поля могут характеризоваться и другими типами симметрии с присутствием центров инверсии и горизонтальных плоскостей симметрии (вспомним пример симметрии систем трещин).

В ряде случаев сравнение внешней симметрии отдельных деталей породы с симметрией окружающей их среды позволяет уточнить время образования первых. Так, например, если внешняя (видимая) симметрия отдельных минеральных зерен или обособленных агрегатов зерен согласована с общей симметрией текстуры, то такие зерна и агрегаты выкристаллизовались во время образования текстуры. В случае одновременного образования зерен и текстуры симметрия их не является согласованной.

Само собой разумеется, что разобранные выше идеи симметрии с наибольшей эффективностью могут быть приложены к задачам микроструктурного анализа. И здесь симметрия отдельных образцов и шлифов из них должна быть согласована с общей симметрией геологической среды.

В качестве иллюстрации и характерного примера приведем разбор одной ориентирной диаграммы по Н. А. Елисееву [48, с. 200—201]. На диаграмму были нанесены полюсы пластинок слюды в мелкозернистом аркозовом песчанике (рис. 44). По поводу образования этой породы и ее симметрии Н. А. Елисеев пишет:

«Отлагавшиеся на дно водного бассейна пластинки слюды располагались параллельно напластованию, вследствие чего и получилась закономерная ориентировка, характеризующаяся симметрией вращения. Через минимум полюсов пластинок слюды можно провести бесчисленное множество плоскостей симметрии, кроме того имеется плоскость симметрии, перпендикулярная оси эллипсоида, соответствующая круговому сечению эллипсоида вращения» [48, с. 201]. Из приведенного описания видно, что изображенной на рис. 44 ориентирной диаграмме приписывается симметрия эллипсоида вращения или цилиндра  $L_{\infty} \infty L_2 \infty \infty PPS - \infty/mm$ . Однако мы знаем, что среда, из которой образовалась эта порода, имела симметрию гравитационного поля  $tt \times \times L_{\infty} \infty P - tt \cdot \infty m$ , несомненно наложившего свой отпечаток на породу. Думается, что эта симметрия, дающая понятие о генетических условиях, должна учитываться при определении симметрии соответствующих ориентирных диаграмм. С этой точки зрения представляет интерес разобрать и другие примеры, приводящиеся в курсах петрологии и, в частности, различные типы ориентировки зерен кварца в тектонитах [48, с. 218].

В заключение коснемся видов конечной (точечной) симметрии, наиболее характерных для петрологических объектов, и обратим

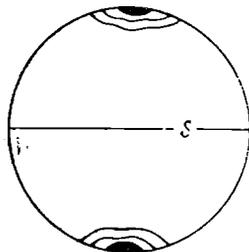


Рис. 44. Ориентирная диаграмма. По Н. А. Елисееву.



водящихся из семи предельных видов точечной симметрии. В этой схеме, заменяя  $n$  любыми целыми числами от бесконечно большого до единицы, мы найдем все виды симметрии, в которые могут переходить породы с перечисленными выше исходными симметриейными группами. В связи с тем, что особенно часто будут встречаться виды симметрии низшей категории, приводим отдельно схему их соподчинения (рис. 46).

Рисуя лишь в самых общих чертах простейший способ выявления динамической симметрии в структурной петрологии, мы ограничились здесь только точечной суммарной (статистической) симметрией горных пород. Возможное использование в данной области

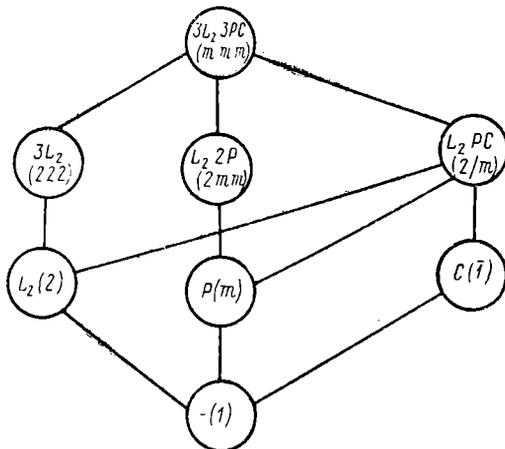


Рис. 46. Схема соподчинения видов симметрии низшей категории.

федоровских и шубниковских пространственных групп бесконечной симметрии, симметрии бордюров, лент, стержней и слоев, а также понятий криволинейной симметрии, симметрии подобия, цветной симметрии и антисимметрии затронуто нами лишь вкратце и требует дальнейшей разработки.

Резюмируя сказанное, подчеркнем еще раз, что при решении задач, относящихся к области динамической симметрии в петрографии, следует всемерно использовать приведенные здесь схемы соподчинения видов симметрии (рис. 45, 46), помогающие выявлять динамику переходов в сторону как пониженной, так и повышенной симметрии.

В заключение выразим уверенность в том, что подход к петрографическим объектам с позиций учения о симметрии позволит внести математическую четкость и ясность в трактовку соответствующих природных явлений.

## СИММЕТРИЯ ОКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДОВ \*

Симметрия природных кристаллических образований издавна привлекала пристальное внимание минералогов. Этот интерес вполне понятен: исходя из закономерностей огранения минералов, подкрепленных гониометрическими измерениями, исследователь нередко получает возможность прийти к уверенному заключению о принадлежности данных кристаллов к тому или иному конкретному минералу. Кристаллическая форма как важный диагностический признак была широко использована в минералогической литературе и практике и нашла свое отражение в многочисленных сводках, определителях и таблицах. Эта подсобная прикладная роль кристаллических фигур широко используется и сейчас при определении минералов.

Сказанным, однако, далеко не ограничивается значение кристаллических природных многогранников в истории сперва геолого-минералогических, а затем и физико-математических наук. Можно сказать, что все учение о кристаллографической симметрии с ее законами и обобщениями базируется чуть ли не всецело на богатейшем фактическом материале, накопленном исследователями окристаллизованных минеральных индивидов. Исходя из него, были сформулированы основные законы кристаллографии (и прежде всего закон постоянства углов), установлены 7 сингоний, 32 вида симметрии, 47 простых форм. В дальнейшем развитие теории, основанной все на том же фактическом фундаменте, привело ученых к выводу 14 типов решеток и 230 федоровских пространственных групп, подводя их вплотную к современной структурной кристаллографии.

Сведения об этих достижениях хорошо известны, а изложение их сущности читатель найдет в любом учебнике элементарной кристаллографии. Здесь нам хотелось бы обратить внимание на геолого-минералогическую сторону вопроса о симметрии минералов.

---

\* Минеральный индивид — «это образовавшееся в природе обособление однородного химического вещества, физически отделенное от других естественными поверхностями раздела. Индивидом является как природный кристалл, ограниченный кристаллическими гранями, так и каждое минеральное зерно или другое однородное выделение, отделенное от соседей поверхностями соприкосновения» [26, с. 12].

Категория	Сингония	Элементы симметрии
I. Низшая (общий признак — отсутствие осей симметрии порядка выше двух)	1. Триклинная	Нет ни осей, ни плоскостей симметрии. Элементы симметрии либо вовсе отсутствуют (—), либо имеется один центр инверсии $C$
	2. Моноклинная	Двойная ось или плоскость симметрии присутствуют в единственном числе — $L_2$ ; $P$ ; $L_2PC$
	3. Ромбическая	Имеется несколько двойных осей или несколько плоскостей симметрии — $3L_2$ ; $L_22P$ ; $3L_23PC$
II. Средняя (всегда присутствует одна ось симметрии порядка выше двух — главная. Помимо главной могут быть двойные оси, плоскости и центр инверсии)	4. Тригональная	Главная ось $L_3$ или $L_{i3}$
	5. Тетрагональная	Главная ось $L_4$ или $L_{i4}$
	6. Гексагональная	Главная ось $L_6$ или $L_{i6}$
III. Высшая (несколько осей симметрии порядка выше двух)	7. Кубическая	Всегда присутствуют $4L_3$

С этой целью прежде всего остановимся на статистических данных, показывающих какие именно законы симметрии наиболее характерны для природных кристаллических образований.

Для того чтобы облегчить понимание дальнейшего текста и напомнить необходимые данные по кристаллографической симметрии, в табл. 6 даются краткие характеристики трех категорий и семи сингоний. Законы симметрии, соответствующие тридцати двум видам, сведены в табл. 7. Выводящиеся из них простые формы совокупности граней, связанных элементами симметрии, показаны на рис. 47—49.

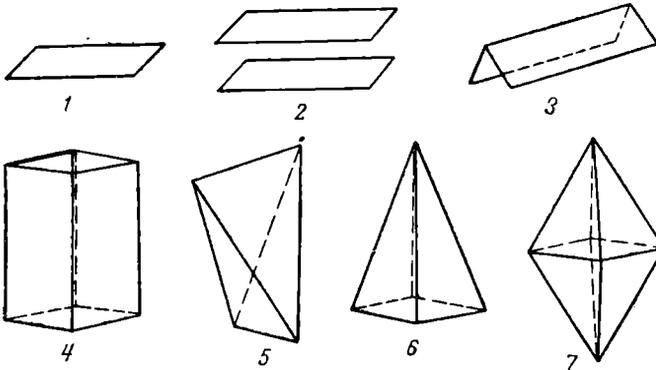


Рис. 47. Простые формы низших сингоний.

1 — моноэдр; 2 — пинакоид; 3 — диэдр; 4 — ромбическая призма; 5 — ромбический тетраэдр; 6 — ромбическая пирамида; 7 — ромбическая дипирамида.

Категория	Сингония	Виды		
		Примитивные	Центральные	Планальные
Низшая	Триклинная	1) — (1)	2) $C$ ( $\bar{1}$ )	
	Моноклинная			3) $P$ ( $m$ )
	Ромбическая			6) $L_2 2P$ ( $mm$ )
Средняя	Тригональная	9) $L_3$ (3)	10) $L_3 C$ ( $L_{i3}$ ) ( $\bar{3}$ )	11) $L_3 3P$ ( $3m$ )
	Тетрагональная	14) $L_4$ (4)	15) $L_4 PC$ ( $4/m$ )	16) $L_4 4P$ ( $4mm$ )
	Гексагональная	21) $L_6$ (6)	22) $L_6 PC$ ( $6/m$ )	23) $L_6 6P$ ( $6mm$ )
Высшая	Кубическая	28) $4L_3 3L_2$ (23)	29) $4L_3 3L_2 3PC$ ( $m\bar{3}$ )	30) $4L_3 3L_2 (3L_{i4}) 6P$ ( $\bar{4}3m$ )

Напомним, что в связи с решетчатым структурным строением в кристаллах возможны лишь оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков как простые, так и инверсионные:  $L_1 = -(\bar{1})$ ;  $L_2 (2)$ ;  $L_3 (3)$ ;  $L_4 (4)$ ;  $L_6 (6)$ ;  $L_{i1} = C (\bar{1})$ ;  $L_{i2} = P (m)$ ;  $L_{i3} = L_3 C (\bar{3})$ ;  $L_{i4} (\bar{4})$ ;  $L_{i6} = L_3 \Pi (\bar{6})$ . В бесконечно протяженных структурах винтовые оси характеризуются теми же порядками.

Усиленная работа над расшифровкой кристаллических структур минералов привела к тому, что мы сейчас обладаем богатейшими и достаточно надежно обоснованными материалами по микро-, а тем самым и макросимметрии минералов\*. Интересующие нас сведения в кратком и обобщенном виде находятся в общеизвестных «минералогических таблицах» Х. Штрунца, регулярно переиздаваемых и обновляемых автором, в монографии А. С. Поваренных

\* Структурная минералогия (учение о структуре минералов) достигла в настоящее время блестящего расцвета. В особенности следует здесь напомнить об основополагающих трудах советской школы кристаллографов, возглавляемой акад. Н. В. Беловым.

## СИММЕТРИИ КРИСТАЛЛОВ

СИММЕТРИИ

Аксиальные	Плاناксиальные	Инверсионно-примитивные	Инверсионно-планальные
4) $L_2$ (2)	5) $L_2PC$ ( $2/m$ )		
7) $3L_2$ ( $222$ )	8) $3L_23PC$ ( $mmm$ )		
12) $L_33L_2$ ( $32$ )	13) $L_33L_23PC$ ( $\bar{3}m$ )		
17) $L_44L_2$ ( $422$ )	18) $L_44L_25PC$ ( $4/mmm$ )	19) $Li_4(L_2)$ ( $\bar{4}$ )	20) $Li_42L_22P$ ( $\bar{4}2m$ )
24) $L_66L_2$ ( $622$ )	25) $L_66L_27PC$ ( $6/mmm$ )	26) $Li_6(=L_3P)$ ( $\bar{6}$ )	27) $Li_63L_23P$ ( $=L_33L_24P$ ) ( $\bar{6}2m$ )
31) $3L_44L_36L_2$ ( $432$ )	32) $3L_44L_36L_29PC$ ( $m3m$ )		

«Кристаллохимическая классификация минеральных видов» и других капитальных сводках [99, 192]. Эти данные в 1966 г. были обобщены и суммированы в специальной статье А. С. Поваренных, материалы которой послужили основой для нижеследующих обобщений [100].

О распределении минералов по всем видам симметрии и сингониям дает наглядное представление табл. 8 (в ней учтены лишь минералы с известными пространственными группами и тем самым достаточно строго установленными видами симметрии).

Обратим сперва внимание на распределение минералов по соответствующим видам симметрии, расположенным по вертикальным столбцам. Здесь бросается в глаза резкое скопление минералов всех сингоний в планаксиальных видах симметрии, т. е. в видах с высшей симметрией (триклинную и моноклинную сингонию удобно рассматривать как одну строчку). Больше половины всех минералов (66%) относится именно к этой графе. Вслед за графой с планаксиальными видами симметрии, хотя и значительно уступая ей в количественном отношении, следуют графы с центральными (13,5%),

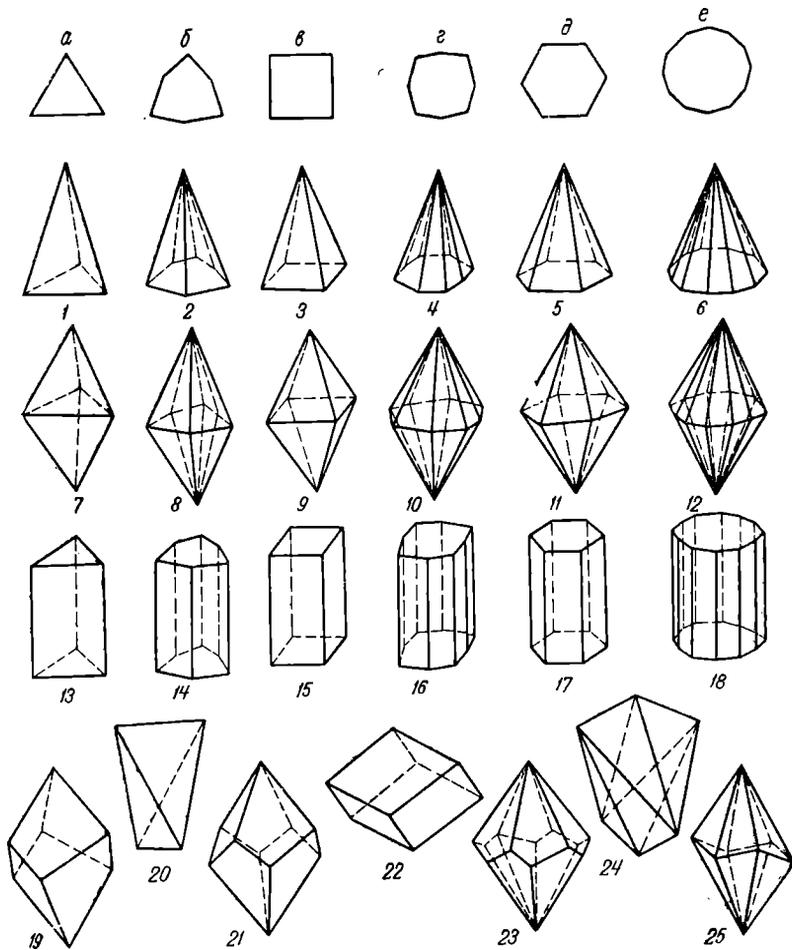


Рис. 48. Простые формы средних сингоний.

Формы оснований (грани моноэдров и пинакоидов) и сечений, перпендикулярных главной оси: а — тригон; б — дитригон; в — тетрагон; г — дитетрагон; д — гексагон; е — дигексагон. Пирамиды: 1 — тригональная, 2 — дитригональная, 3 — тетрагональная, 4 — дитетрагональная, 5 — гексагональная, 6 — дигексагональная; дипирамиды: 7 — тригональная, 8 — дитригональная, 9 — тетрагональная, 10 — дитетрагональная, 11 — гексагональная, 12 — дигексагональная; призмы: 13 — тригональная, 14 — дитригональная; 15 — тетрагональная; 16 — дитетрагональная, 17 — гексагональная, 18 — дигексагональная; 19 — тригональный трапецоэдр; 20 — тетрагональный тетраэдр; 21 — тригональный трапецоэдр; 22 — ромбоэдр; 23 — гексагональный трапецоэдр; 24 — тетрагональный скаленоэдр; 25 — тригональный скаленоэдр.

ТАБЛИЦА 8

## КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ПО СИНГОНИЯМ И ВИДАМ СИММЕТРИИ

8  
Заказ 1234

Категория	Сингония	Виды симметрии							$\Sigma$ минералов (%)	
		Примитивные	Центральные	Планальные	Аксиальные	Планоаксиальные	Инверсионно-примитивные	Инверсионно-планальные	по сингониям	по категориям
Низшая	Триклинная	12	76						88 (6,5)	760 (57,5)
	Моноклидная			28	14	351			393 (30)	
	Ромбическая			34	32	213			279 (21)	
Средняя	Тригональная	6	22	20	11	84			143 (11,5)	377 (29,5)
	Тетрагональная	2	23	1	13	72	3	17	131 (10)	
	Гексагональная	7	26	13	8	43	Не обн.	6	103 (8)	
Высшая	Кубическая	5	30	33	1	102			171 (13)	171 (13)
$\Sigma$ минералов по видам симметрии (%):		32 (2,5)	177 (13,5)	129 (10)	79 (6)	865 (66)	3 (—)	23 (2)	1308 (100)	

113

а затем планальными (10%). Значительно беднее минералами примитивные и аксиальные виды симметрии.

Кристаллы с правыми и левыми энантиоморфными формами относятся лишь к примитивным и аксиальным видам симметрии и составляют всего 8,5% от общего количества минералов. Остальные

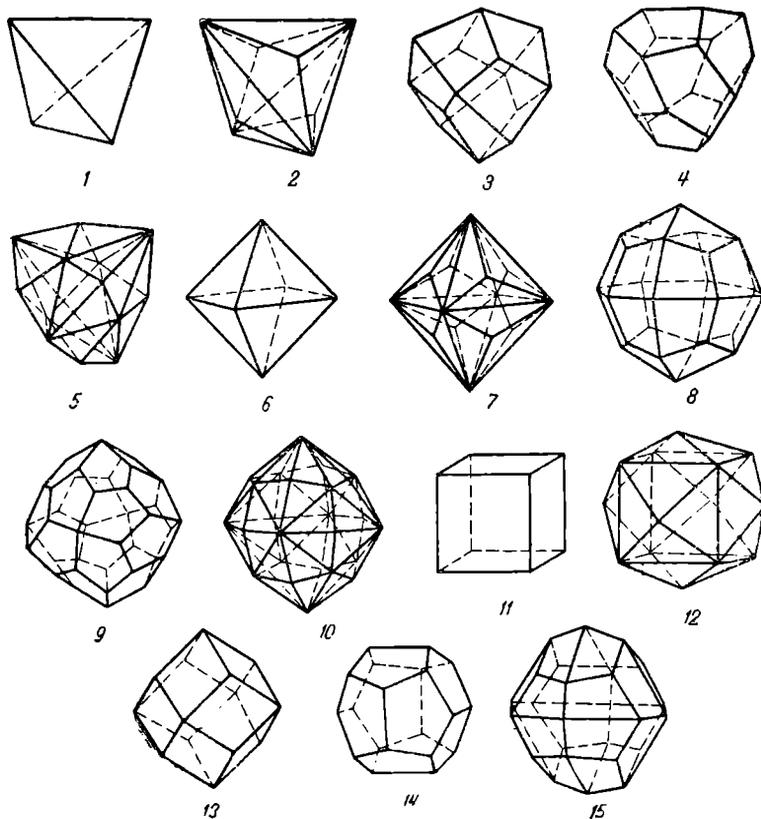


Рис. 49. Простые формы кубической сингонии.

1 — тетраэдр; 2 — тригон-тритетраэдр; 3 — тетрагон-тритетраэдр; 4 — пентагон-тритетраэдр; 5 — гексактетраэдр; 6 — октаэдр; 7 — тригон-триоктаэдр; 8 — тетрагон-триоктаэдр; 9 — пентагон-триоктаэдр; 10 — гексоктаэдр; 11 — гексаэдр (куб); 12 — тетрагексаэдр; 13 — ромбододекаэдр; 14 — пентагон-додокаэдр; 15 — дидодокаэдр.

91,5%, т. е. подавляющее большинство, принадлежат к видам симметрии без правизны и левизны (в их состав обязательно должны входить инверсионные оси и, в том числе, прежде всего плоскости симметрии — инверсионные оси второго порядка, и центр инверсии — инверсионная ось первого порядка. Вместе с тем не следует забывать и того, что к кристаллам с ярко выраженной правизной и левизной относится такой распространенный минерал, как кварц.

Переходим далее к распределению минералов по сингониям (горизонтальные строчки табл. 8).

Первое место по количеству минералов занимает моноклиная сингония (30% изученных минералов), далее следует ромбическая (21,5%), а на третьем месте стоит кубическая (13%).

Обращает на себя внимание закономерное падение суммарного числа минералов по мере снижения строчек правого столбца (исключение составляют лишь верхняя и нижняя строчки, соответствующие бедной минералами триклинной сингонии и богатой ими кубической). Эта закономерность выразится еще ярче, если мы совместим горизонтальные строчки не с сингониями, а с федоровскими «системами», которые получаются при элементарном выводе видов симметрии (по Е. С. Федорову: виды симметрии с одной исходной — главной осью «естественнее всего, конечно, соединить в системы... по наименованию главной оси» [129, с. 33]). При этом триклинная и моноклиная сингонии объединятся в одну систему и окажутся в одной горизонтальной строке табл. 8, а указанная выше закономерность проявится без всяких исключений для всех низших и средних сингоний (число минералов падает параллельно с возрастанием наименования исходной, главной, оси). Особняком будет стоять лишь кубическая система (171—13%).

Еще нагляднее демонстрируется закономерное падение чисел минералов при разбивке последних не на отдельные сингонии или системы, а на три категории — низшую, среднюю и высшую (табл. 8).

Приведенные цифры показывают и еще одну, бросающуюся в глаза приближенную закономерность:  $\Sigma$  минералов низшей категории :  $\Sigma$  минералов средней категории :  $\Sigma$  минералов высшей категории = 760 : 377 : 171 =  $4_{CA} : 2_{CA} : 1$ .

Возможно, что для объяснения данной пропорции следует привлечь на помощь федоровский «эллипсоид сингонии» (по Е. С. Федорову: «Закон эллипсоида сингонии утверждает, что геометрические свойства комплекса всякого данного кристалла находят выражение в особом, для него характерном эллипсоиде» [131, с. 113]). Для кристаллов высшей категории (кубической сингонии) эллипсоидом сингонии является шар  $\infty L_{\infty} \infty PC - \infty/\infty m$ . Для кристаллов средней категории имеем эллипсоид вращения  $L_{\infty} \infty L_2 \infty \infty PPC - \infty/m m$ . Переход от шара к такому эллипсоиду совершается путем растяжения или сжатия шаровой формы. В результате получаем два эллипсоида вращения: вытянутый (+) и сплюснутый (-).

Кристаллы низшей категории характеризуются трехосным эллипсоидом сингонии  $3L_2 3PC - m m m$ . Последний образуется из эллипсоида вращения в результате его растяжения или сжатия вдоль любой из осей  $L_2$ . В итоге приходим к четырем трехосным эллипсоидам, продуктам сжатия или растяжения положительного и отрицательного эллипсоидов вращения (+  $\rightarrow$  +, -; -  $\rightarrow$  +, -). При соответствующих трансформациях следует выделять главную

ось кристалла, совпадающую с осью  $L_{\infty}$  эллипсоида вращения, сохраняя «память» о ней и при переходе к трехосному эллипсоиду (растяжение или сжатие происходило в плоскости кругового сечения эллипсоида вращения). Итак, кристаллы высшей категории характеризуются единым шаром, кристаллы средней — двумя эллипсоидами вращения, а кристаллы низшей — четырьмя трехосными эллипсоидами. Не связана ли с этим и отмеченная выше статистическая пропорция 4 : 2 : 1? [150].

Закономерное возрастание числа минералов при понижении их симметрии несомненно связано с известным статистическим законом Федорова — Грота (чем сложнее химический состав, тем обычно ниже симметрия кристаллов и наоборот). Здесь наглядно демонстрируется преобладание природных минералов со сложным химическим составом. Большинство силикатов и других соединений сложного состава кристаллизуется в низших сингониях. И обратно, 50% самородных элементов и большинство бинарных соединений относятся к кубической сингонии. По подсчетам А. С. Поваренных, «три четверти всех кубических минералов приходится на минералы бинарного состава» [100, с. 350].

Следует также заметить, что закон Федорова — Грота имеет и эволюционно-генетический характер. В литературе уже отмечалась связь статистически-закономерного падения симметрии минералов «с общим процессом геологического развития от простого к сложному» [112].

Представляет интерес выявленное Ю. Б. Мариным распределение акцессорных минералов по сингониям в гранитоидах разных формационных типов [74]. В поздних формациях гранитоидных серий уменьшается роль минералов кубической сингонии и, напротив, заметно увеличивается роль минералов низших сингоний.

Таким образом, в общем процессе геологического развития на разных уровнях эволюции происходит закономерное понижение симметрии акцессорных минералов.

Переходим далее к вопросу о взаимосвязи между внешней формой и внутренним строением кристаллов. Сразу же отметим огромный интерес этой проблемы для минералогии и геологии. Ведь она решает вопрос о том, какие именно структуры реализуются в природе и как они проявляются на внешнем ограничении кристаллов.

В своих капитальных трудах «Критический пересмотр форм кристаллов минерального царства» [130] и «Das Kristallreich» («Царство кристаллов», 1920) Е. С. Федоров сводил все разнообразие кристаллических структур к четырем типам пространственных решеток: примитивной, объемоцентрированной, гранецентрированной и призматической (гексагоналоидной). Сюда относятся как четыре исходные идеальные решетки (три кубические и одна гексагональная), так и их производные, полученные в результате однородных деформаций (сдвигов и растяжений).

Опираясь на известный закон О. Браве, согласно которому важнейшие грани кристалла должны обладать наиболее плотными сет-

ками, легко найти для каждого типа решетки соответствующие, первостепенные по важности гранные формы (рис. 50). Это будут: для примитивных решеток —  $\{100\}$ , для объемоцентрированных —  $\{110\}$ , для гранецентрированных —  $\{111\}$ .

Статистически находя важнейшие в отношении развития и частоты появления грани кристаллов данного вещества и определив их символы (в правильной федоровской установке), мы тем самым, казалось бы, должны находить и тип решетки, лежащей в основе структуры.

Однако уже и тогда обращали на себя внимание некоторые характерные неувязки с теоретическими схемами. Среди них особенное недоумение вызывало полное отсутствие пинакоида на кристаллах кварца, несмотря на то, что в соответствующей гексагональной решетке сетки  $\{0001\}$  по своей плотности занимают первое место.

Первые же расшифровки реальных кристаллических структур с помощью рентгеноанализа показали, что прежний подход, основан-

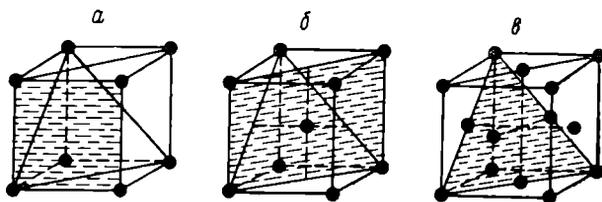


Рис. 50. Важнейшие плоские сетки в кубических решетках.

$a$  — примитивная  $\{100\}$ ;  $б$  — объемоцентрированная  $\{110\}$ ;  $в$  — гранецентрированная  $\{111\}$ .

ный на вычислении плотностей сеток в решетках, являлся слишком упрощенным.

Лучшей иллюстрацией к сказанному могут служить затруднения, связанные с такой простой структурой, как поваренная соль. Как известно, решетка О. Браве, объединяющая однородные и параллельно ориентированные атомы, является здесь центрогранной. Для последней, однако, плотнейшими сетками являются плоскости  $\{111\}$ . В то же время реальные кристаллы поваренной соли характеризуются преимущественным развитием граней куба, преобладание которых типично для примитивной решетки.

Сам Е. С. Федоров по поводу таких затруднений писал: «Оказалось, что на кристаллы никоим образом нельзя смотреть, как на простые пространственные решетки частиц, так как каждый разряд атомов образует самостоятельные решетки, и на опыте плотность расположения атомов оказалась более важным фактором, чем плотность расположения частиц» [132, с. 161]. Под «частицами» ученый здесь подразумевал ныне устаревшее понятие о «кристаллических молекулах».

Впоследствии подробной разработкой данной проблемы занялся известный швейцарский минералог и кристаллограф П. Ниггли

(1885—1958). Вместо прежних ретикулярных плотностей он вычислял нагрузки сеток с учетом коэффициентов, соответствующих атомным весам или порядковым номерам разнородных атомов, слагающих сетку. Учитывал он также межплоскостные расстояния, характер узоров сеток и пр. Полученные результаты проверялись им на статистически обработанном материале по кристаллам минералов. В результате П. Ниггли пришел к выводу об отсутствии единого общего рецепта для разрешения вопроса о взаимосвязи внутренней и внешней геометрии кристалла и о необходимости индивидуализированного подхода в случае той или иной конкретной структуры. Ясно, что при таком неоднозначном решении приходилось прибегать к своеобразному «подтягиванию» статистических данных по ограничению кристаллов к установленной структуре.

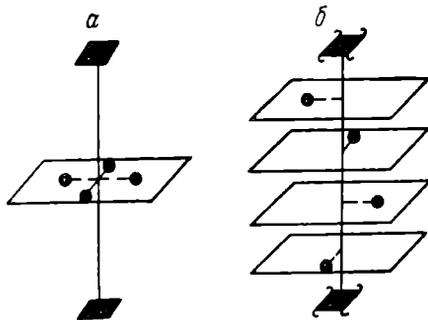


Рис. 51. Влияние на плотность сеток простых (а) и винтовых (б) осей симметрии.

рамки закона Браве, заменив пространственную решетку, т. е. совокупность чистых трансляций, совокупностью элементов симметрии федоровской пространственной группы [176].

Согласно принципу Доннэя — Харкера, морфологическая важность граней зависит от элементов симметрии, перпендикулярных их плоскостям. Грани, перпендикулярные простым осям и плоскостям симметрии, морфологически важнее, чем грани, перпендикулярные винтовым осям тех же порядков и плоскостям скользящего отражения (рис. 51). Зная симметрию федоровской пространственной группы, можно предсказать соответствующее ей развитие форм. И обратно, гранная морфология кристалла дает некоторые указания на его принадлежность к определенной пространственной группе. Принцип Доннэя — Харкера позволил уточнить закон Браве и объяснить ряд отклонений от него. Например, отсутствие на кристаллах кварца пинакоида, занимавшего первое место в теоретической последовательности, по Браве, связано с наличием в структуре не простых, а винтовых тройных осей. Действие последних снижает плотность пинакоида и переносит его с первого места на восьмое.

И все же принцип Доннэя — Харкера является лишь схематическим приближением к разрешению проблемы о связи структуры

Несмотря на всю скрупулезность нового подхода, анализ с этих позиций реального ограничения минералов снова показал ряд аномальных отклонений. Проблема «структура — морфология» по-прежнему оставалась не решенной до конца.

Такое положение привело к тому, что И. Д. Х. Доннэй и Дж. Харкер предложили вернуться к упрощенным и схематизированным приемам. Они сделали попытку расширить

и внешней кристаллической формы. Не избежали авторы и ряда отклонений от фактических данных. Так, например, по И. Д. Х. Донзю и Дж. Харкери, наиболее важными гранями поваренной соли должны быть грани октаэдра, а не куба, столь характерного для кристаллов поваренной соли.

Дальнейший шаг представили работы А. Ф. Вэлса и двух советских авторов, независимо от него пришедших к сходным выводам [78, 193]. А. Ф. Вэлс обратил внимание на взаимодействие между атомами (молекулами) в различных гранях кристалла с растворителем и другими молекулами в растворе.

Особенно существенную роль играет адсорбция соразтворенного постороннего вещества с сетками различных граней кристалла. Именно ее влиянием можно объяснить появление различных габитусных форм для кристаллов одного и того же вещества — явление,

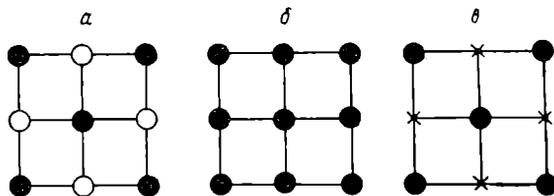


Рис. 52. Динамика сетки (100) для структуры поваренной соли в химически различных средах.

*a* — сетка (100); *б* — то же, в нейтральной среде; *в* — то же, в активной среде.

остававшееся необъяснимым в предыдущих теориях. Напомним, что отложение чуждых частиц на гранях тормозит их рост и тем самым способствует их разрастанию вширь.

В. И. Михеевым и И. И. Шафрановским была выдвинута идея о динамическом поведении одной и той же структуры в различных физико-химических средах. В активных (кислых или щелочных) средах энергетически первенствующую роль играют одинаково заряженные частицы (катионы или анионы). В нейтральных средах и те и другие имеют как бы равноправное значение. Поэтому, например, структура поваренной соли ведет себя то как центрогранная решетка (действуют преимущественно однородные ионы), то как простая кубическая (и катионы и анионы одинаково активны; рис. 52). В первом случае кристаллы поваренной соли получают октаэдрическую форму, во втором — кубическую. Эти взгляды в общем выдержали испытание временем и учитываются современными авторами [134].

В последнее время широкую известность получили работы П. Хартмана и В. Пердока, согласно которым для решения проблемы «морфология — структура» должны быть использованы не плоские сетки, а структурно важные направления в кристаллах [180].

Кристаллические грани делятся на три типа в зависимости от их расположения относительно наиболее интенсивных сил связей —

*ПЦС* (периодические цепочки связей). Важнейшими гранями являются плоскости *F*,<sup>\*</sup> параллельные по меньшей мере двум векторам *ПЦС*. На втором месте стоят «ступенчатые» грани *S*, параллельные только одному вектору *ПЦС*. Наконец, грани *K* («неровные»), расположенные косо ко всем векторам *ПЦС*, должны встречаться очень редко или вовсе отсутствовать (рис. 53).

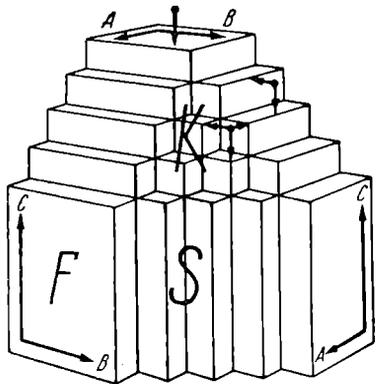


Рис. 53. Грани *F*, *S* и *K* на модели кристалла. По П. Хартману и В. Пердоку.

Заслуживает внимания новая методика структурно-геометрического анализа кристаллических граней, разработанная Н. З. Евзиковой. Согласно этой методике, следует вычислять не плотность отдельных плотных сеток, а плотность элементарного слоя — слоя предельно малой толщины, способного возникнуть на грани растущего кристалла. «Плотность грани есть плотность ее элементарного слоя. Плотность грани

кристалла прямо пропорциональна толщине ее элементарного слоя» [47, с. 129].

Как видим, проблема «морфология — структура» порождает все новые и новые подходы с соответственными поправками, детализа-

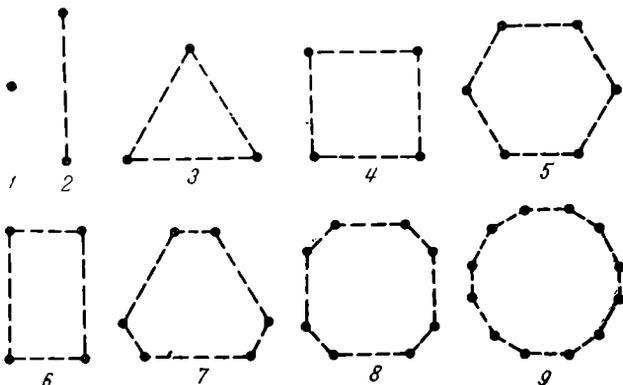


Рис. 54. Девять плоских простых вершинных форм.

ций и пр. И все же, несмотря на все новшества, в основе продолжает сохраняться принцип О. Браве, хотя и значительно модернизированный.

Следует подчеркнуть, что габитусные грани кристаллов чаще всего соответствуют наиболее плотным плоским сеткам или элемен-

тарным слоям. Тем самым они носят ярко выраженный структурный характер.

Взаимосвязь между структурой и ограничением кристаллов весьма усложняется воздействием внешних условий. Нельзя не обратить внимания на промежуточную ступень между ними, а именно: на внутреннее сложение (текстуру) кристаллов с ее неоднородностями в виде пирамид и зон роста.

Сейчас многими авторами обращается особое внимание на детальную разработку внутренней морфологии кристалла. Одним из основоположников данного направления является Г. Г. Леммлейн [68]. В настоящее время идет работа по развитию соответствующей геометрии. Здесь с успехом применяются понятия о реберных и граничных пучках, отвечающих формам роста вершин и ребер, более или менее ясно улавливаемых внутри некоторых кристаллических тел и резко выступающих на скелетных кристаллах [6, 79]. Роль этих форм роста четко отображена в следующей формулировке проф. Д. П. Григорьева: «Рост реального кристалла осуществляется за счет отложения вещества на различных элементах его формы: пирамидах роста граней, плоскостях роста ребер и линиях роста вершин» [178]. Детальное изучение таких образований потребовало вывода простых реберных и вершинных форм — совокупностей ребер и вершин, связанных элементами симметрии, т. е. аналогов простых граничных форм [148] (рис. 54, 55).

Нет сомнений в том, что обсуждение проблемы «структура — внешнее оформление» не может обойтись без учета внутреннего сложения реального кристалла. Последнее содержит как бы законсервированную историю развития кристалла, конечный этап которой оформлен в виде внешнего ограничения. Учет этой переходной ступени со всеми ее несовершенствами и дефектами объяснит многие

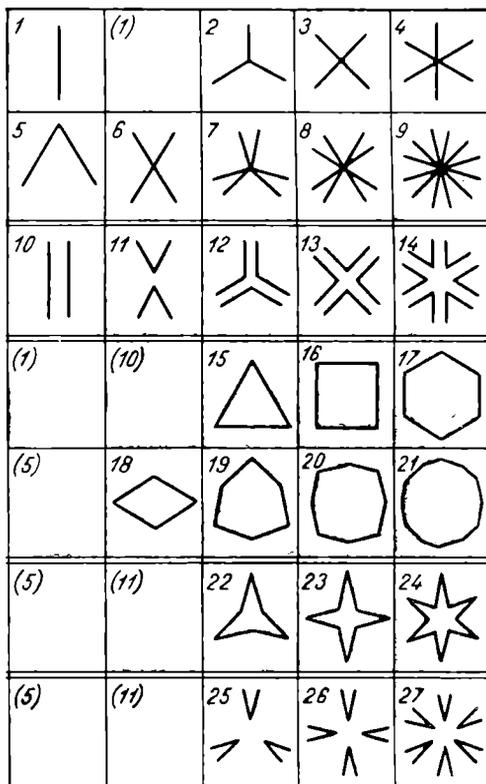


Рис. 55. Двадцать семь плоских простых реберных форм.

неувязки, существующие между теоретическими расчетами и реальным развитием гранных форм.

Затронув вопрос о внутреннем сложении реального кристалла, мы неминуемо должны вспомнить о формировавшей его среде.

Переходя к внешнему ограничению природных кристаллов, отметим двойственность природы кристаллической формы, обусловленную воздействием и внутренней структуры и внешней минералообразующей среды. При этом структура и среда неразрывно связаны между собой (первая как бы «вставлена» во вторую).

Выше уже отмечалось, что при различных физико-химических условиях одна и та же кристаллическая структура (в пределах одной полиморфной модификации) ведет себя неодинаково, порождая различные формы внешнего ограничения (таковы, например, октаэдры и округлые ромбододекаэдровиды алмаза, кубы и пентагон-додэкаэдровиды пирита, ромбододекаэдровиды и тетрагон-три октаэдровиды граната и пр.).

Неоднократно отмечалась тенденция кристаллов покрываться гранями с все меньшими плотностями элементарных слоев по мере падения концентрации раствора (А. В. Шубников, Н. З. Евзикова, И. Н. Костов). По-видимому, здесь играет роль симметрия раствора, становящаяся все более преобладающей по мере падения концентрации. При этом кристалл покрывается множеством добавочных граней, стремясь по мере возможности приблизиться к шаровой поверхности (напомним, что формы растворения в силу резко доминирующей симметрии раствора становятся округлыми).

Далее мы ограничимся рассмотрением среды с чисто геометрической точки зрения, трактуя ее с позиций учения о симметрии. Под симметрией кристаллообразующей среды мы будем подразумевать симметрию подтоков питающего вещества к формируемому кристаллу. В результате взаимодействия между симметрией среды и симметрией образующихся в ней кристаллических тел возникают характерные искаженные формы кристаллов, обычно характеризующиеся пониженной псевдосимметрией.

По принципу П. Кюри, внешняя форма кристалла должна сохранять только те элементы своей симметрии, которые совпадают с элементами симметрии среды. В зависимости от ориентировки кристалла относительно последних симметрия искаженного ограничения изменится [139, 148].

Идеально развитые кристаллические многогранники, подобные идеализированным кристаллографическим моделям, на которых грани, принадлежащие одной и той же простой форме, равны, образуются лишь при условии всестороннего и равномерного подтока питания к кристаллическому телу. При таких условиях симметрия кристаллообразующей среды соответствует симметрии шара ( $\infty L_{\infty} \infty PC - \infty / \infty m$ ), а все элементы истинной симметрии кристалла сохраняются. Чаще же всего на кристаллах появляются различные ложные простые формы, обусловленные неодинаковым развитием граней одной и той же истинной простой формы (например,

вместо истинного куба могут развиваться псевдотетрагональная «призма» и «пинакоид» или три «пинакоида»). Соответственно понимается и их внешняя (видимая) симметрия (рис. 56).

В настоящее время осуществлен полный вывод всех простых ложных форм такого рода для 47 простых истинных форм [152]. Такой вывод легко осуществляется с помощью схемы соподчинения 32 видов симметрии (рис. 57). Перебирая по мере опускания вниз простые формы, соответствующие пониженным видам симметрии, мы тем самым находим и ложные простые формы, получающиеся из выпележащих форм. Совершенно ясно, что ложные формы дают понятие о симметрии питавшей их среды, являясь в какой-то мере индикаторами последней. В этом их генетическое значение. Однако пользоваться ими следует с большой осторожностью.

Из множества искаженных по форме кристаллов, находившихся в определенном участке месторождения, следует принимать во внимание лишь те, которые обладают наиболее высокой ложной симметрией. Только они могут дать более или менее правильное понятие о симметрии среды, питавшей кристаллы, так как в них сравнительно большое число элементов симметрии совпадает с элементами симметрии среды. Так, например, среду с симметрией  $L_{\infty} \infty P - \infty m$  можно определить по искаженным кубическим, тетрагональным и гексагональным кристаллам, ложные простые формы которых характеризуются преимущественно пирамидальным развитием граней и внешней симметрией  $L_n n P - n m$ . Такое развитие требует, чтобы ось  $L_n$  кристалла совпадала более или менее точно с  $L_{\infty}$  среды. Ясно, что в природных условиях подобное совпадение осуществляется не столь уж часто. И все же хотя бы приближенное установление ложной симметрии и ложных простых форм может привести к ценным генетическим обобщениям и практически важным выводам.

Для того чтобы иллюстрировать сказанное, напомним о замечательном открытии Г. Г. Леммлейна [67]. Кристаллы кварца, в которых ось  $L_3$  во время роста была направлена вертикально, имеют внешне пирамидальную симметрию  $L_3 3P - 3m$  или  $L_6 6P - 6m$ . В отличие от них наклонно росшие кристаллы нередко обнаруживают внешнюю симметрию, близкую к  $P - m$  (рис. 58).

Наблюдение Г. Г. Леммлейна было использовано Д. П. Григорьевым и для определения минералогических уровней и отвесов [25]. И действительно, открытие, сделанное при изучении кристаллов кварца, может быть перенесено на все кристаллы, развивающиеся в гравитационном поле. При вертикальном направлении  $L_n$  они

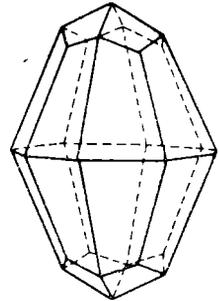


Рис. 56. Искаженная форма тетрагон-триоктаэдра граната в виде комбинации двух ложных простых форм: «тетрагональной дипирамиды» и «дигетрагональной дипирамиды» с внешней (видимой) симметрией  $L_4 4L_2 4P 3C$  ( $4/mmm$ ).

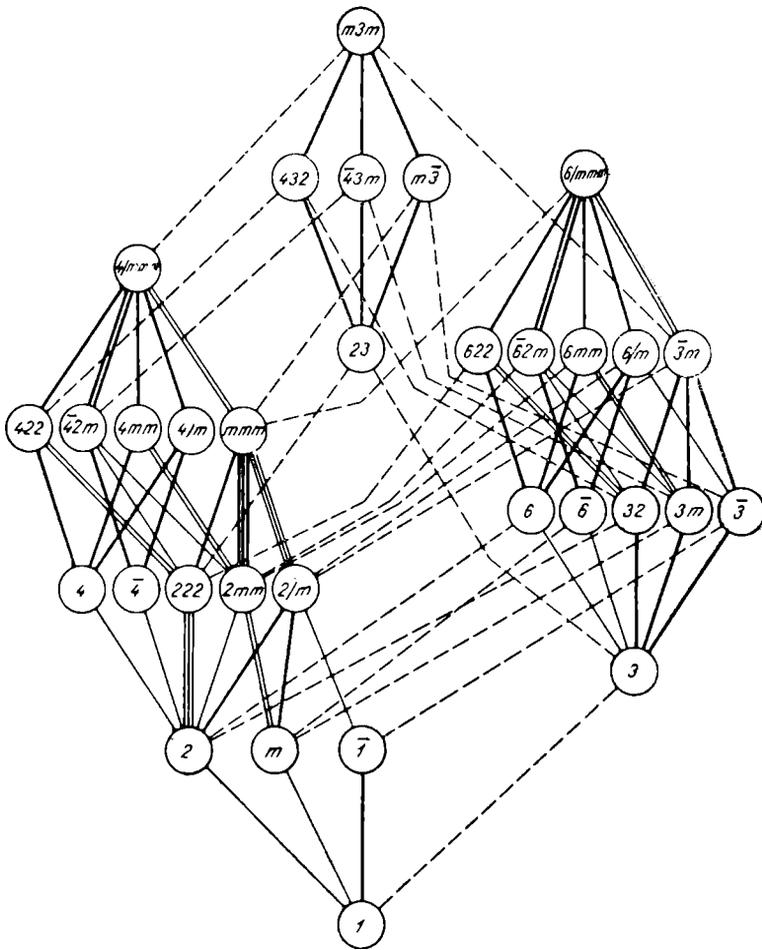


Рис. 57. Схема соподчинения 32 видов симметрии.

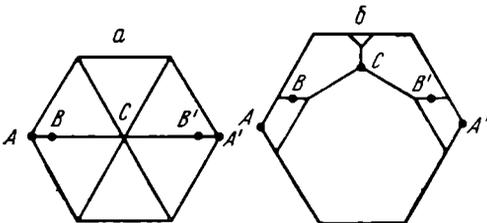


Рис. 58. Головки кристаллов кварца, выросшие с вертикально (а) и наклонно (б) ориентированной главной осью  $L_3$  относительно горизонтальной плоскости.

обычно приобретают видимую симметрию  $L_n n P - nm$ , а при косом положении той же оси их внешняя симметрия стремится к  $P - m$ . (Напомним, что подобная же закономерность имеет место и для растений и животных. Она связана с симметрией поля земного тяготения. См. с. 20—22).

Соответственно с появлением двух типов внешней симметрии  $L_n n P$  и  $P$  искажаются и формы реальных кристаллов кварца: для первого случая характерно появление ложных форм пирамидального типа («гексагональных» и «тригональных» «пирамид» и др.), для второго — «моноклинно-диэдрических» форм («диэдров», «пиракоидов», «моноэдров») (рис. 58). Эти ложные формы позволяют визуально легко классифицировать большинство кварцевых моногранников, относя их к тому или иному типу.

Именно такой подход позволил А. А. Кораго успешно использовать формы кристаллов кварца для решения практически важной задачи [60]. Согласно его данным, кристаллы ложномоноклинного или триклинного вида (тип  $P$ ) наблюдаются преимущественно в крутопадающих хрусталеносных гнездах, тогда как кристаллы с пирамидальным обликом (тип  $L_3 3P$  или  $L_6 6P$ ) приурочены в основном к пологопадающим гнездам. Эти данные позволяют практически пользоваться кристалломорфологией кварца из развалов для предварительного определения залегания хрусталеносных гнезд.

Приближение кристаллических фигур к той или иной ложной симметрии зачастую достигает такой степени, что исследователи без всякого труда определяют именно эту видимую глазом симметрию с соответствующими ей ложными простыми формами. И все же искаженные кристаллические многогранники в подавляющем большинстве случаев лишь более или менее приближаются к той или иной видимой (ложной) симметрии. Учитывая со всей строгостью их внешнее огранение, мы должны были бы отнести их, как правило, к асимметричным или ложнотриклинным образованиям.

Естественно возникает вопрос: с какой степенью точности имеем мы право характеризовать такие асимметричные фигуры, лишь более или менее приближающиеся к той или иной более высокой видимой симметрии. До сих пор такие определения производились лишь визуально. Настало время внести в них необходимые уточнения.

Методика установления простых ложных форм основывается на измерении гранных площадей [156]. При достаточной близости размеров последних соответствующие грани, связанные элементами внешней (ложной) симметрии, следует отнести к одной и той же простой ложной форме. При изучении искаженных кристаллических форм представляет также существенный интерес решение задачи об ориентировке данного кристаллического тела относительно элементов симметрии кристаллообразующей среды.

В качестве примера рассмотрим кристаллы кварца, формирующиеся в среде с симметрией конуса  $L_\infty \infty P - \infty m$ , где и ось  $L_\infty$  и бесчисленное множество пересекающихся вдоль нее плоскостей ориентированы вертикально. При совпадении главной оси кварца  $L_3$

с осью  $L_\infty$  среды кристалл получает внешнюю пирамидальную симметрию  $L_3 3P - 3m$  или  $L_6 6P - 6mm$ . При отклонении  $L_3$  от  $L_\infty$  он становится внешне псевдомоноклинным с симметрией  $P - m$  при условии, что его видимая плоскость симметрии совпадает с одной из бесчисленных вертикальных плоскостей симметрии среды. Отклонение от симметрии  $L_n nP$  и «моноклинность» кристалла выражены тем резче, чем больше угол между осью  $L_3$  кристалла и осью  $L_\infty$  среды. При косом положении видимой плоскости симметрии  $P$  кварца относительно ближайшей вертикальной плоскости симметрии  $P'$  среды угол между двумя этими плоскостями можно уподобить углу, характеризующему отклонение триклинного кристалла от моноклинного.

Вспоминая теодолитный федоровский метод, мы с соответствующими оговорками сравним первый угол ( $L_\infty : L_3$ ) с полярным расстоянием  $\rho$ , а второй угол ( $P : P'$ ) с долготой  $\varphi$ , т. е. со сферическими координатами, измеряемыми на двухкружном гониометре. Весь процесс установления этих углов относительно вертикальной оси  $L_\infty$  и вертикальной плоскости  $P'$ , характеризующих природную симметрию кристаллообразующей среды, напоминает приемы измерения сферических координат для граней кристалла, установленного на двухкружном гониометре, и последующего графического их изображения.

При установлении природной ориентировки кристаллов и их положения относительно направления течения питающих потоков следует привлекать на помощь характерные детали гранных скульптур, «присыпки» и другие детали, объединяемые Д. П. Григорьевым под названием минералогических уровней и отвесов [25].

Коснемся вкратце и тех более широких обобщений, которые можно извлечь из тщательного изучения искаженных кристаллических форм.

Подходя с позиций учения о симметрии к кристаллическим структурам, кристаллообразующим средам и формам кристаллов, можно сформулировать следующий вывод: габитусные истинные формы кристаллов порождаются в первую очередь структурой; второстепенные истинные формы являются как бы компромиссными между формами, определяемыми симметрией структуры и среды; искаженные (ложные) формы обусловлены в основном влиянием среды. Отсюда можно прийти к обобщенной, хотя и весьма приближенной схеме, дающей понятие о зависимости кристаллических форм от внутреннего строения (структуры) и внешнего окружения питающей среды. Эта схема, учитывающая лишь геометрию (симметрию), а не физико-химические свойства тех и других, приведена в табл. 9. Буквы  $O$  и  $P$  обозначают соответственно «одинаковость» и «различие» форм. Понятие «одинаковые искаженные формы» охватывает все формы, подчиненные одной и той же высшей симметрии — симметрии среды.

До сих пор шла речь о симметрии и ограничении отдельных минеральных индивидов в виде идеально образованных или искаженных

## СХЕМА СООТНОШЕНИЯ ФОРМЫ КРИСТАЛЛА, СИММЕТРИИ ЕГО СТРУКТУРЫ И СИММЕТРИИ СРЕДЫ

Симметрия		Форма			
структуры	среды	истинная		искаженная	
		главная	второстепенная	главная	второстепенная
<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>
<i>O</i>	<i>P</i>	<i>O</i>	<i>O + P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
<i>P</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>O</i>	<i>O + P</i>
<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>

кристаллических полиэдров. Далее здесь уместно напомнить о закономерных кристаллических сростках и в первую очередь о двойниках. В настоящее время осуществлен полный математически строгий вывод всех возможных двойниковых законов [80]. При этом широко использованы понятия двуцветной симметрии. Первый из

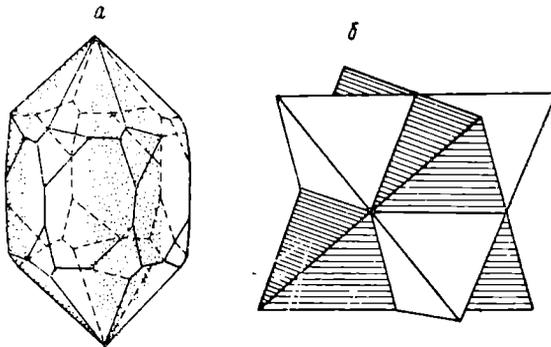


Рис. 59. Дофинейский двойник кварца (а) и двойник тетраэдрита (б).

сросшихся индивидов условно окрашивается в один (белый) цвет, а второй — в другой (черный). Элементы симметрии, связывающие между собой различно окрашенные соответствующие части двойникового сростка, являются элементами двуцветной симметрии (формально они совпадают с элементами антисимметрии А. В. Шубникова). Их обозначения в отличие от обозначений элементов классической симметрии снабжены штрихами. Так, например, кристаллы кварца (симметрия  $L_3 3L_2 - 32$ ) часто образуют в природе дофинейские (суммарная симметрия —  $L'_6 (L_3) 3L_2 3L'_2 - 6'22'$ ; рис. 59, а) и бразильские ( $L_3 3L_2 3P'C' - 3'm'$ ) двойники. Для двойников прорастания характерна повышенная суммарная симметрия по сравнению с симметрией отдельных сросшихся индивидов (за редкими

исключениями повышенная симметрия таких двойников не выходит из рамок кристаллографических видов симметрии).

Приближенное понятие о ходе вывода суммарной симметрии подобных образований читатель сможет получить при помощи схемы на рис. 57, следуя от исходного вида симметрии кристаллического индивида вверх к более высоким видам симметрии, подгруппой которых является исходный вид.

Помимо суммарной симметрии двойников следует учитывать и их обобщенные «черно-белые» простые формы [154]. Так, например, на правильно развитом дофинеином двойнике присутствуют: черно-белая гексагональная призма, черно-белая «гексагональная дипирамида» и «гексагональный трапецоэдр», состоящий из шести белых и шести черных граней (рис. 59, а).

Для описания двойниковых образований с характерными входящими углами (рис. 59, б) приходится обращаться к разновидности гранных форм с входящими углами [148].

Отметим далее обобщенную симметрию кристаллических сростков, обусловленную не столько внутренней симметрией кристаллической структуры, сколько многократной повторяемостью деталей роста. Классические примеры именно такой симметрии представляют изображаемые во всех учебниках кристаллографии «четки» из параллельно сросшихся кристаллов, а также полисинтетические двойники плагноклазов, кальцита и др. Из них, как из отрезков, можно построить теоретически бесконечную цепочку, мысленно добавляя к ней все новые и новые индивиды. Симметрия подобных образований лучше всего характеризуется симметрией бесконечных стержней [153].

Обобщенная симметрия кристаллических совокупностей, развивавшихся в результате геометрического отбора, когда кристаллы, имеющие наиболее выгодную ориентировку, быстрее всего разрастаются и заглушают рост остальных, была разобрана в предыдущей главе (пример симметрии пласта новосадки галита; см. с. 101). Сюда относится статистическая симметрия таких приближенно закономерных кристаллических сростков, как друзы или «минералогические щетки».

Для полноты обзора остановимся вкратце и на минеральных индивидах в виде неправильно оконтурированных кристаллических зерен. Несмотря на колоссальное и повсеместное распространение кристаллических агрегатов, литература о морфологии составляющих их индивидов весьма ограничена.

Особенное внимание следует обратить на то, что поверхности зерен определяются не свободным ростом кристаллов, а взаимным соприкосновением кристаллических индивидов. Получающиеся при этом поверхности соприкосновения носят в большинстве не случайный характер. Среди поверхностей соприкосновения, образованных соседними кристаллическими индивидами, следует различать: а) псевдограницы (термин А. Е. Ферсмана), б) псевдоразроста, в) индукционные границы, г) индукционные ребра (рис. 60).

**Псевдогрань** — поверхность соприкосновения, обусловленная соотношением скоростей роста кристаллов. Эта поверхность образуется в результате передвижения ребра, получающегося при пересечении граней одного и другого кристалла. Псевдогрань может быть плоской, искривленной, ступенчатой.

**Псевдоребро** — граница между псевдогранями.

**Индукционные грани** — отдельные плоские поверхностные участки, обычно покрывающие общую поверхность псевдограни. Эти мелкие участки образуются в связи с тем, что общее направление псевдограней, обусловливаемое соотношением скоростей роста, не соответствует минимальной поверхностной энергии. Поэтому поверхность псевдограней оказывается фактически не гладкой, а покрытой мелкими индукционными гранями. Обычно в случае двух одновременно растущих кристаллов псевдограни оказываются покрытыми штриховкой, отвечающей пересечениям индукционных граней, развитых в виде узких полосок. Среди таких граней следует различать, с одной стороны, индуктирующие грани, присущие данному кристаллу и влияющие на общую поверхность, а с другой — индуктируемые грани, являющиеся как бы отпечатками соседнего кристалла.

**Индукционное ребро** — граница между двумя индукционными гранями, принадлежащими одной и той же псевдограню [144, с. 309—323; 151].

Итак, прежде чем говорить о морфологии зерен вообще, необходимо предварительно ознакомиться с закономерностями поверхностей соприкосновения кристаллов, которые и должны быть положены в основу будущей кристалломорфологической систематики минеральных зерен. Пока такая систематика еще не разработана. Единственное, что обычно учитывается в отношении кристалломорфологии зерен — это их облик. Н. К. Разумовский [103] рекомендовал различать четыре облика кристаллических зерен:

- 1) **изометрический** — развитие по трем координатным осям примерно одинаковое;
- 2) **столбчатый** — развитие по одному направлению явно преобладает, а по двум остальным примерно одинаковое;
- 3) **пластинчатый** — развитие по одному направлению замедленное;
- 4) **досковидный** — развитие по всем трем направлениям разное.

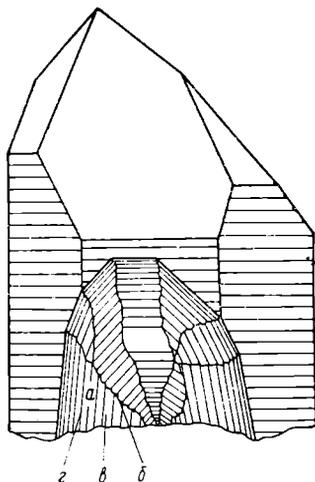


Рис. 60. Кристалл кварца с поверхностями соприкосновения с соседним индивидуом.

*a* — одна из псевдограней; *b* — одно из псевдоребер; *z* — одна из индукционных граней. *z* — индукционные ребра.

Интересные обобщающие закономерности, касающиеся равновесных структурных форм в мономинеральных зернистых агрегатах, сформулированы А. Г. Жабиным и А. Г. Харченковым [49]. Приведем их заключение: «Итак, по геометрическим параметрам, пропорциональным поверхностной энергии, наиболее экономичен кубооктаэдр (14 граней и три типа углов: куб — куб = 90°, куб — октаэдр = 125° 16'; октаэдр — октаэдр = 109° 29'). По величине же углов наиболее подходит ромбододекаэдр (12 граней и угол 120° между гранями). По-видимому, в агрегатах реализуется некоторый «гибрид» из этих двух фигур: деформированный 14-гранник, в котором углы усреднены и максимально приближены к 120°» [49, с. 68].

Как видим, обобщающая закономерная форма зерна установлена с известной долей вероятности пока только для мономинеральных агрегатов. Предстоит еще большая и упорная работа для вывода соответствующих закономерностей в отношении полиминеральных зернистых пород.

На этом мы заканчиваем обзор, касающийся симметрии и соответствующих форм минеральных индивидов.

В заключение попытаемся наметить, хотя бы и весьма приближенно в самых общих чертах, некоторый параллелизм, улавливающийся в симметричной динамике мира минералов и развивающихся форм органического мира.

Как указывалось выше, кристаллы высшей категории характеризуются единым шаром, кристаллы средней — двумя эллипсоидами вращения, а кристаллы низшей — четырьмя трехосными эллипсоидами. Возможно, что с этим связана и отмеченная выше статистическая пропорция 1 : 2 : 4.

Обратимся далее к совсем иному ряду, связанному с принципом П. Кюри и изображающему в обобщающей схеме симметричную эволюцию внешних форм органического мира:  $\infty L_{\infty} \infty PC \rightarrow \rightarrow L_{\infty} \infty P \rightarrow P$  [116, 149].

С точки зрения симметрии мы можем три приведенные формулы в сугубо обобщенном виде подвести под три категории: «высшую» (симметрия шара; планктонные простейшие формы), «среднюю» (симметрия конуса; формы, прикрепленные к земле, главным образом растения и водный бентос) и «низшую» (симметрия плоскостного диэдра; формы,двигающиеся прямолинейно — почти весь животный мир).

Биологическая концепция трактует эволюцию мира как развитие систем «от простого к сложному». Вместе с тем параллельно с усложнением живых форм идет снижение внешней симметрии. Дублируя формулировку закона Федорова — Грота, можно было бы сказать: чем сложнее живая форма, тем ниже ее внешняя симметрия. Судя по имеющимся данным, так же как и в мире минералов, наряду с понижением симметрии идет возрастание соответствующих видов. Так, например, число видов растений (500—800 тысяч) приблизительно в два раза меньше числа видов животных (около 1300—1400 тысяч; учтены и современные и известные вымершие виды).

Не играет ли здесь, так же как и в мире минералов, ведущую роль все та же пропорция 1 : 2 : 4?

По аналогии с кристаллографией (аналогии чисто внешнегеометрической) опять можно прибегнуть к федоровскому «эллипсоиду сингонии». Для «высшей категории» это снова будет шар; для «средней» (конус подобен  $n$ -гональной пирамиде средних сингоний) получим два эллипсоида вращения (+ и —); для «низшей» (диздр — характерная форма низших сингоний) — четыре трехосных эллипсоида. При этом следует учесть, что направление растяжений (+ и —) при трансформации шара в эллипсоид вращения совпадает с направлением роста по вертикали живой формы (растения), а направление дальнейшего растяжения при переходе эллипсоида вращения в трехосный эллипсоид соответствует горизонтальному направлению движения животного.

Можно получить и иным путем все ту же пропорцию. Симметрия  $\infty L_{\infty} \infty PC$  связана с шаровой симметрией порождающей среды. Симметрия  $L_{\infty} \infty P$  является симметрией полусферы: для тела, развивающегося в прикрепленном виде на земле, вторая половина сферы как бы срезана. Симметрия  $P$  может рассматриваться как симметрия четверти все той же исходной сферы (один срез такой шаровой четверти совпадает с поверхностью Земли, другой ей перпендикулярен. Здесь, вероятно, надо учесть то обстоятельство, что упомянутая  $1/4$  шара не является идеальной, а представляет как бы ее «криволинейную аналогию» [81, 82]. В результате имеем: целый шар (1), половину шара ( $1/2$ ) и четверть его ( $1/4$ ). Если числа соответствующих видов обратны величинам симметрии, то мы снова приходим к все той же пропорции 1 : 2 : 4.

Все вышеизложенное следует, конечно, рассматривать лишь как сугубо приближенную попытку наметить некоторый внешнегеометрический параллелизм между обобщенной, статистической симметрией неорганических природных тел (окристаллизованных минералов), с одной стороны, и обобщенной статистической симметрией развивающихся форм живого мира, с другой.

Думается, что упоминание об этом параллелизме представляет интерес для геологов и намечает некоторые обобщающие закономерности, связывающие кристаллографию с палеонтологией и исторической геологией.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Симметрия, проявляясь в самых различных объектах материального мира, несомненно, отражает наиболее общие, наиболее фундаментальные его свойства. Поэтому исследование симметрии разнообразных природных объектов и сопоставление его результатов является удобным и надежным инструментом познания основных закономерностей существования материи.

В гл. 3 было показано, что исследование симметрии Земли как планеты в целом позволяет систематически и с соответствующей детальностью проанализировать динамику формирования фигуры Земли, т. е. рассмотреть качественную и количественную роль различных силовых полей, воздействие которых определяет эту фигуру. К сожалению, этот вопрос мы смогли представить лишь в самом обобщенном виде.

В гл. 4 демонстрируется широкое распространение проявлений симметрии в строении геологических тел самых различных размеров и происхождения, входящих в состав земной коры. Среди этих проявлений симметрии значительную часть составляют разнообразные симметричные структуры, образование которых связано с разрядкой механических напряжений, возникающих в геологических телах по разным причинам (тектонические движения, сокращение объема при охлаждении или дегидратации и т. д.). Обращение к симметрии этих структур, к закономерной повторяемости их элементов (структурных форм) позволяет подойти к рассмотрению механизмов образования таких структур с принципиально новых позиций. При этом в основу исследования ставятся не индивидуальные особенности морфологических разновидностей структурных форм, а общие закономерности их пространственного распределения, распространяющиеся на все разновидности. Такой подход, разумеется, не исключает анализа индивидуальных особенностей механизмов образования морфологических разновидностей структурных форм, а, напротив, облегчает такой анализ, делает его более продуктивным, поскольку он выполняется с учетом закономерностей, общих для всех разновидностей.

В гл. 5 дана попытка использования симметричных понятий при анализе структур и текстур горных пород. Здесь играют преимущественную роль законы симметрии непрерывных и частично пре-

рванных однородных трехмерных пространств. В настоящее время такой подход к горным породам только начинает оформляться.

Гл. 6 напоминает читателю сущность классической кристаллографической симметрии на примерах природных кристаллов. В основном здесь повторяется вкратце все то, что проходится в курсах общей кристаллографии: 7 сингоний, 32 вида симметрии, 47 простых форм, 14 решеток Браве, понятие о 230 федоровских пространственных группах. Однако рассмотрение вопроса о взаимосвязи кристаллических форм и минералообразующей среды заставляет нас выйти за рамки собственно кристаллографической симметрии и прибегнуть к предельным видам симметрии с осями бесконечного порядка. При описании двойниковых образований уместно использовать понятия о двуцветной и многоцветной симметрии.

Рассмотрение искаженных кристаллических фигур приводит к симметрии подобия и элементам криволинейной симметрии.

Резюмируя все вышесказанное, следует особо подчеркнуть всеобъемлющее значение строго математических законов симметрии, пронизывающих все естествознание, а тем самым охватывающих и все без исключения объекты геолого-минералогических наук. Исключительную роль в этом отношении играет вытекающий из принципа П. Кюри закон формирования природных тел в поле земного тяготения [Все что растет или движется по вертикали приобретает симметрию  $L_n n P - nm$  (или симметрию соответствующих подгрупп  $L_n - n, P - m, -1$ ); все, что растет или движется по горизонтали, получает симметрию  $P - m$  (или  $-1$ )]. Невольно напрашивается идея о широком использовании этого закона для выявления процессов формирования геологических объектов.

При рассмотрении разнородных геологических образований нам пришлось помимо классической использовать новые понятия расширенной симметрии, а именно: криволинейной симметрии, гомологии, симметрии подобия, многоцветной симметрии, учения об антисимметрии и динамической симметрии. Все эти понятия образуют единый методологический комплекс. Учение о симметрии в геологии, формирующееся на границе геометрической кристаллографии и наук геологического цикла, является сейчас новым научным направлением, требующим всемерного углубления и дальнейшего развития. Объектом этой новой дисциплины являются геометрические закономерности как всей планеты в целом, так и отдельных ее составляющих на различных уровнях организации вещества.

Кроме отмеченного выше существенного теоретического значения широкое распространение проявлений симметрии в геологических структурах имеет важное практическое значение. Понимание законов симметрии, проявляющихся в той или иной конкретной геологической структуре, может оказать весьма существенную помощь в деятельности геологов по поискам месторождений полезных ископаемых и отдельных рудных тел в пределах известных рудных полей.

Рис. 61 иллюстрирует несколько простейших примеров симметричного распределения рудных тел (в данном случае линзовидных

жил). Симметрия узоров на рис. 61, *a* и *б* соответствует уже известной нам симметрии бордюра  $T2mm$  (с. 12); симметрия систем на рис. 61, *в* и *г* характеризуется соответствующей симметрией

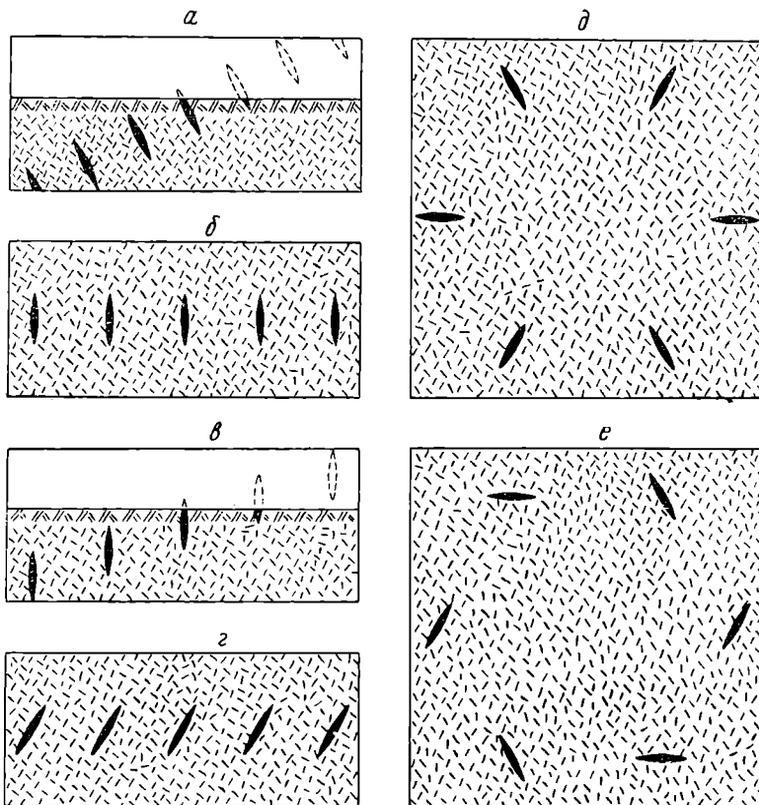


Рис. 61. Простейшие примеры симметричного распределения рудных тел в рудном поле.

*a, б, д* — продольные плоскости симметрии транслируемых рудных тел нормальны к осям трансляций; *в, г, e* — то же, наклонны; *a, в* — направления осей трансляций наклонны по отношению к дневной поверхности; *б, г, д, e* — оси трансляций совпадают с дневной поверхностью (изображений — в плане); *д* — симметрия  $L_66P$  ( $6mm$ ); *e* — симметрия  $L_6$  ( $6$ ). Круговое расположение рудных тел можно также рассматривать как результат проявления дуговых (круговых) трансляций.

бордюра  $T2$ ; плоскостная симметрия распределения линзовидных тел на рис. 61, *д* —  $L_66P$  ( $6mm$ ), а на рис. 61, *e* —  $L_6$  ( $6$ ).

Реальные примеры проявления в геологических структурах (в том числе и в структурах рудных полей) симметрии таких типов достаточно многочисленны и многократно описаны в геологической литературе [61]. Вместе с тем на этих примерах можно видеть, что при достаточно простом характере симметрии и при достаточной ее строгости она далеко не во всех случаях может быть выявлена без

специальных целенаправленных исследований. На этих же примерах можно видеть, что при целенаправленном исследовании для выявления симметрии размещения рудных тел и использования знаний этой симметрии для обнаружения неизвестных рудных тел достаточно весьма несложных геометрических построений.

Так, в случаях, изображенных на рис. 61, *а* и *в*, на дневную поверхность выходят только по два рудных тела из соответствующих симметричных серий рудных тел. При изучении поверхности симметрия размещения рудных тел не привлекает к себе внимания, поскольку мы в каждом из этих случаев наблюдаем лишь по одному расстоянию между телами и не можем видеть закономерной повторяемости этих расстояний. Если же мы учитываем возможность симметричного распределения рудных тел, то можем задаться целью определить направление их трансляции. Поскольку положение центров частично эродированных рудных тел установить практически невозможно, невозможно и установить положение оси трансляции (под осью трансляции мы здесь подразумеваем прямую, соединяющую центры линзовидных тел).

Однако практически достаточно знать глубины выклинивания известных рудных тел, чтобы определить места возможного нахождения «слепых» рудных тел, принадлежащих этим симметричным сериям. Очевидно, что поиск рудных тел таким методом будет в этих случаях во много раз эффективнее, чем поиск путем разбуривания рудного поля по сетке, не увязанной с симметрией его структуры.

Рис. 61, *б*, *г*, *д* и *е* иллюстрирует сравнительно редкие случаи совпадения осей трансляций рудных тел (*б* и *г* — прямых, *д* и *е* — дуговых) с дневной поверхностью. При наличии более или менее мощного слоя наносов даже в самом простом из этих случаев (рис. 61, *б*), обнаружив два смежных рудных тела, мы можем не найти остальных, если не учтем возможности симметричного их распределения. Учтя такую возможность, мы сможем в этом случае выявить все рудные тела с минимальной затратой сил и средств.

Случай, иллюстрируемый рис. 61, *г*, осложнен в сравнении с предыдущим (для традиционных методов поисков) тем, что поисковые выработки и линии принято ориентировать вкrest простирания рудных тел, тогда как ось трансляции, определяющая оптимальное направление поисковой линии, не совпадает с этим направлением. Поэтому выработки, пройденные вкrest простирания известного рудного тела, могут не вскрыть других тел, пройдя в непосредственной близости от них.

В примерах, показанных на рис. 61, *д* и *е*, плоскостная симметрия узора соответствует  $L_6BP - 6mm$  (рис. 61, *д*) и  $L_6 - 6$  (рис. 61, *е*). Как отмечалось выше, эти узоры можно рассматривать и как результат дугового искривления трансляции, трансформированной в круг. В этих случаях симметрия размещения рудных тел может привлечь к себе внимание только после обнаружения большей части (если не всех) рудных тел данного рудного поля. Между тем руководствуясь представлением о возможности симметричного распределения

рудных тел, зная пространственное положение двух соседних тел, мы сможем определить положение остальных. Для этого достаточно, соединив прямолинейными отрезками центры или точки выклинивания известных тел, определить длину хорды между этими телами и угол поворота вокруг объединяющей их оси симметрии.

Как уже отмечено выше, случаи совпадения осей трансляций с дневной поверхностью довольно редки. То же самое следует сказать и о случаях совпадения осей трансляции с определенным горизонтом подземных выработок.

Случаи отклонения прямолинейных осей трансляции от поверхности (плоскости) изучаемого среза уже рассмотрены на примере рис. 61, *a* и *в*. При отклонении дуговых (круговых) трансляций и, следовательно, плоскостей, в которых они лежат, от плоскостей изучаемых срезов выявление симметрии размещения рудных тел без целенаправленных исследований затруднительно. Еще менее вероятно случайное выявление симметрии при трансляции рудных тел по винтовой линии (даже, если винтовая ось нормальна к доступной для наблюдения поверхности). При целенаправленном исследовании, зная положение двух смежных рудных тел, выявить симметрию их распределения и, следовательно, положение нескрытых рудных тел в этих случаях не сложнее, чем во всех предыдущих.

При расположении рудных тел в узлах плоских сеток для выявления всех рудных тел достаточно знать положение трех близлежащих (не на одной прямой) рудных тел. Для выявления рудных тел, контролируемых узлами пространственных решеток, достаточно знать положение четырех близлежащих (не в одной плоскости) тел.

Разумеется, используя представление о симметрии размещения рудных тел и месторождений, при поисках необходимо учитывать существование различных факторов, ограничивающих или затрудняющих применение этих представлений. Прежде всего необходимо помнить, что в частных случаях число рудных тел в симметричной серии может быть любым. Поэтому наличие одного или нескольких рудных тел не гарантирует наличия других рудных тел, связанных с известными телами законами симметрии.

Далее, следует иметь в виду, что достаточно строгие проявления симметрии в размещении структурных форм и рудных тел возможны лишь в достаточно однородной (в том масштабе, в котором ведется исследование) среде. Различного рода неоднородности среды, в которой размещены рудные тела, могут обуславливать в различной степени существенные отклонения от строгой симметрии.

Здесь нет надобности останавливаться на практическом использовании симметрии и связанной с ней морфологии петрологических и минералогических объектов. Они хорошо известны широкому кругу геологов и отчасти упомянуты в гл. 5 и 6.

Заканчивая эту книгу, мы надеемся, что она сможет принести пользу в деле внедрения понятий о симметрии в теорию геологических дисциплин и в ее всемерном использовании на практике.

**СПИСОК  
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авзянов В. С., Хайретдинов И. А., Фаттахутдинов С. Г. Уровни организации и их симметрия. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1971, с. 31—38.
2. Авзянов В. С., Хайретдинов И. А., Фаттахутдинов С. Г. О направлении поисков и исследования симметрии в геологических образованиях. Там же, с. 179—182.
3. Авзянов В. С., Хайретдинов И. А., Фаттахутдинов С. Г. Электростатические модели как основа для понимания причин возникновения многоуровневных организаций в геологии. Там же, с. 201—206.
4. Апродов В. А. Роль трещиноватости в поздние фазы формирования плутонов. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1943, № 6, с. 67—81.
5. Асланян А. Т. Исследования по теории тектонической деформации Земли. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1955. 290 с.
6. Бакуменко И. Т. О формах скелетного роста на примере кварца из пегматитов. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1962, ч. 91, вып. 6, с. 662—671.
7. Белов Н. В., Тархова Т. И. Группы цветной симметрии. — «Кристаллография», 1956, т. 1, № 1, с. 4—13.
8. Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1954. 505 с.
9. Белоусов В. В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. — «Труды Геофиз. ин-та АН СССР», 1952, № 17 (144). 145 с.
10. Бишоп Р. Колебания. М., «Наука», 1968. 143 с.
11. Валяшко М. Г. Структурные особенности отложения современного галита. — «Минер. сб. Львов. геол. о-ва», 1951, № 5, с. 65—74.
12. Васильев В. И. Симметрия планетарных форм и сил. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1971, с. 101—110.
13. Васильев В. И. Механизм формирования многогранных форм поверхностей планет. — В кн.: Внутренняя геодинамика. Вып. 1. Л., 1972, с. 29—31.
14. Варанд Э. Л. Металлогеническое районирование западной части Сибирской платформы. — В кн.: Геология и полезные ископаемые зап. ч. Сиб. платформы. Красноярск, 1970, с. 53—78.
15. Вернадский В. И. История минералов земной коры. Т. 2. История природных вод. Ч. 1, вып. 1, Л., Госхимтехиздат, 1933. 202 с.
16. Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., «Наука», 1965. 373 с.
17. Воларович М. П., Пархоменко Э. И. Пьезоэлектрический эффект горных пород. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1955, № 3, с. 215—222.
18. Вологдин А. Г., Елисеев Н. А. О сфероидальных образованиях из пермской толщи Тунгусского угленосного бассейна. — «Зап. Всесоюз. минер.-о-ва», 1948, т. 77, вып. 2, с. 159—163.
19. Вопросы математической геологии. Л., «Наука», 1968, 290 с.

20. Воронов П. С. Общие закономерности ротационных региональных диаклас. — «Учен. зап. Науч.-исслед. ин-та геол. Арктики», 1964, вып. 4, с. 5—16.
21. Воронов П. С. Очерки о закономерностях морфометрии глобального рельефа Земли. Л., «Наука», 1968. 124 с.
22. Ге Г. Г., Лебедев Ю. Н., Плотников Л. М. К методике исследований полей напряжений по данным массовых замеров ориентировки тектонических трещин. — В кн.: Давления и мех. напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л., 1969, с. 146—148.
23. Гордеев Д. И. История геологических наук. Т. 1. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967. 316 с.
24. Грегори Дж. Образование Земли. Спб., 1914. 132 с.
25. Григорьев Д. П. Минералогические уровни и отвесы. — «Природа», 1948, № 3, с. 47—49.
26. Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов, Изд-во Львов. ун-та, 1961. 284 с.
27. Григорьев Д. П. Расширение понятия о конституции минералов. — В кн.: Кристаллография и минералогия. Л., 1972, с. 28—38.
28. Гришкян Р. И. Новые данные о строении и развитии системы докембрийских разломов решетчатого типа на Алданском щите. — В кн.: Вопр. тектоники докембрия континентов. М., 1970, с. 120—131.
29. Гришкян Р. И., Леонов В. Л. О принципах структурной симметрии и их применении. — В кн.: Проблемы регион. геологии и петрографии Сибири и методы геохим. и геофиз. исследований. Новосибирск, 1970, с. 10—13.
30. Гурвич И. И. Сейсморазведка. М., «Недра», 1964. 440 с.
31. Гуревич Г. И. К вопросу о механизме разделения пластов горных пород на блоки. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1954, № 5, с. 411—414.
32. Гуревич Г. И. О так называемом «механическом анализе» в геологической литературе. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1954, № 3, с. 264—279.
33. Гуревич Г. И. О «механическом анализе вопросов тектоники» в его традиционном изложении. — «Труды Геофиз. ин-та АН СССР», 1955, № 31 (158), 156 с.
34. Гусев А. И. Тетрагональные грунты в арктической тундре. — «Изв. Гос. геогр. о-ва», 1938, № 3, с. 377—385.
35. Данилович В. Н. О волновой природе складчатости напластований. — «Докл. АН СССР», 1949, т. 66, № 3, с. 455—458.
36. Данилович В. Н. Основы теории деформации геологических тел. Иркутск, Иркутск. кн. изд-во, 1953. 103 с.
37. Дейвис Р. М. — Волны напряжений в твердых телах. М., ИЛ, 1961. 103 с.
38. Дмитриев Г. А. О симметрии кливажа в каменных углях Иты. — «Докл. АН СССР», 1956, т. 3, № 6, с. 1308—1310.
39. Дмитриев Г. А. Гравитация как основной фактор слоеобразования. — «Геология и геохимия», 1960, № 3, вып. 9, с. 279—290.
40. Дмитриев Г. А. Основное условие слоеобразования в свете учения о симметрии. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1960, т. 37, вып. 2, с. 188—193.
41. Дмитриев Г. А., Потапова М. С. Учение о симметрии как общий метод познания закономерностей развития Земли. — В кн.: Пути познания Земли. М., 1971, с. 153—171.
42. Докучаев В. В. К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. Спб., 1899. 28 с.
43. Драгунов В. И. Геология и изучение элементов, структуры и уровней организации вещества. — В кн.: Общие закономерности геол. явлений, вып. 1. Л., 1965, с. 55—67.
44. Драгунов В. И. Концепция уровней организации и симметрия системы понятий наук о Земле. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1971, с. 19—25.

45. Драгунов В. И., Казницын Ю. В. О топологических моделях геологических явлений и диссимметрии их описания. Там же, с. 175—178.
46. Драгунов В. И., Круть И. В. Геология и ее положение в естествознании. — В кн.: Проблемы развития сов. геологии. Л., 1971, с. 73—75.
47. Евзикова Н. З. Принципы структурно-геометрического анализа граней кристаллов. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1965, ч. 94, вып. 2, с. 129—142.
48. Елисеев Н. А. Структурная петрология. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1953, 309 с.
49. Жабин А. Г., Харченков А. Т. Равновесная структура мономинерального агрегата. — В кн.: Кристаллография и минералогия. Л., 1972, с. 51—71.
50. Жемчужников Ю. А. О структуре в углепетрографии. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1952, т. 26, вып. 2, с. 18—31.
51. Журков С. Н., Нараулаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел. — «Журн. техн. физики», 1953, т. 23, № 10, с. 1677—1689.
52. Иванкин П. Ф. Опыт применения количественного анализа при изучении трещиноватости и минерализации трещин в горных породах. — «Изв. АН КазССР. Сер. геол.», 1952, вып. 12, с. 27—34.
53. Ишлинский А. Ю. Механика в наши дни. Правда, 1964, 26 июня.
54. Карпинский А. П. О правильности в очертании, распределении и строении континентов. — «Горн. журн.», 1888, т. 1, № 2, с. 252—269.
55. Карпинский А. П. Собрание сочинений. Т. 2. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1939, 428 с.
56. Каттерфельд Г. Н. Основные закономерности планетарного рельефа. — «Учен. зап. Ленингр. пед. ин-та», 1958, с. 101—134.
57. Каттерфельд Г. Н. Лик Земли и его происхождение. М., Географгиз, 1962. 152 с.
58. Козырев Н. А. Вероятная асимметрия в фигурах планет. — «Докл. АН СССР», 1950, т. 70, № 3, с. 389—392.
59. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. М., ИЛ, 1955. 192 с.
60. Кораго А. А. Использование кристалломорфологии кварца из развалов для определения залегания хрустальных гнезд. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», ч. 97, вып. 5, с. 637—640.
61. Корытов Ф. Я. О равноудаленном расположении рудных тел и месторождений друг от друга. — В кн.: Давления и мех. напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л., 1969, с. 130—131.
62. Красильников В. А. Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М., Физматгиз, 1960. 560 с.
63. Крейтер В. М. Структуры рудных полей и месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1956. 272 с.
64. Круть И. В. Уровни организации и симметрия. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1971, с. 17—18.
65. Кюри М., Кюри Е. Пьер Кюри, Мария Кюри. М., «Молодая гвардия», 1959. 426 с.
66. Кюри П. Избранные труды. М. — Л., «Наука», 1966. 400 с.
67. Леммлейн Г. Г. Искажения облик кристалла кварца, обусловленные их положением во время роста. — «Докл. АН СССР», 1941, т. 39, № 6, с. 415—418.
68. Леммлейн Г. Г. Секториальное строение кристалла. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1948. 40 с.
69. Личков Б. Л. А. П. Карпинский и современность. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1946. 75 с.
70. Личков Б. Л. О чертах симметрии Земли, связанных с ее гравитационным полем, тектоникой и гидрогеологией. — В кн.: Земля во Вселенной. М., 1964, с. 156—171.
71. Личков Б. Л. К основам современной теории Земли. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1965. 120 с.

72. Лпчков Б. Л., Шафрановский И. И. Совпадение угловых величин в геологии, кристаллографии и гидродинамике. — Науч. докл. Высп. школы. Геол.-географ. науки, 1958, № 2, с. 3—9.
73. Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 5. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1954. 747 с.
74. Марин Ю. Б. Ассоциации акцессорных минералов и особенности их эволюции на разных уровнях гранитоидных серий. — Зап. Всесоюз. минер. о-ва, 1973, ч. 102, вып. 5, с. 572—590.
75. Мартынова Г. И. Природа и закономерности размещения планетарной трещиноватости земной коры. — В кн.: Геология СССР, Т. 5. М., 1968, с. 178—188.
76. Михеев В. И. Замечания к статье Д. В. Наливкина «Криволинейная симметрия». — В кн.: Кристаллография. М., 1951, с. 25—32.
77. Михеев В. И. Гомология кристаллов. Л., Гостоптехиздат, 1961. 208 с.
78. Михеев В. И., Шафрановский И. И. О совпадении георетических и генетических типов кристаллов цинковой обманки. — Зап. Всесоюз. минер. о-ва, 1948, ч. 77, вып. 4, с. 267—271.
79. Михеев В. И., Шафрановский И. И. Реберные формы кристаллов. — Минер. сб. Львов. геол. о-ва, 1955, № 9, с. 15—24.
80. Моклевский В. А., Шафрановский И. И., Вовк П. К., Афанасьев И. И. Геометрический вывод законов двойникования кристаллов. — Кристаллография, 1966, т. 11, вып. 4, с. 539—548.
81. Наливкин Д. В. Элементы симметрии органического мира. — Изв. Биол. науч.-исслед. ин-та при Пермском ун-те, 1925, т. 3, вып. 8, с. 291—297.
82. Наливкин Д. В. Криволинейная симметрия. — В кн.: Кристаллография. М., 1951, с. 15—23.
83. Новикова А. С. О трещиноватости пород восточной части Русской платформы. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1951, № 5, с. 68—85.
84. Обручев В. А. Новые течения в геотектонике. — Изв. Геолкома, 1926, т. 15, № 3, с. 117—140.
85. Обручев С. В. Шахматные (ортогональные) грунты в областях вечной мерзлоты. — Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1938, т. 70, вып. 6, с. 738—746.
86. Общие закономерности геологических явлений. Вып. 1. Л., 1965. 378 с. (Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-т).
87. Овчинников Н. Ф. Принципы сохранения. М., «Наука», 1966. 332 с.
88. Петров А. И. О тектонической трещиноватости архейских пород Кольского полуострова. — В кн.: Древние осад.-вулканоген. и метаморф. комплексы Кольского п-ова. М. — Л., 1966, с. 107—118.
89. Пирогов В. А. Тектоническое и геоморфологическое значение стоячих волн собственных колебаний Земли. — Изв. Забайк. фил. Геогр. о-ва СССР, 1970, т. 6, вып. 2, с. 3—17.
90. Плотников Л. М. Вторичные текстуры горных пород и их значение для теоретической и практической геологии. — В кн.: Методы петрограф. исслед. и геол. интерпретации их результатов. Л., 1966, с. 58—71.
91. Плотников Л. М. О тектонических текстурах горных пород. — Информ. сб. Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-та, 1961, № 50, с. 43—51.
92. Плотников Л. М., Петров А. И. Об основной закономерности распределения деформаций в геологических телах. — В кн.: Общие закономерности геол. явлений, вып. 1. Л., 1965, с. 273—281.
93. Плотников Л. М., Петров А. И. Об отражениях в геологических объектах волновой природы механических напряжений. — В кн.: Давления и мех. напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л., 1969, с. 46—50.
94. Плотников Л. М., Тазикин Н. Н. Роли тангенциальных сил в геотектогенезе. — В кн.: Стрoение и развитие земной коры. М., 1964, с. 184—193.

95. Плотников Л. М., Тазихин Н. Н. О геостатическом равновесии и основном законе геодинамики. — В кн.: Внутренняя геодинамика. Вып. 1. Л., 1972, с. 13—16.
96. Плотников Л. М., Шафрановский И. И. Симметрия в геологии. — В кн.: Проблемы минералогии и петрологии. Л., 1972, с. 236—244.
97. Плотников Л. М., Юревич Г. Г. О соотношении механизмов быстрых и медленных деформаций. — В кн.: Внутренняя геодинамика. Вып. 1. Л., 1972, с. 87—90.
98. Плотников Л. М., Петров А. И., Юревич Г. Г. Неравномерность распределения механических напряжений в геологических телах и ее последствия. — В кн.: Давления и мех. напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л., 1969, с. 5—8.
99. Поваренных А. С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев, «Наукова думка», 1966, 647 с.
100. Поваренных А. С. О закономерностях в распределении минеральных видов по сингониям, классам симметрии и пространственным группам. — «Минер. сб. Львов. ун-та», 1966, № 10, вып. 3, с. 341—351.
101. Попов Г. М., Шафрановский И. И. Кристаллография. М., «Высшая школа», 1972. 352 с.
102. Проблемы развития советской геологии. Л., 1971. 336 с. (Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-т).
103. Разумовский Н. К. Характеристика формы кристаллов. — «Кристаллография», 1955, вып. 4, с. 159—162.
104. Ризниченко Ю. В. О применении звука и ультразвука в геофизике и горном деле. — «Геоакустика», 1966, с. 3—8.
105. Рундквист Д. В. О принципах выделения и прогнозирования рудных формаций. — В кн.: Основы науч. прогноза м-ний рудных и нерудных полезных ископаемых. Л., 1971, с. 27—35.
106. Рундквист Д. В. О пространственно-временных закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых. — В кн.: Проблемы развития сов. геологии. Л., 1971, с. 266—299.
107. Рундквист Д. В. Учение о симметрии в применении к структурам минеральных образований. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1971, с. 183—190.
108. Рундквист Д. В., Денисенко В. К., Павлова И. Г. Грейзеновые месторождения (онтогенез и филогенез). М., «Недра», 1971. 328 с.
109. Рыжов П. А. Геометрия недр. М., «Недра», 1964. 500 с.
110. Серпухов В. И. Курс лекций по структурной геологии для студентов геологической специальности. Л., Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1967. 268 с.
111. Симметрия в природе. Л., 1965. 380 с. (Ленингр. обл. правление Науч.-техн. горн. о-ва).
112. Смирнов Л. С., Колобзаров О. В. Симметрия, эволюция и будущее в геологии. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1965, с. 91—97.
113. Соболев В. С. Генетическое значение понятий структуры и тектуры. — «Минер. сб. Львов. геол. о-ва», 1950, № 4.
114. Соболевский П. К. Современная горная геометрия. — «Реконструкция и наука», 1932, № 7, с. 7—19.
115. Сорский А. А. Механизм образования мелких структурных форм в метаморфических толщах архея — «Труды Геофиз. ин-та АН СССР», 1952, № 18 (145). 143.
116. Спасский Н. Я., Кравцов А. Г. Эволюция животных и симметрия. — В кн.: Симметрия в природе. Л., 1971, с. 367—370.
117. Стейси Ф. Физика Земли. М., «Мир», 1972. 334 с.
118. Стовас М. В. Некоторые вопросы тектогенеза. — В кн.: Проблемы планетарной геологии. М., 1963, с. 222—274.
119. Судовиков Н. Г. Структура будинаж в гранитизированных областях. — «Докл. АН СССР», 1947, нов. сер., т. 8, № 8, с. 1755—1758.

120. Судовиков Н. Г. Будинаж и его значение в петрологии. — «Труды Лабор. геол. докембрия АН СССР», 1957, вып. 7, с. 38—73.
121. Судовиков Н. Г. Региональный метаморфизм и некоторые проблемы петрологии. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1964. 550 с.
122. Толстихин Н. И. Гидрогеология Земли и криосфера. — В кн.: Подземные воды Сибири и Дальнего Востока. М., 1971, с. 28—33.
123. Тохтуев Г. В. О закономерности размещения структур будинаж в геосинклинальной складчатой зоне. — «Бюл. науч.-техн. информ.», 1959, № 6, с. 99—103.
124. Тохтуев Г. В. Структуры будинаж и их роль в локализации оруденения. Киев, «Наукова думка», 1967. 216 с.
125. Тохтуев Г. В. Закономерности деформаций в неоднородно-слоистых геологических средах. Киев, «Наукова думка», 1972. 124 с.
126. Трапезников Г. В. О напряжениях при растяжении. — «Изв. Спб. технол. ин-та», 1929, т. 50, вып. 1, с. 1—29.
127. Усов М. А. Структурная геология. М. — Л., Госгеолтехиздат, 1940. 136 с.
128. Федоров Е. С. Теодолитный метод в минералогии и петрографии. Спб., 1893. 191 с. («Труды Геол. ком.», т. 10, № 2).
129. Федоров Е. С. Курс кристаллографии. Спб., 1901. 438 с.
130. Федоров Е. С. Критический пересмотр форм кристаллов минерального царства. Спб., 1903. 148 с. (Зап. Акад. наук по физ.-мат. отд., т. 14).
131. Федоров Е. С. Некоторые следствия из закона эллипсоида сингонии. Спб. Изв. Акад. наук, 1904, т. 21, № 2, с. 113—140.
132. Федоров Е. С. Предусматривание кристаллизации по расположению атомов. — «Зап. Горн. ин-та», 1917, № 6, с. 161—163.
133. Хайн В. Е. Общая геотектоника. М., «Недра», 1964. 479 с.
134. Хартман П. Зависимость морфологии и кристаллической структуры. — В кн.: Рост кристаллов, М., 1967, т. 12, с. 8—24.
135. Хонигман Б. Рост и форма кристаллов. М., ИЛ, 1961. 212 с.
136. Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы. М., «Мир», 1972. 296 с.
137. Четвериков Л. И. Теоретические основы моделирования тел твердых полезных ископаемых. Воронеж. Изд-во Воронеж. ун-та, 1968. 152 с.
138. Шатский Н. С. Избранные труды. Т. 3. М., АН СССР, 1935. 348 с.
139. Шафрановский И. И. Внешняя симметрия реальных кристаллов и симметрия питающей среды. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1954, ч. 83, вып. 3, с. 198—211.
140. Шафрановский И. И. Группы симметрии в структурной петрологии. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1956, ч. 85, вып. 4, с. 491—497.
141. Шафрановский И. И. Кристаллы минералов. Ч. 1. Плоскогранные формы. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1957. 220 с.
142. Шафрановский И. И. Пьер Кюри — кристаллограф. — «Труды Ин-та истории естеств. и техники АН СССР», 1957, т. 19, с. 84—94.
143. Шафрановский И. И. Ложные формы кристаллов и их минерогенетическое значение. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1959, ч. 88, вып. 1, с. 13—20.
144. Шафрановский И. И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М., Госгеолтехиздат, 1961. 332 с.
145. Шафрановский И. И. К вопросу о симметрии земного шара. — «Географ. сб.», 1962, т. 15, с. 95—103.
146. Шафрановский И. И. К вопросу об уточнении универсального принципа симметрии Кюри. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1964, ч. 93, вып. 4, с. 460—463.
147. Шафрановский И. И. VII Международный конгресс кристаллографов. — «Зап. Всесоюз. минер., о-ва», 1966, ч. 95, вып. 6, с. 771—772.
148. Шафрановский И. И. Лекции по кристалломорфологии. М., «Высшая школа», 1968. 174 с.

149. Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Л., «Недра», 1968. 184 с.
150. Шафрановский И. И. Статистический закон Федорова — Грота и некоторые связанные с ним обобщающие аналогии. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1973, ч. 102, вып. 1, с. 87—88.
151. Шафрановский И. И., Григорьев Д. П. О поверхностях соприкосновения кристаллических зерен. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1948, ч. 77, вып. 3, с. 185—193.
152. Шафрановский И. И., Корень Р. В. Ложные (искаженные) формы реальных кристаллов. — В кн.: Иден Е. С. Федорова в современной кристаллографии и минералогии. Л., 1970, с. 88—94.
153. Шафрановский И. И., Мокриевский В. А. Случаи проявления бесконечной симметрии на кристаллах минералов. — «Минер. сб. Львов. геол. о-ва», 1961, № 15, с. 58—64.
154. Шафрановский И. И., Письменный В. А. Обобщенные формы двойниковых образований. — «Кристаллография», 1961, т. 6, вып. 1, с. 31—42.
155. Шафрановский И. И., Плотников Л. М. О возможностях применения принципов симметрии к исследованию распределения структурных форм и механических напряжений, обусловивших их возникновение. — В кн.: Давления и мех. напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л., 1969, с. 20—23.
156. Шафрановский И. И., Корень Р. В., Дубов П. Л. К методике изучения искаженных форм на кристаллах минералов. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1971, ч. 100, вып. 1, с. 42—48.
157. Шубаев Л. П. Лекции по общему землеведению. Л., 1956, 57 с. (Ленингр. пед. ин-т).
158. Шубаев Л. П. Общее землеведение. М., «Высшая школа», 1969, 348 с.
159. Шубаев Л. П. Симметрия и диссимметрия в географической оболочке. — «Изв. Всесоюз. геогр. о-ва», 1970, т. 102, № 2, с. 107—113.
160. Шубников А. В. Как растут кристаллы. М., Изд-во АН СССР, 1935, 175 с.
161. Шубников А. В. Кристалл как непрерывная среда. «Журн. физ. химии», 1933, № 4, с. 231—245.
162. Шубников А. В. Симметрия (законы симметрии и их применение в науке, технике и прикладном искусстве). М., Изд-во АН СССР, 1940. 176 с.
163. Шубников А. В. Пьезоэлектрические текстуры. М., Изд-во АН ССР, 1946. с. 100.
164. Шубников А. В. Симметрия и антисимметрия конечных фигур. М., Изд-во АН СССР, 1951. 172 с.
165. Шубников А. В. О работах Пьера Кюри в области симметрии. — «Успехи физ. наук», 1956, № 59, с. 541—602.
166. Шубников А. В. Симметрия подобия. — «Кристаллография», 1960, т. 5, вып. 4, с. 489—496.
167. Шубников А. В., Копчик В. А. Симметрия в науке и искусстве. М., «Наука», 1972. с. 340.
168. Шубников А. В., Флинт Е. Е., Бокнй Г. Б. Основы кристаллографии. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1940. с. 487.
169. Шубников А. В., Желудев И. С., Константинова В. П. Исследование пьезоэлектрических текстур. М., Изд-во АН СССР, 1955. 190 с.
170. Шудейкин В. В. Дни прожитые. М., Изд-во АН СССР, 1956, 398 с.
171. Щукин Е. Д. Эффект Ребиндера. — «Наука и человечество», 1970, с. 336—367.
172. A m s t u t z G. G. Symmetrie in Natur und Kunst. Der Aufschluß, 1966, B. 17, H. 6, S. 143—155.
173. B e c k e r G. Finite homogeneous strain. Flow and rupture of rocks. — Bull. Geol. Soc. Am., 1893, 4, p. 13—90.

174. Cloos E. Lineation. A critical review and annotated bibliography. — Geol. Soc. of Am., 1946, mem. 18, 122 p.
175. Curie P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques. — Journal de Physique. 1894 (111), 3, p. 393.
176. Donnay J. D. H., Harker D. A new law of crystal morphology extending the law of Bravais. — Am. Min., 1938, v. 23, p. 446—467.
177. Fourmarier P. Principes de géologie. V. I. Paris — Liège, 1950. 868 p.
178. Grigoriev D. P. Wachstum und Formen der Minerale. — Ber. Deutsch. geol. Wiss., B. Miner. Lagerstättenforsch., 1968, B. 3, S. 289—303.
179. Harker A. On slaty cleavage and allied rock-structures with special reference to the mechanical theories of their origin. — Rep. of Brit. association for advancement of science, Meeting 55, 1885 (1886), p. 813—852.
180. Hartman P., Perdok W. On the relation between crystal structure and crystal morphology. P. 1. — Acta cryst., 1955, 8, v. 8, p. 49—52.
181. Kirchmayer M. Das Symmetrie-Konzept von Curie 1884 in der Makrogefügekunde. — N. Jb. Geol. Paläont. 1965, 122, 3, S. 343—350.
182. Knopf A. The mother lode system of California. — U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1929, 157, 88 p.
183. Lohest M. De l'origine des veines et des géodes des terrains primaires de Belgique. — Ann. de la Geol. de Belgique, 1909, 36, p. 275—282.
184. Meinardus W. Arktische Boden. — Handbuch der Bodenlehre. B. III, Berlin, 1930, S. 27—96.
185. Paterson M. S., Weiss L. E. Symmetry concepts in the structural analysis of deformed rocks. — The geological Society of America. Bulletin, 1961, 72, p. 841—882.
186. Rothamel J. Die Siegerländer Faltenvergitterung. Beispiel eines Scheinproblems. — Zeitschr. Deutsch. Geol. Ges., 1970, B. 120, S. 323—332.
187. Sander B. Gefügekunde der Gesteine. Wien, 1930, 352 S.
188. Sander B. Einführung in die Gefügekunde der Geologischen Köpfer. Wien. B. 1, 1948, 215 S.; B. 2, 1950, 409 S.
189. Schmidt W. Gefügesymmetrie und Tektonik. — Jahrb. d. Geol. Bundesanstalt (Wien), 1926, H. 76, S. 407—430.
190. Schubnikow A. Über die Symmetrie des Kontinuums. — Zeitschr. f. Krist., 1929, B. 72, H. 3, S. 272—290.
191. Schubnikow A. Über die Symmetrie des Semikontinuums. — Zeitschr. d. Krist. 1930, B. 73, H. 3/4, S. 430—433.
192. Strunz H. Mineralogische Tabellen. Leipzig, Akad. Verl., 1970. 621 S.
193. Wells A. Crystal habit and internal structure. — Phil. Mag. 1946, v. 37, N 266, p. 184—189, N 267, p. 217—236.
-